


Artículo original

Avance de los procesos kárstico-erosivos de los suelos en el polje San José de las Lajas

José Manuel Febles-González¹ 

José Miguel Febles-Díaz¹ 

Nelson Moura Brasil do Amaral-Sobrinho² 

Everaldo Zonta² 

Ana Victoria Maura Santiago³ 

¹Centro Investigaciones Marinas. Universidad de La Habana, Calle 16 no. 114 e/1ra y 3ra, Miramar. Playa, La Habana, Cuba, CP 10 300

²Departamento de Suelos, Universidad Federal Rural de Rio de Janeiro, Seropédica-Río de Janeiro, Brasil, CEP: 23.897-000

³Facultad de Contabilidad y Finanzas. Universidad de La Habana, Zapata y G, Vedado, Plaza de la Revolución, La Habana, Cuba, CP 10 400

*Autor para correspondencia: febles@rect.uh.cu; jmfebles@yahoo.com

RESUMEN

Se realiza una actualización de la morfogénesis kárstica en el polje de San José de las Lajas, con el objetivo de realizar una evaluación cuantitativa del avance de los procesos kárstico-erosivos, a partir de una línea base de más de tres décadas en localidades de referencia, en conformidad con las condiciones de uso y manejo a que han estado sometidos los suelos, que demuestra los efectos de la antropogénesis intensiva en los suelos Ferralíticos Rojos, como resultado de un proceso multifactorial, condicionado no solo por las propiedades intrínsecas de la cobertura edáfica y condiciones de uso, sino dependiente de las condiciones geólogo-geomorfológicas. La aplicación del Sistema Integrador de Métodos Cualitativos y Cuantitativos, permitió caracterizar la influencia compleja del relieve en la evolución de los principales parámetros morfométricos de las dolinas con pérdidas entre 12,33-15,95 t ha⁻¹ año⁻¹, que convertidas en unidades de longitud

muestran reducciones en los horizontes A+B entre 0,98-1,20 mm año⁻¹, que sobrepasan los valores umbrales permisibles en términos de erosión propuestos por la USLE y las tasas de formación de suelos derivados de rocas calizas en Cuba, con marcada tendencia a incrementarse, que confirman la necesidad de protección y mejoramiento para que su “inmunidad” a la erosión, deje de ser un mito y se convierta en un asunto de prioridad para la Seguridad Alimentaria en los programas de desarrollo pos Covid-19 en Cuba, ya que estos suelos representan el máximo potencial para satisfacer lo que el país actualmente demanda para las producciones agropecuarias.

Palabras clave: evolución, relieve, erosión

Recibido: 16/09/2020

Aceptado: 12/06/2021

INTRODUCCIÓN

Numerosos son los estudios desarrollados en Cuba en las regiones ferralíticas, pero pocos han incluido la influencia de la morfogénesis kárstica; por ello, las informaciones de larga data propician resultados prácticos y contribuciones significativas al conocimiento de los procesos ecológicos, económicos y sociales, en las que sus interacciones justifican las investigaciones realizadas en los últimos 30 años ⁽¹⁾, en la Llanura Kárstica Meridional Habana-Matanzas, demostrando los efectos de la antropogénesis, debido a la disponibilidad de agua y la presencia de suelos Ferralíticos Rojos que forma uno de los paisajes más típicos y de mayor potencial de recursos del país ⁽²⁾.

Las exploraciones del relieve kárstico permiten una amplia comprensión, tanto de la fisiografía como de la dinámica de los paisajes actuales, además de aportar huellas sobre la paleogeografía y diferenciación espacial de la cobertura edáfica, factores determinantes en la erosión de los suelos ⁽³⁻⁵⁾, ya que si el clima es la causa generadora de los procesos erosivos, el relieve es por excelencia en el ámbito geográfico el factor que los diferencia. Se sabe que áreas vecinas bajo el mismo régimen climático pueden experimentar procesos erosivos de magnitudes muy diferentes, condicionados por las peculiaridades geológico-geomorfológicas que los caracterizan ^(6,7).

Estudios pioneros realizados en la Llanura Sur de La Habana han demostrado que en la variabilidad de la cobertura ferralítica influye, fundamentalmente, el relieve y la permeabilidad del material sustentador ⁽⁸⁻¹⁰⁾, si estos dos factores son evaluados a una

escala más grande, se constata que el desarrollo de formas kársticas (dolinas, uvalas, depresiones kársticas, valles, etc.) y sus consecuencias sobre el microrelieve, fomentan condiciones propicias para la manifestación diferenciada del régimen hídrico de los suelos ⁽⁹⁾, donde las dolinas están consideradas formas diagnósticas del karst ⁽¹¹⁾ e incluso, como las formas fundamentales en este contexto geomorfológico ⁽¹²⁾.

Teniendo en consideración estos aspectos otros autores precisan la necesidad de diferenciar, al menos, tres magnitudes principales del relieve (macro, meso y microrelieve) ⁽¹³⁾, a las cuales deben quedar referidos el conjunto de procesos que contemporáneamente participan en la formación o degradación de los suelos, resultando imperativo que a diferentes escalas se tenga en cuenta no sólo el perfil principal o predominante en el contorno separado ⁽¹⁴⁾, sino las variaciones o cambios a nivel de meso y microrelieve (Figura 1), contribuyendo con ello a un mejor conocimiento de la organización bi y tridimensional de la cobertura agropedológica.

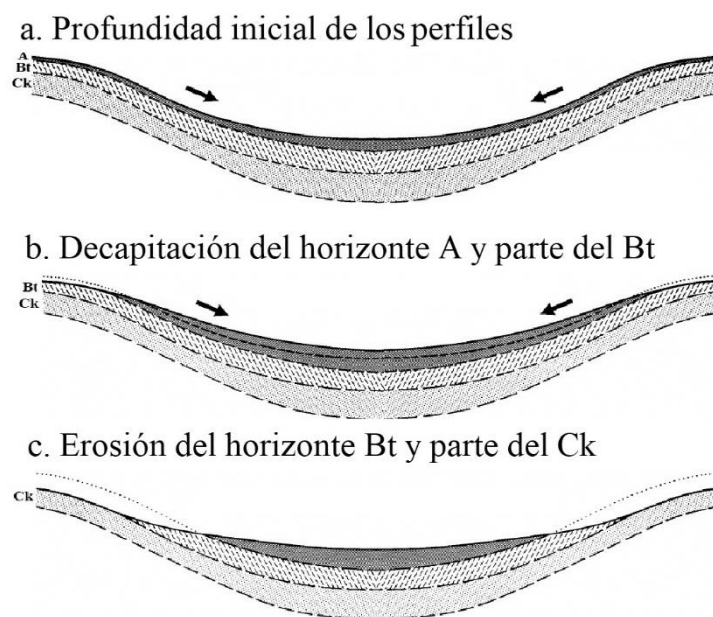


Figura 1. Modelo conceptual de la interacción de los procesos erosivos en las vertientes de una dolina. Modificado

La presente investigación se desarrolló en el polje de San José de las Lajas y tuvo como objetivo realizar una evaluación cuantitativa del avance de los procesos kárstico-erosivos, a partir de una línea base de más de tres décadas en localidades de referencia, en conformidad con las condiciones de uso y manejo a que han estado sometidos los suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de las áreas investigadas

Se desarrolló en la porción central de la Llanura Kárstica Meridional Habana-Matanzas (Figura 2), en el polje de San José de las Lajas con una extensión aproximada de 469,80 km² ⁽¹⁾, donde la dinámica kárstico-erosiva muestra diferentes grados de desarrollo, en conformidad con las condiciones de uso y manejo a que ha estado sometida esta región, a partir de investigaciones iniciadas durante el año 1986 que constituye la línea base de la información.

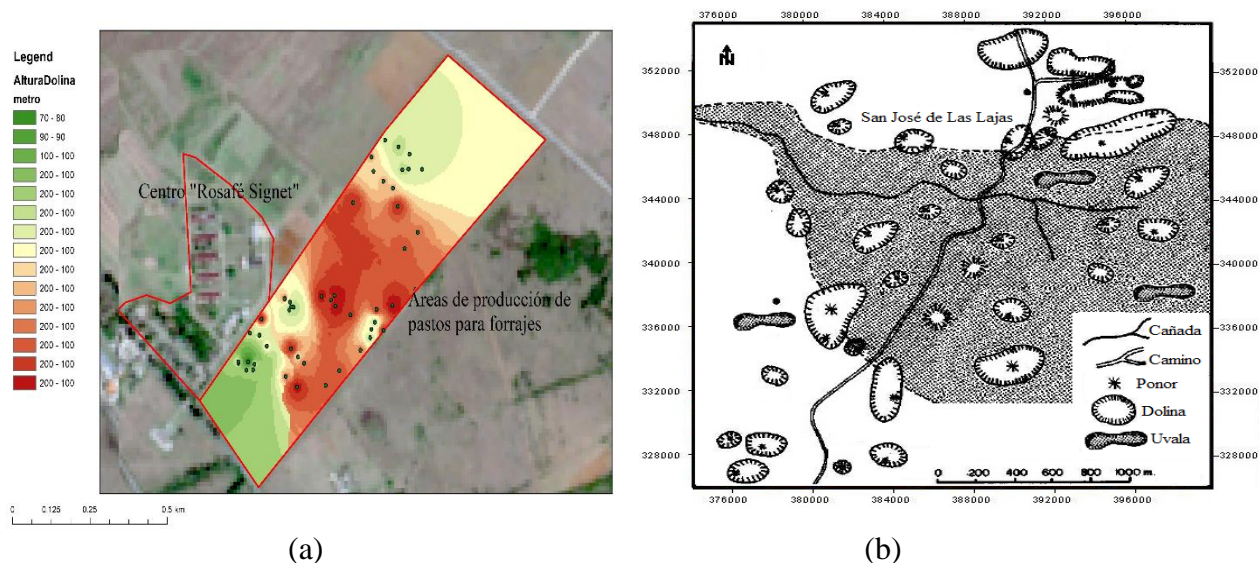


Figura 2. Modelo digital de elevaciones en el Centro I.A. “Rosafé Signet” (a).

Principales formas kársticas del polje de San José de las Lajas, provincia Mayabeque (b)

Este agro ecosistema, se ha clasificado como de los más húmedos de las llanuras de Cuba, reciben alrededor del 76-80 % de las precipitaciones que ocurren en las provincias Mayabeque y Artemisa ⁽¹⁵⁾, donde el índice de concentración de las precipitaciones oscila entre 13-14 % ⁽¹⁶⁾ y la lámina anual muestra valores comprendidos entre 1 400-1 600 mm ⁽¹⁷⁾. Los suelos más difundidos son predominantemente del Tipo Ferralítico Rojo Lixiviado, que se puede correlacionar con el Nitisol ródico éutrico ^(18,19) y al Orden Oxisol de la Soil Taxonomy ⁽²⁰⁾, donde las diferencias están dadas por el tipo de utilización de la tierra y la distribución de los horizontes. La composición textural generalmente posee contenidos de arcilla mayores del 60 % con horizonte B argílico, bien drenado y con pH entre 6,0 y 7,0.

Datos utilizados

La metodología estuvo sustentada en la aplicación del Sistema Integrador de Métodos Cualitativos y Cuantitativos ⁽²¹⁾, que caracterizan las regiones kársticas, condicionada por la disponibilidad y la calidad de sus principales atributos, caracterizándose 12 perfiles principales a profundidades de 0-20 cm, como al nivel de los horizontes de diagnóstico erosivo A+B₀₋₅₀ cm, en correspondencia con las variaciones geólogo-geomorfológicas y uso agrícola ⁽²²⁾.

Se tomó como referencia el perfil C₁(Sin erosión aparente) ⁽⁹⁾, localizado en un área en biostasia, con una profundidad inicial del horizonte A₀₋₄₉₀ mm, para evaluar en los diferentes períodos la magnitud de pérdida de los suelos Ferralíticos Rojos.

El análisis morfométrico de las formas de absorción kársticas (dolinas) se realizó a escala 1:10 000 y constituyó el índice diagnóstico fundamental para evaluar las manifestaciones e intensidad de la karstificación (Tabla 1), corroborado en los recorridos exploratorios, de acuerdo con la propuesta realizada en anteriores investigaciones ^(23,24).

Tabla 1. Fórmulas utilizadas para el cálculo de los parámetros morfométricos en el polje de San José de las Lajas, provincia Mayabeque

Índice de circularidad (1)	Índice de aplanamiento (2)	Relación de diámetro (3)
$IC = \frac{Dm + dm}{DM}$	$IA = \frac{Dm + dm}{4h}$	$Rd = \frac{Dm}{dm}$
Donde:		
Dm = diámetro mayor		DM= diámetro medio
dm = diámetro menor		h = diferencia de altura (superficie - fondo)

Las pérdidas de suelos a través de las depresiones kársticas se obtuvieron de las calculadas en otras investigaciones ^(25,26), mediante la aplicación del modelo de erosión empírico-conceptual MMF ^(27,28) en estas localidades, considerando la variabilidad climática, como las propiedades físicas, físico-químicas y químicas. Las unidades de peso (t ha⁻¹ año⁻¹) correspondientes al período 1986-2019 fueron convertidas en unidades de longitud (mm año⁻¹) de acuerdo a la propuesta realizada ⁽²⁹⁾ y la interpretación de los límites de tolerancia de pérdidas, según el modelo USLE ⁽³⁰⁾, adaptado por otros autores ⁽³¹⁾.

Los trabajos geofísicos se realizaron a través de 15 perfiles trazados en dirección NW-SE y distancias entre ellos de 100 m; utilizándose los métodos de perfilajes eléctricos, simétricos y verticales, ambos con el dispositivo simétrico Schlumberger. Para las mediciones de perfilajes se tomó la instalación con los parámetros siguientes: AB= 80 y MN= 10 m,

con pasos de medición en los perfiles de 10 m, igual a la distancia MN. Los puntos de SEV se realizaron a través de los perfiles con distancias entre puntos de 100 m ⁽³²⁾.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Influencia compleja del relieve en las pérdidas de suelos por las cavidades de "soutirage" en el polje San José de las Lajas

Cuando se pretende describir la situación de los suelos Ferralíticos Rojos en los territorios investigados en un contexto espacio-temporal, todo análisis transita por las fases de la morfogénesis kárstica en que se encuentran, respecto a sus atributos físicos, químicos y biológicos que puedan favorecer, limitar o inhibir su resiliencia ⁽¹⁾.

Las depresiones más características en el polje de San José de las Lajas son las dolinas en forma de embudo (Figura 3), también llamadas de "subsidencia" o "soutirage", que se forman por sucesivos hundimientos del terreno sobre un sustrato con gran cantidad de conductos kársticos, por lo general, fácilmente reconocibles en el campo donde las aguas pluviales y las de riego superficial, portadoras casi siempre de cierto contenido de anhídrido carbónico en disolución, cuando escurren por los diferentes elementos del relieve, lo hacen de forma encauzada hacia el fondo de la depresión que funcionan como niveles de bases locales o sumideros temporales, con microcuencas bien definidas, ejerciendo un efecto de succión "turbillonar" en su interior, descripción que coincide con las reportadas en regiones similares ^(33,34). En ocasiones el fondo está taponado por sedimentos arcillosos de color rojo (Figura 3), sin estructuración aparente con espesores que llegan a superar los 5 m, enriquecidos en materia orgánica y restos vegetales, proceso que fuera comprobado mediante excavaciones realizadas en varias depresiones en la porción central del polje.

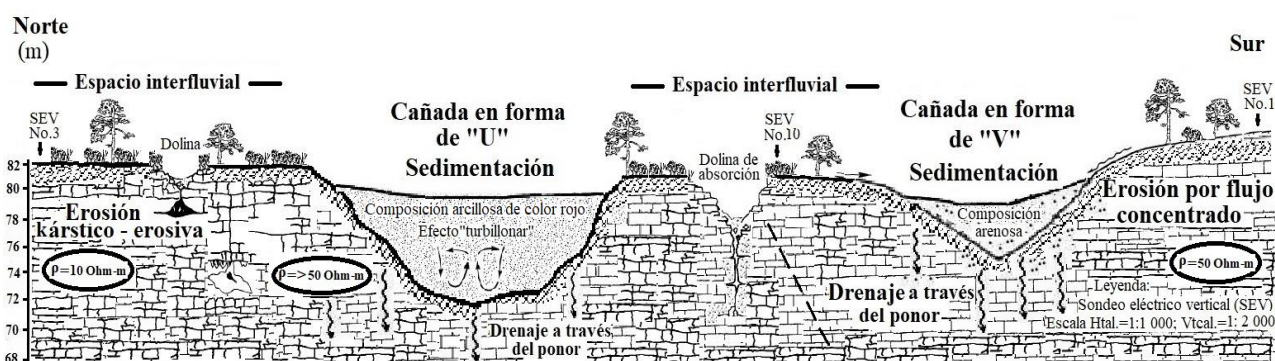


Figura 3. Cañada kárstica con valles en formas de "U" y "V" en espacios interfluviales en el polje de San José de las Lajas, provincia Mayabeque

Resulta igualmente manifiesta la presencia de cañadas kársticas con valles en formas de "U" y "V" que a modo de barreras geomorfológicas se disponen en sentido transversal al declive general que muestran las vertientes (Figura 3), interceptando el escurrimiento, así como los productos de la erosión (suelos y rocas), los cuales por esta vía resultan redistribuidos por toda la región.

Este efecto "regulador" sobre la erosión, resulta con frecuencia uno de los elementos básicos del tejido hidrográfico, donde las formas de absorción y sus elementos componentes ejercen cierto control del escurrimiento superficial y subsuperficial, generando diferentes asociaciones o fenómenos de miniaturización en el propio complejo territorial a nivel de micro relieve, con una reducción considerable del fondo de tierra apto para la actividad agropecuaria, lo cual coincide con las descripciones realizadas ⁽³⁵⁾. Estos procesos se desarrollan asimismo en el interior del macizo como lo corroboran los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) (Figura 4). Así se tiene, que a los niveles donde los valores de resistividad están comprendidos entre 10-20 Ohm-m, el espesor de los suelos y el karst se manifiesta débilmente, mientras que las superficies con resistividades de 50 Ohm-m y mayores, la profundidad de los suelos son menores y los procesos kárstico-erosivos más enérgicos, manifestándose morfológicamente con las superficies de mayor densidad de dolinas constituidas por calizas muy alteradas, descompuestas y diaclasadas rellenas de sedimentos arcillosos de muy baja resistividad (10 Ohm-m), lo que permiten considerar que los procesos kárstico-erosivos tuvieron su origen en condiciones climáticas diferentes a las actuales; es decir, en condiciones de humedad mayor que el que ahora predomina en el área ⁽³⁶⁾.

En cambio, en otros sectores del polje estas acciones no se expresan de manera tan evidente y se limitan a las flexuras convexas del relieve (Figura 4), que subrepticamente favorecen el desprendimiento y remoción areal de las fracciones más finas de los suelos, a un ritmo directamente relacionado con el escurrimiento difuso ^(37,38), que en unos casos se une de manera directa en la red de drenaje, mientras que en otros se incorpora a las efímeras cañadas kársticas de "heterogeneidad organizada", donde pueden residir un tiempo prolongado, según los casos, hidrodinámica que diferencia claramente a estas regiones de cualquier otra ⁽³⁹⁾.

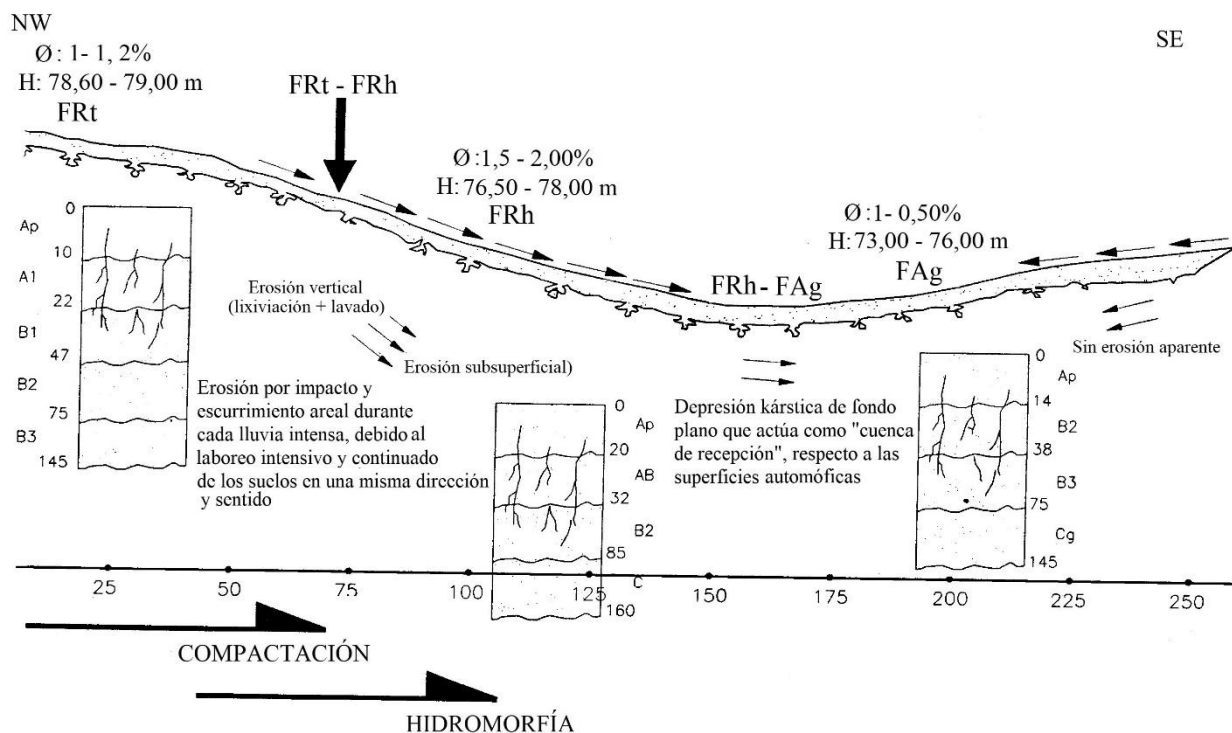


Figura 4. Dinámica de los procesos kárstico-erosivos en una dolina del polje de San José de las Lajas, provincia Mayabeque

Sin embargo, la cobertura de suelos Ferralíticos puede modelar por acúmulo estas depresiones; enmascarando, de cierto modo, el mecanismo de acción relacionado, lo cual ha provocado en gran medida la subvaloración de este complejo proceso ⁽¹³⁾.

Evolución secuencial de los parámetros morfométricos de las dolinas y pérdidas de suelos en el polje de San José de las Lajas

El incremento de las dimensiones morfométricas de las dolinas durante los años 1986-2019 (Figura 5 y Tabla 2), permiten confirmar que se desarrolla un proceso o modalidad erosiva inherente a los suelos Ferralíticos Rojos, denominada erosión subsuperficial, como resultado de la remoción de éstos hacia las cavidades kársticas, cuya manifestación más evidentes resulta la amplitud de su diámetro medio (DM) a expensas de la reducción de los espacios interfluviales o "dolinización", con marcada tendencia hacia el endorreísmo con una irreversibilidad de la karstificación en su evolución unidireccional ^(1,40).

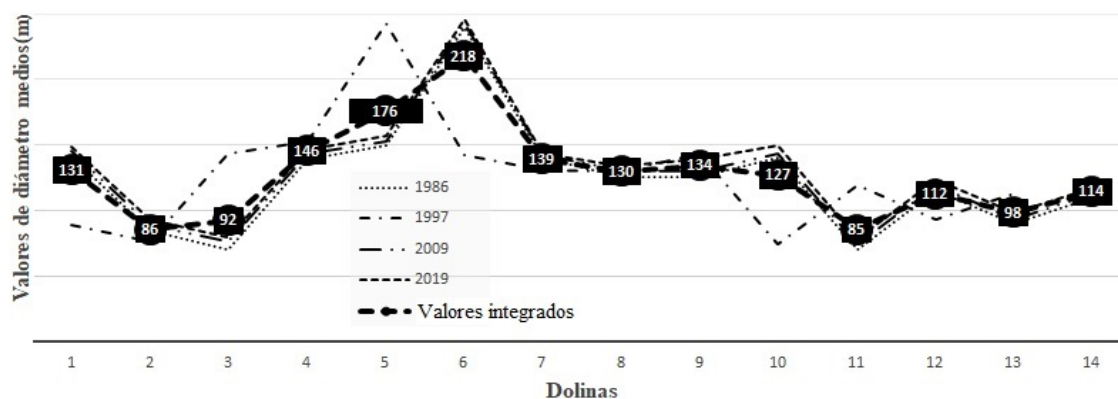


Figura 5. Evolución del diámetro medio de las dolinas en el Centro I.A. “Rosafé Signet, Polje de San José de las Lajas, provincia de Mayabeque, período1986-2019

En efecto, el índice de aplanamiento (IA) muestra valores que morfológicamente se expresan en dolinas con poca disección, como resultado de un proceso de desmembramiento vertical en avance. Así la dolina No. 3 mantiene una sostenida tendencia al aplanamiento (5,63-5,45), producto de un desbalance entre la erosión areal y la corrosión a favor del aplanamiento, que favorece el desprendimiento y migración de las fracciones más finas del *solum* que se acumulan en su fondo.

Tabla 2. Evolución de los parámetros morfométricos de las dolinas en el Centro I.A. “Rosafé Signet”, Polje de San José de las Lajas, provincia de Mayabeque, período1986-2019

Dolina No.	IC				IA				Rd			
	1986	1997	2009	2019	1986	1997	2009	2019	1986	1997	2009	2019
1	2,04	1,36	1,72	1,73	10,13	7,17	9,12	8,02	7,53	5,47	7,55	3,78
2	1,94	1,55	1,54	1,40	8,44	8,59	5,08	7,17	8,80	9,22	9,36	4,56
3	1,71	1,34	1,35	1,37	5,63	5,67	5,35	5,45	16,00	13,69	13,28	6,37
4	1,92	1,55	1,55	1,56	17,96	10,21	10,18	9,54	9,13	9,26	9,30	4,45
5	1,60	1,14	1,14	1,12	10,63	12,86	8,98	8,81	32,00	29,81	30,36	13,98
6	1,75	1,33	1,33	1,33	13,33	12,81	11,94	11,67	14,00	14,15	14,25	6,97
7	1,53	1,04	1,04	1,04	9,09	5,69	8,07	7,54	114,40	96,66	116,80	36,23
8	1,92	1,56	1,56	1,57	12,19	14,64	11,84	10,50	9,14	9,08	9,12	4,53
9	1,56	1,10	1,11	1,13	16,88	10,17	10,42	9,94	52,00	41,84	39,71	16,68
10	1,61	1,15	1,15	1,41	10,00	9,34	8,78	10,55	30,00	29,33	28,36	14,10
11	2,14	1,83	1,83	1,87	10,83	8,50	8,81	9,12	6,66	6,77	6,81	3,56
12	1,56	1,11	1,14	1,16	7,81	8,01	7,46	8,94	48,00	36,00	30,58	33,58
13	2,00	1,66	1,66	1,66	9,38	8,61	8,25	8,13	8,00	8,00	8,06	4,00
14	1,64	1,19	1,17	1,19	10,88	9,64	8,43	8,73	22,86	22,55	25,00	10,84
15	-----	-----	1,25	1,28	-----	-----	8,33	8,74	-----	-----	18,00	7,76
16	-----	-----	1,50	1,52	-----	-----	3,75	3,99	-----	-----	10,00	4,35

No obstante, en los últimos años, esta dinámica ha comenzado a experimentar cambios como resultado de la variabilidad climática, la cual ha incrementado el hidromorfismo y los procesos de carbonatación-disolución ⁽⁴¹⁾, cuya expresión más reveladora es la aparición de ponores de diferentes dimensiones en el fondo de prácticamente todas las dolinas y el surgimiento de otras dos formas de absorción (dolinas 15 y 16), las cuales no fueron reportadas en estudios anteriores.

Respecto al índice de circularidad (IC) no se aprecian cambios notables en los valores (1,04-2,14), por el supuesto que la circularidad de las depresiones está condicionada a las características del sistema de agrietamiento y proceso de disolución del macizo con elementos estructurales que se interceptan. Además de estar sujetos a procesos de disolución para dar lugar a las depresiones, coincidiendo con resultados obtenidos ⁽⁴²⁾.

Las relaciones de diámetro (Rd) varían en un rango amplio (3,78-116,80), lo que permiten aseverar que la génesis de las dolinas se desarrolla bajo un control litoestructural no superficial, relacionado con la influencia del acuífero ⁽⁴³⁾, así como por movimientos sísmicos que ocasionalmente han afectado al territorio, los cuales a pesar de sus bajas magnitudes, han dado lugar a fuertes sacudidas ⁽⁴⁴⁾, a lo que se adicionan los desechos contaminantes de varias industrias de la zona, que incrementan la agresividad química de las aguas subterráneas portadoras de hidrocarburos aromáticos policíclicos y bifenilos policlorados ^(45,46).

Esta evolución secuencial de los parámetros morfométricos de las depresiones kársticas ha conllevado sostenidos incrementos en los volúmenes de pérdidas de los suelos Ferralíticos Rojos (Tabla 3), que sobrepasan los valores umbrales de tolerancia de $12,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ⁽⁴⁷⁾ para los suelos derivados de rocas calizas y que convertidos en unidades de longitud ⁽²⁹⁾, muestran reducciones en los horizontes A+B entre $0,98\text{-}1,20 \text{ mm año}^{-1}$, lo cual ha generado reducciones considerables del fondo de tierra, que corrobora, de forma cuantitativa, lo que otros autores expusieron en sus respectivas investigaciones ^(48,49).

Tabla 3. Volumen de pérdidas de suelos con los valores de equivalencia de remoción superficial en dolinas del Centro I.A. “Rosafé Signet”, provincia de Mayabeque, período 1986-2019

Dolina No.	Línea base 1986		PERÍODOS DE OBTENCIÓN DE DATOS					
	Volumen (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Superficial (mm año ⁻¹)	Volumen (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Superficial (mm año ⁻¹)	Volumen (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Superficial (mm año ⁻¹)	Volumen (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Superficial (mm año ⁻¹)
1	15,96	1,17 A	17,82	1,31 A	17,65	1,29 A	18,05	1,31 A
2	17,63	1,35 A	16,92	1,24 A	20,21	1,48 A	20,11	1,44 T
3	21,36	1,57 MA	22,13	1,62 MA	23,61	1,73 MA	23,66	1,75 MA
4	14,85	1,09 A	14,24	1,04 MA	14,26	1,04 A	15,03	1,14 A
5	10,01	0,73 T	8,36	0,61 T	11,91	0,87 A	12,07	0,89 A
6	9,39	0,69 T	9,73	0,71 T	10,43	0,76 T	11,01	0,81 A
7	10,68	0,78 A	17,14	1,26 A	12,04	0,88 A	12,82	0,90 A
8	12,02	0,88 A	10,03	0,73 T	12,38	0,91 A	13,00	0,94 A
9	9,01	0,66 T	10,14	0,74 T	10,67	0,78 A	11,08	0,81 A
10	10,73	0,78 A	11,51	0,84 A	12,31	0,90 A	12,79	0,92 A
11	16,07	1,18 A	20,23	1,48 A	19,42	1,42 A	19,98	1,44 A
12	13,04	0,95 A	13,08	0,96 A	14,32	1,05 A	15,19	1,19 A
13	16,65	1,22 A	18,12	1,33 A	18,82	1,38 A	19,01	1,40 A
14	10,27	0,75 T	11,63	0,85 A	13,04	0,95 A	14,02	1,02 A
15	---	----	---	----	14,07	1,03 A	14,99	1,75 A
16	---	----	---	----	15,10	2,72 MA	16,00	1,23 A
Media	12,33	0,98 A	13,292	1,05 A	13,70	1,20 A	15,55	1,18 A

A: Alto; MA: Muy alto y T: Tolerable

No obstante, es de destacar que a inicios de la década de los años 90 del Período Especial o de crisis económica en Cuba, cuando las actividades agropecuarias en el polje quedaron paulatinamente inhabilitadas, comenzó una regeneración natural con especies “cicatrizadoras” tales como marabú (*Dichrochys glomerata*), aroma (*Acacia farnesiana*) y palmas (*Roystonea regia*), que actuaron como un barbecho inducido y que propiciaron cierta resiliencia o estabilidad morfoedafológica en los procesos kárstico-erosivos ^(50,51), favoreciendo la recuperación edáfica con alguna independencia del valor energético del relieve, aspecto que se refleja en la ralentización de los parámetros morfométricos de las dolinas (Tabla 2), así como en los volúmenes de pérdidas con sus respectivos valores de equivalencia de remoción superficial, en especial durante el año 1997 (Tabla 3).

De la misma manera, resulta notable la pluralidad de otras formas kársticas superficiales, como afloramientos de calizas de diámetros muy variables, carsolitos desde apenas unos centímetros hasta de 0,50 m (incluso mayores), lapiaz cubierto con depósito

proludio-deluviales, uvalas (con ponores funcionales), sumideros; entre otras, que desempeñan un importante papel en el ámbito del polje, dada su capacidad para coleccionar, transformar o drenar las aguas superficiales y subterráneas, condicionadas por la evolución espacio-temporal de la cobertura edáfica, que modifican la dinámica del medio e interfirieren con dichas interdependencias, resultado que coincide con investigaciones similares ^(52,53).

La subvaloración de los procesos expuestos pudiera conducir a transformar el complejo territorial en las próximas décadas en un “desierto rocoso”, dejando improductivas áreas que en el pasado fueron aptas para una amplia gama de usos agrícolas, pecuarios y forestales, tal como lo alertaran algunos investigadores ⁽⁵⁴⁾. En cualquier caso, estudios similares en estos ambientes resultan muy escasos a nivel mundial, no sólo por el tiempo que es necesario para lograr resultados fiables, sino porque en el caso de los ecosistemas kársticos ⁽⁵⁵⁾, están sometidos a perturbaciones constantes que dificultan la labor investigativa.

CONCLUSIONES

- La evaluación dinámica de los principales indicadores morfométricos demuestran el avance e intensidad de los procesos kárstico-erosivos en el territorio investigado, caracterizado por la amplitud de las depresiones kársticas e incrementos en sus volúmenes de pérdidas, con valores comprendidos entre 12,33-15,95 t ha⁻¹año⁻¹ en más del 75 % de las dolinas, que sobrepasa los límites permisibles en términos de erosión para los suelos derivados de rocas calizas, los cuales convertidos en unidades de longitud, muestran reducciones en los horizontes A+B entre 0,98-1,20 mm año⁻¹, que origina pérdidas relevantes en el fondo de tierra.
- Resulta necesario reconocer la existencia de procesos de erosión hídrica y kárstico-erosivos en los suelos Ferralíticos Rojos para que su “inmunidad”, deje de ser un mito y se convierta en un asunto de prioridad para la Seguridad Alimentaria en los programas de desarrollo pos Covid-19 en Cuba, ya que estos suelos representan el máximo potencial para satisfacer las demandas de las producciones agropecuarias, donde la investigación agrícola puede desempeñar un papel crucial en la transformación de los sistemas kársticos, haciéndolos más sostenibles y resilientes.

BIBLIOGRAFÍA

1. Febles González JM, Febles Díaz JM, Sobrinho NMBA, Tolón-Becerra A, Lastra-Bravo X, Botta GF. Resilience of Red Ferralitic soils in the karst regions of Mayabeque Province, Cuba. *Land degradation & development* [Internet]. 2019;30(1):109–16. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/ldr.3192>
2. Rodríguez JMM, Chaple MC, Rodríguez PA, Mestre DH, Miranda AV. Los mapas de Paisajes del Atlas Nacional de Cuba LX Aniversario [Internet]. 2020 [cited 15/08/2021]. Available from: <http://revistas.geotech.cu/index.php/rcg/article/view/322>
3. Bakalowicz M. Karst and karst groundwater resources in the Mediterranean. *Environmental Earth Sciences* [Internet]. 2015;74(1):5–14. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-015-4239-4>
4. Poesen J. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surface Processes and Landforms* [Internet]. 2018;43(1):64–84. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/esp.4250>
5. Instituto de Geografía Tropical. Mapa de Erosión Potencial. In Atlas Nacional de Cuba XL Aniversario. [Internet]. 2020 [cited 18/08/2021]. Available from: <http://revistasgeotech.com/index.php/rcg/article/view/318/131>
6. Medina H, van Lier Q de J, García J, Ruiz ME. Regional-scale variability of soil properties in Western Cuba. *Soil and Tillage Research* [Internet]. 2017;166:84–99. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198716302215>
7. Febles-González JM, Martínez-Robaina AY, Amaral-Sobrinho NMB, Febles-Díaz JM, Zonta E. The geological environments in the accumulation of heavy metals in soils of Pinar del Río. *Cultivos Tropicales* [Internet]. 2020;41(2):e05. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Jose-Febles-Diaz/publication/344344367_The_geological_environments_in_the_accumulation_of_heavy_metals_in_soils_of_Pinar_del_Rio/links/5f6a4ccf299bf1b53ee9baea/The-geological-environments-in-the-accumulation-of-heavy-metals-in-soils-of-Pinar-del-Rio.pdf
8. Camacho-Díaz E. Etude des sols des plaines karstiques de la région occidentale de Cuba: étude d'une zone ouverte sur la mer située entre San Nicolas de Bari et

- Guanajay et particulièrement des sols ferrallitiques rouges compacts. 1980; Available from: <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:02079>
9. Febles González JM, Martin Alonso NJ, Hernandez S. L'érosion et l'utilisation des sols dans la plaine karstique de Cuba: étude de plusieurs cas. Sol et eau: résumés des actes du séminaire. Suelo y agua: resúmenes de las actas del seminario [Internet]. 1986;717–28. Available from: <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:24560>
 10. Bosch Infante D. Les sols des plaines karstiques de la région occidentale de Cuba: étude d'une plaine quasi-fermée située dans la zone de Catalina de Guines et particulièrement des sols ferrallitiques jaunes. 1981; Available from: <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:00392>
 11. Zeng C, Wang S, Bai X, Li Y, Tian Y, Li Y, et al. Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology using RUSLE with GIS. Solid Earth [Internet]. 2017;8(4):721–36. Available from: <https://se.copernicus.org/articles/8/721/2017/>
 12. Haryono E, Adji TN. Geomorfologi dan hidrologi karst. 2017; Available from: https://www.researchgate.net/publication/290608050_GEOMORFOLOGI_DAN_HIDROLOGI_KARST
 13. Febles González JM, Vega M. Degradación del suelo por procesos de erosión hídrica (Degradação do solo por processos de erosão hídrica). Impactos ambientais provenientes da produção agrícola: experiências argentinas e brasileiras [Internet]. 2016;119–65. Available from: <http://www.ia.ufrj.br/zonta/impactosambientais2016view.pdf>
 14. USDA. Soil science division staff. In: Soil survey manual [Internet]. 18th ed: USDA Handbook. 2017. Available from: https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/2017/03000/Estimation_of_Saturated_Soil_Paste_Salinity_From.4.aspx
 15. INSMET. Instituto de Meteorología de Cuba. Resumen Sinóptico Mensual. [Internet]. 2012 [cited 15/08/2021]. Available from: <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=MES&TB2=/Mes/Diciembre2012.htm&TB3=2012>
 16. Vega MB, Febles JM. La agresividad de la lluvia en áreas rurales de la provincia la habana como factor de presión en la sostenibilidad agroambiental. II Seminario Internacional de Cooperación y Desarrollo en Espacios Rurales Iberoamericanos. Sostenibilidad e indicadores. Almeria [Internet]. 2008;14–6. Available from: <https://docplayer.es/112943386-La-agresividad-de-la-lluvia-en-areas-rurales-de-la>

- provincia-la-habana-como-factor-de-presion-en-la-sostenibilidad-agroambiental.html
17. Silva JLB. Evaluación de los recursos hídricos de Cuba. Revista Geográfica [Internet]. 2016;(157):73–83. Available from: <https://revistasipgh.org/index.php/regeo/article/view/212>
 18. Resources WRB for S. A framework for international classification, correlation and communication. In: World soil resources reports [Internet]. FAO Rome; 2006. p. 145. Available from: <https://research.wur.nl/en/publications/world-reference-base-for-soil-resources-2006-a-framework-for-inte>
 19. Hernández-Jiménez A, Pérez-Jiménez JM, Bosch-Infante D, Speck NC. La clasificación de suelos de Cuba: énfasis en la versión de 2015 [Internet]. Vol. 40. EDICIONES INCA; 2015. Available from: http://ediciones.inca.edu.cu/files/libros/clasificacionsueloscuba_%202015.pdf
 20. USDA. Soil Science Division Staff. Soil survey manual Ditzler C, Scheffe K, Monger HC, editors. Washington, D.C.: Government Printing Office. [Internet]. 2017 [cited 15/08/2021]. Available from: <https://www.iec.cat/mapasols/DocuInteres/PDF/Llibre50.pdf>
 21. Febles JM, Vega MB, Febles G. Sistema integrador de métodos cualitativos y cuantitativos para evaluar la erosión de los suelos en las regiones cársticas de uso ganadero de Cuba. Revista Cubana de Ciencia Agrícola [Internet]. 2008;42(3):313–7. Available from: <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193015504016.pdf>
 22. Pavlopoulos K, Evelpidou N, Vassilopoulos A. Mapping geomorphological environments [Internet]. Springer Science & Business Media; 2009. Available from: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=N5htL6WHBiYC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Mapping+geomorphological+environments:+Springer+Science+%26+Business+Media%3B+2009.&ots=mCffu2a5BF&sig=1BzEM5s1R7xYIAwYYtjSs6KklJE#v=onepage&q=Mapping%20geomorphological%20environments%3A%20Springer%20Science%20%26%20Business%20Media%3B%202009.&f=false>
 23. Llopis Lladó N. Fundamentos de Hidrogeología Carstica. Introducción a la geoespeleología [Internet]. Pueblo y Educación; 1982. Available from: <http://espeleologiabibliografia.blogspot.com/2010/01/hidrogeologia-karstica-llopis.html>

24. Cherlinka. Morfometrychni parametry reljjefu jak bazys dlja predykatyvnogho modeljuvannja prostorovogho poshyrennja gruntovykh vidmin. In Aghrokhimija i gruntoznavstvo. In: Proceedings of the Global Symposium on Soil Erosion [Internet]. Food & Agriculture Org.; 2019. Available from: https://books.google.com/cu/books?id=17y4DwAAQBAJ&pg=PA255&lpg=PA255&dq=Morfometrychni+parametry+reljjefu+jak+bazys+dlja+predykatyvnogho+modeljuvannja+prostorovogho+poshyrennja+gruntovykh+vidmin.+In+Aghrokhimija+i+gruntoznavstvo.;+2017&source=bl&ots=TSaDd6Em3q&sig=ACfU3U1K50uouOUskoMx_A2-ZjaD9kOfTA&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjOvbiljbTyAhXWRjABHaUhAToQ6AF6BAgCEAM#v=onepage&q=Morfometrychni%20parametry%20reljjefu%20jak%20bazys%20dlja%20predykatyvnogho%20modeljuvannja%20prostorovogho%20poshyrennja%20gruntovykh%20vidmin.%20In%20Aghrokhimija%20i%20gruntoznavstvo.%3B%202017&f=false
25. González JM, Vega-Carreño M. Evaluación de la erosión de los suelos en las regiones cársicas de La Habana mediante el nuevo método EVERC [Internet]. 2006. Available from: https://www.researchgate.net/publication/329074985_EVALUACION_DE_LA_EROSION_DE_LOS_SUELOS_EN_LAS_REGIONES_CARSICAS_DE_LA_HABANA_MEDIANTE_EL_NUEVO_METODO_EVERC
26. Febles JM, Tolón A, Vega MB. Edaphic indicators for assesment of soil erosion in karst regions, province of Havana, Cuba. Land degradation & development [Internet]. 2009;20(5):522–34. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/ldr.929>
27. Morgan RPC, Morgan DDV, Finney HJ. A predictive model for the assessment of soil erosion risk. Journal of agricultural engineering research [Internet]. 1984;30:245–53. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Ddv-Morgan/publication/236770602_A_predictive_model_for_assessment_of_erosion_risk/links/56d5d73908aee73df6c053ad/A-predictive-model-for-assessment-of-erosion-risk.pdf
28. Morgan RPC. A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan–Morgan–Finney model. Catena [Internet]. 2001;44(4):305–22. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816200001715>
29. Geler T, Ligtenberg A, de By R. Modelo para el pronóstico de la dinámica de erosión de los suelos debido a los cambios en el uso de la tierra [Internet] [MSc. Thesis].

2004. Available from:
https://www.researchgate.net/publication/28070052_Modelo_para_el_pronostico_de_la_dinamica_de_erosion_de_los_suelos_debido_a_los_cambios_en_el_uso_de_la_tierra
30. Kimble JM, Knox EG, Holzhey CS. Soil Survey Laboratory Methods for Characterizing Physical and Chemical Properties and Mineralogy of Soils. Application of Agricultural Analysis in Environmental Studies [Internet]. 1993 [cited 18/08/2021]; doi:10.1520/STP23868S
31. McCormack DE, Young KK, Kimberlin LW. Current criteria for determining soil loss tolerance. Determinants of soil loss tolerance [Internet]. 1982;45:95–111. Available from:
<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/soilscisocpub45.c9>
32. Reynolds JM. An introduction to applied and environmental geophysics [Internet]. John Wiley & Sons; 2011. Available from:
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=kMnHYMgMzVQC&oi=fnd&pg=PR6&dq=Introduction+to+Applied+and+Environmental+Geophysics&ots=rWXFjCOfHD&sig=KLutiMjsLrtvQg7hD-nPWcB0eDU#v=onepage&q=Introduction%20to%20Applied%20and%20Environmental%20Geophysics&f=false>
33. Apollonio C, Delle Rose M, Fidelibus C, Orlanducci L, Spasiano D. Water management problems in a karst flood-prone endorheic basin. Environmental earth sciences [Internet]. 2018;77(19):1–15. Available from:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-018-7866-8>
34. Yan Y, Dai Q, Jin L, Wang X. Geometric morphology and soil properties of shallow karst fissures in an area of karst rocky desertification in SW China. Catena [Internet]. 2019;174:48–58. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816218304776>
35. Naipal V, Ciais P, Wang Y, Lauerwald R, Guenet B, Oost KV. Global soil organic carbon removal by water erosion under climate change and land use change during AD 1850–2005. Biogeosciences [Internet]. 2018;15(14):4459–80. Available from:
<https://bg.copernicus.org/articles/15/4459/2018/>
36. González JF, Cabrera JS, Vega MB, Sobrinho NA, García AC, Díaz JF. Effects of climate change on soils of cattle regions from the southern karst plain Habana-

- Matanzas, Cuba. Cuban Journal of Agricultural Science [Internet]. 2017;51(1). Available from: <file:///C:/Users/Casa/AppData/Local/Temp/694-1468-1-SM.pdf>
37. Anache JA, Wendland EC, Oliveira PT, Flanagan DC, Nearing MA. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. *Catena* [Internet]. 2017;152:29–39. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816217300036>
38. Merchán Elena D, Luquin Oroz EA, Hernández García I, Campo-Bescós M, Giménez Díaz R, Casalí Sarasibar J, et al. Dissolved solids and suspended sediment dynamics from five small agricultural watersheds in Navarre, Spain: a 10-year study. *Catena* [Internet]. 2019;173:114-130. Available from: <https://academic.e.unavarra.es/handle/2454/31308>
39. DENG Y, Dong XIA, CAI C, DING S. Effects of land uses on soil physic-chemical properties and erodibility in collapsing-gully alluvial fan of Anxi County, China. *Journal of integrative agriculture* [Internet]. 2016;15(8):1863–73. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095311915612230>
40. Karampaglidis T, Benito-Calvo A, Rodés A, Braucher R, Pérez-González A, Pares J, et al. Pliocene endorheic-exhoreic drainage transition of the Cenozoic Madrid Basin (Central Spain). *Global and Planetary Change* [Internet]. 2020;194:103295. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921818120301867>
41. Febles González JM. Agro-environmental management and protection of Cuban Soils. *La Protección del Medio Ambiente". Manejo y Protección Ambiental* [Internet]. 2016;1(1):29–42. Available from: https://www.researchgate.net/publication/327164133_AGRO_-_ENVIRONMENTAL_MANAGEMENT_AND_PROTECTION_OF_CUBAN_SOILS
42. Morais F, Soriano MA. Análisis morfológico de dolinas y parámetros geofísicos aplicados al estudio de los flujos de agua subterránea en la Cuenca del Ebro, Zaragoza, España. *Geociências (São Paulo)* [Internet]. 2017;36(2):221–32. Available from: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/11603>
43. Magaz, A.R, Díaz, J.L, Portela, A, Rodríguez, J. Present main problems about cuban geomorphology and its importance in national economy. *Ciencias de la Tierra y del Espacio* [Internet]. 1989; Available from: <http://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/3384/1/Principales%20problema>

- s%20actuales%20geomorfolog%C3%ADa%20de%20Cuba%20y%20su%20importancia%20en%20econom%C3%ADa%20nacional.pdf
44. Margiotta S, Negri S, Parise M, Quarta TAM. Karst geosites at risk of collapse: the sinkholes at Nociglia (Apulia, SE Italy). *Environmental Earth Sciences* [Internet]. 2016;75(1):1–10. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-015-4848-y>
 45. Sosa D, Peña B, Escobar A. Evaluación de los hidrocarburos aromáticos policíclicos en granjas pecuarias y su relación con la inocuidad en pasto y leche. *Cuban Journal of agricultural Science* [Internet]. 2018;52(3):283–95. Available from: <https://scholar.google.es/scholar?>
 46. Sosa D, Hilber I, Faure R, Bartolomé N, Fonseca O, Keller A, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in urban and semi-urban soils of Havana, Cuba. *Journal of soils and sediments* [Internet]. 2019;19(3):1328–41. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11368-018-2137-6>
 47. Soil Survey Staff. *Keys to Soil Taxonomy* [Internet]. Twelfth Edition. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service; 2014. Available from: file:///C:/Users/Casa/AppData/Local/Temp/2014_Keys_to_Soil_Taxonomy.pdf
 48. Kevei IB. Vulnerability and auto-restoration capacities of karst geoeosystems. *Zeitschrift für Geomorphologie* [Internet]. 2016;60(2):235–55. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Barany-Ilona/publication/307855712_zgfbarany/links/57ced5ae08ae057987abffc6/zgfbarany.pdf
 49. Herrera Sorzano A. *Mayabeque: atlas agrícola de una provincia cubana* [Internet]. 1st ed. Editorial UH; 2019 [cited 18/08/2021]. Available from: <https://isbn.cloud/9789597251262/mayabeque-atlas-agricola-de-una-provincia-cubana/>
 50. Parise M, Mazzei M. Peculiarity and vulnerability of karst settings, analyzed through a review of available environmental indices. In: *Geophysical Research Abstracts* [Internet]. 2016. Available from: https://www.researchgate.net/profile/M-Parise/publication/292977133_On_the_implementation_of_environmental_indices_in_karst/links/5c5bd64d299bf1d14cb1a2e0/On-the-implementation-of-environmental-indices-in-karst.pdf

51. Crowther TW, Van den Hoogen J, Wan J, Mayes MA, Keiser AD, Mo L, et al. The global soil community and its influence on biogeochemistry. *Science* [Internet]. 2019;365(6455). Available from: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1559650>
52. Fragoso-Servón P, Bautista F, Frausto O, Pereira A. Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1: 50,000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas* [Internet]. 2014;31(1):127–37. Available from: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742014000100010&script=sci_abstract&tlng=pt
53. Manco D. DESARROLLO HISTÓRICO GEOESPELEOLÓGICO EN EL TERRITORIO COLOMBIANO. In: III Simposio de exploradores [Internet]. 2021 [cited 21/08/2021]. p. 615–30. Available from: <https://eresearch.areandina.edu.co/discover/display/n71378>
54. Maura Santiago AV, Febles González JM. Una aproximación a los costos ambientales en los suelos ferralíticos rojos para el logro de la sostenibilidad. *Cofin Habana* [Internet]. 2018;12(1):192–208. Available from: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2073-60612018000100013
55. de Alba Alonso S, Alcázar M, Cermeño F, Barbero F. Erosión y manejo de suelo. Importancia del laboreo ante los procesos erosivos naturales y antrópicos. *Agricultura ecológica en secano, soluciones sostenibles en ambientes mediterráneos*. Madrid (España): Universidad Complutense de Madrid [Internet]. 2011;13–38. Available from: https://digital.csic.es/bitstream/10261/60833/1/Capitulo13_38.pdf