

FACTORES NATURALES Y ANTRÓPICOS QUE INFLUYEN EN LA DISTRIBUCIÓN DE CARBONATOS PEDOGÉNICOS EN LA PENÍNSULA DE SANTA ELENA, ECUADOR

NATURAL AND ANTHROPIC FACTORS THAT INFLUENCE THE DISTRIBUTION OF PEDOGENIC CARBONATES IN THE SANTA ELENA PENINSULA, ECUADOR

Daniel Ponce de León ^{1*}

¹ Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Estatal Península de Santa Elena. La Libertad, Santa Elena. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7798-1551>. Correo: dponcel@upse.edu.ec

Idalberto Macías Socarrás ²

² Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Estatal Península de Santa Elena. La Libertad, Santa Elena. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3512-7098>. Correo: imacias@upse.edu.ec

Elena Del Rocío Cortéz Pozo ³

³ Estudiante Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Estatal Península de Santa Elena. La Libertad, Santa Elena. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6556-9550>. Correo: elenacortez2@outlook.com

Yoansy García Ortega ⁴

⁴ Instituto de Investigación Ing. Jacobo Bucaram Ortiz, Ph.D. Universidad Agraria del Ecuador. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2839-3956>. Correo: yogarcia@uagraria.edu.ec

* Autor para correspondencia: dponcel@upse.edu.ec

Resumen

Se evaluó la influencia del uso del suelo en el contenido y la distribución de carbonatos edáficos en sitios representativos de tres cuencas en la península de Santa Elena. Se realizaron dos muestreos: uno en la superficie, a una profundidad de 0-30 cm (Río Verde: 100 puntos; El Chaparral: 50 puntos; PIDAASSE: 100 puntos, Manglaralto: 50 puntos), y otro en profundidad (0-10, 10-20, 20-40, 40-60 y 60-100 cm) en sitios conservados bajo bosque seco tropical. Se empleó el método del calcímetro de Bernard para determinar el carbonato de calcio equivalente (CCE). Se concluye que los suelos en los sitios investigados de las diferentes cuencas son ligeramente calcáreos y presentan bajos niveles de carbonatos totales, por lo que no constituyen un problema potencial para los cultivos en la actualidad. La distribución de los carbonatos en profundidad en

suelos con influencia aluvial, puede responder a la dinámica sedimentológica asociada a períodos lluviosos y eventos extremos cíclicos, se evidenció la influencia del uso del suelo en los contenidos de CCE, se hallaron diferencias estadísticas significativas para los suelos con menor intervención antrópica en los sitios con diferentes gradientes de humedad, sin embargo, no se encontraron diferencias entre los sitios con las condiciones climáticas más contrastantes, Manglaralto (subhúmeda) y Zapotal (árida), bajo usos agrícolas de cultivos de ciclo corto e intermedio, atribuibles a la influencia de las prácticas agrícolas. Estos resultados pueden considerarse un indicio del avance de la desertificación en las regiones de las más húmedas del norte peninsular.

Palabras clave: Carbonato de calcio equivalente; uso de tierra; bosque seco tropical

Abstract

The influence of land use on the content and distribution of soil carbonates was assessed in representative sites from three basins on the Santa Elena Peninsula. Two samplings were conducted: one at the surface, at a depth of 0-30 cm (Río Verde: 100 points; El Chaparral: 50 points; PIDAASSE: 100 points; Manglaralto: 50 points), and another at depth (0-10, 10-20, 20-40, 40-60, and 60-100 cm) in areas preserved under tropical dry forest. The Bernard calcimeter method was employed to determine equivalent calcium carbonate (ECC). It is concluded that soils in the investigated sites from different basins are slightly calcareous and exhibit low levels of total carbonates, thus not posing a potential problem for crops at present. The depth-wise distribution of carbonates in soils with alluvial influence may respond to sedimentological dynamics associated with rainy periods and cyclic extreme events. The influence of land use on ECC contents was evident, with statistically significant differences found for soils with lower anthropogenic intervention in sites with varying humidity gradients. However, no differences were observed between sites with the most contrasting climatic conditions, Manglaralto (sub-humid) and Zapotal (arid), under agricultural uses for short and intermediate crop cycles, attributable to the influence of agricultural practices. These results may be indicative of advancing desertification in the more humid regions of the northern peninsula.

Keywords: Equivalent calcium carbonate; land use; tropical dry forest

Fecha de recibido: 06/09/2023

Fecha de aceptado: 13/11/2023

Fecha de publicado: 01/12/2023

Introducción

El carbono en el suelo se presenta tanto en forma orgánica (COS) como inorgánica (CIS). Los suelos pueden actuar como sumideros de carbono, su capacidad de almacenamiento, según Friedlingstein *et al.* (2022), es de 1220 - 1700 Pg en los primeros 100 cm supera el contenido en toda la vegetación de la tierra (450 Pg) y de la atmósfera (875 Pg). Esta capacidad determina que los suelos desempeñen un importante papel en el

aumento o reducción de las emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero que se asocian al cambio climático global (Mesías *et al.*, 2018).

Los carbonatos en los suelos tienen tres vías de formación: i. geogénica como los residuos del material parental, ii. biogénica, y iii. edafogénica, como resultado de la neoformación (carbonatos secundarios), su dinámica responde a un proceso relacionado con el ciclo biogeoquímico del carbono (C) y el ciclo del calcio (Ca), los iones de bicarbonatos se transfieren en el perfil del suelo mediante la acción del agua, al estar disueltos en ella y desplazarse por el espacio poroso del suelo. Su formación está controlada por el clima, principalmente la lluvia y la temperatura (Lal *et al.*, 1999).

En los suelos pueden estar presentes dos componentes, el carbonato litogénico (CL) primario, procedente de rocas calcáreas y sedimentos ricos en carbonatos, y el carbonato pedogénico (CP) que se deriva de estas (Khalidy *et al.*, 2022; Sharififar *et al.*, 2023). El proceso implica la disolución – precipitación del CL y la solvatación del $\text{CO}_2(\text{g})$ en la solución del suelo como carbonato (CO_3^{2-}) o bicarbonato (HCO_3^-) que precipitan en presencia de cationes alcalinotérreos, principalmente Ca^{2+} y Mg^{2+} (Khalidy *et al.*, 2022; Monger, 2014).

Los carbonatos pedogénicos y otros caracteres como la acumulación de yeso y sales, pueden considerarse relictos edáficos formados en períodos de climas incluso más secos que el actual. Evidencias paleobotánicas de registros de polen alto andino (~28,000-16,000 años B.P.) indican un “... extendido período glacial prolongado, seco y fresco...” (Heusser & Shackleton, 1994) para la región del pacífico ecuatoriano.

El aumento de la humedad en el cambio holocénico permitió el desarrollo de la agricultura primigenia en América (Piperno & Pearsall, 1998) y su expansión desde el territorio de la península de Santa Elena (Stoother *et al.*, 2003). En la actualidad la región costera de la península de Santa Elena transita por un marcado proceso de desertificación debido a la degradación antrópica de sus bosques, con una disminución notable de la lluvia y el efecto de los eventos extremos, remarcando la aridez (Ayerza, 2019).

La función de los suelos como sumidero de carbono se relaciona fundamentalmente con el carbono orgánico. Se ha presentado evidencia de que el carbonato pedogénico puede tener muy poca importancia como sumidero para el ciclo del carbono a corto plazo, debido a la lenta cinética de los procesos implicados (Liu, 2011), a excepción de las zonas áridas (Sharififar *et al.*, 2023; Zamanian *et al.*, 2016).

La formación de carbonatos pedogénicos se ve afectada por una serie de factores climáticos y geológicos, como son la precipitación y la evaporación que determinan el régimen hídrico. Una baja precipitación y alta evaporación típicas de las condiciones áridas son propicias para la acumulación de carbonato sólido en lugar de su migración hacia el manto freático (Monger, 2014). Por otra parte se ha evidenciado la influencia del uso de la tierra puede afectar el ciclo del CP en los suelos (Leogrande *et al.*, 2021).

El contenido y distribución de carbonatos en el suelo son factores que influyen en sus propiedades físicas, químicas y biológicas y tienen efectos significativos en el pH, los procesos de sorción-desorción, precipitación-disolución y cementación de los suelos.

La reactividad y carácter alcalino de los carbonatos permiten que actúen como un buffer de pH en el suelo, y su superficie activa adsorber nutrientes esenciales para las plantas y modificar la biodisponibilidad de metales pesados de impacto ambiental, además, pueden formar láminas que afectan el movimiento del agua al cementarse (Lal *et al.*, 1999).

En la agricultura desarrollada en zonas áridas, semi-áridas y/o subhúmedas, la presencia de carbonatos en los suelos se relaciona directamente con una menor biodisponibilidad para las plantas de algunos nutrientes, tales como Zn (Moreno-Lora & Delgado, 2020), Fe (Rogovska *et al.*, 2007), fósforo y otros, con intervención de otros factores, lo que causa una disminución de los rendimientos de los cultivos, se limita la respuesta a la fertilización, y puede llegar a impedir el desarrollo de ciertas especies de interés agrario.

Se estima que un 47% de la superficie terrestre corresponde a tierras áridas o semiáridas (Koutroulis, 2019), donde es frecuente la acumulación de carbonatos edáficos secundarios y otras sales, como resultado de la escasa precipitación y la elevada evapotranspiración del agua, territorios ecológicamente frágiles con tendencia a la desertificación debido a la presión ejercida sobre sus recursos (Mazuela, 2013).

De acuerdo con el mapa geopedológico del cantón Santa Elena (González *et al.*, 2012) la presencia de carbonatos no se considera una limitante importante dados sus contenidos generalmente inferiores al 5% en el horizonte de cultivo, sin embargo, no se conoce cómo los diferentes usos de la tierra pueden haber influido en ellos, ni su distribución vertical, aspectos que deben tenerse en cuenta para un adecuada planificación y manejo, así como para su consideración en los balances de carbono.

En esta investigación se caracteriza la distribución de los carbonatos pedogénicos (CP) como carbonato de calcio equivalente (CCE g kg^{-1}) con la profundidad del perfil, y se evalúa la influencia del uso de la tierra en los contenidos y distribución de carbonatos edáficos en sitios representativos en tres cuencas de la península de Santa Elena, con un gradiente de régimen de humedad del suelo de arídico a ústico.

Materiales y métodos

La ubicación de las áreas de estudio se muestra en la Figura 1. Las cuencas de los ríos Zapotal (100385 ha), Javita (80371 ha) y Manglaralto (13211 ha), están localizadas en la región litoral del Pacífico ecuatorial en la provincia de Santa Elena, Ecuador. Se distinguen dos tipos de climas de acuerdo con Köppen, Estepario Cálido y Seco (BSh) asociado a un régimen de humedad del suelo arídico (cuenca Zapotal, sitio Río Verde) y Tropical Lluvioso de Sabana (Aw), régimen de humedad del suelo ústico (cuenca Manglaralto), en ambos casos con régimen de lluvias tropical, megatérmico y períodos lluviosos cíclicos intensos relacionados a fenómenos del niño (ENSO) y sus variaciones en frecuencia y características (Yeh *et al.*, 2009). La cuenca Javita ocupa un lugar intermedio.

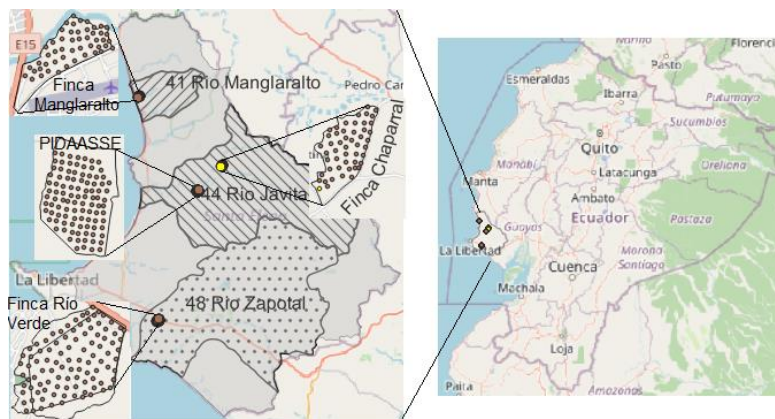


Figura 1. Ubicación de las áreas de estudio y localización de los sitios de muestreo en las cuencas Zapotal, Javita y Manglaralto en la Península de Santa Elena, Ecuador.

El área de estudio de interés agrícola es poco accidentada con elevaciones relativamente bajas, la zona de mayor actividad se sitúa principalmente en la microrregión seca y depende totalmente del riego, orientado a que el método de aplicación sea por goteo y los cultivos sean de preferencia de ciclo corto y transitorio (Andrade & Ortiz, 2020).

En la península, predominan dos órdenes de suelos (Soil Survey Staff, 2014), Aridisoles bajo régimen de humedad arídico e Inceptisoles en regímenes de humedad ústico, seguidos en extensión por los Entisoles, principalmente fluventics. Suelos formados a partir de materiales de origen redepositados. Otros órdenes en el área cartografiada de la cuenca son Vertisol, Alfisol y Mollisol, este último aparece en menor cuantía (González *et al.*, 2012).

Esquema de muestreo

En cada cuenca se realizaron dos muestreos aleatorios estratificados (Tabla 1): i. Muestreo por intervalos de profundidades (0-10, 10-20, 20-40, 40-60 y 60-100 cm) en bosques secos en vías de regeneración, sin intervención por más de 30 años y vegetación conservada de las zonas Río Verde, San Marcos, Clementina y Manglaralto, con el fin de estudiar la distribución vertical de los carbonatos edáficos; ii. Superficial (0-30 cm), con distancias mínimas aproximadas de 50 m entre observaciones, en fincas dedicadas a cultivos de ciclo corto (Finca Río Verde, 100 puntos; PIDAASSE¹, 100 puntos; Finca “El Chaparral”, 50 puntos y Finca Manglaralto, 50 puntos) con el fin de estudiar la influencia del uso y suelos.

La toma de muestra se realizó mediante un kit de barrenas Eijkelkamp, en el primer caso se tomaron muestras inalteradas con cilindros de 53 mm de diámetro, tres cilindros por profundidad en un radio de un metro, se determina la densidad del suelo y otras variables como porcentaje de arcilla y arena, y el carbono orgánico del suelo (COS, datos no mostrados). Para el muestreo superficial se empleó una barrena tipo Edelman.

¹ Proyecto Integral de Desarrollo Agrícola, Ambiental y Social de forma Sostenible del Ecuador.

Tabla 1. Puntos de muestreo superficial y en profundidad por cuenca, subgrupos de suelos, localidad y finca.

Cuenca	Localidad	Clave	SGT	No. perfiles	No. obs (0-30) cm	Finca
Zapotl	Río Verde	GEFJ	Arenic Haplargids	5	91	Río Verde
Zapotl	Río Verde	GGCS	Fluventic Haplocambids	5	9	Río Verde
Zapotl	Río Verde	GGCW	Typic Haplocambids	5	0	-
Javita	San Marcos	GGCV	Ustic Haplocambids	10	67	PIDAASSE
Javita	San Marcos	LDDG	Aridic Ustifluvents	0	33	PIDAASSE
Javita	Clementina	KDEO	Fluventic Haplustepts	10	50	El Chaparral
Manglaralto	Manglaralto	KFEP	Fluventic Eutrudepts	10	50	Manglaralto

SGT – Subgrupo Taxonómico; No. Perfiles – número de puntos a profundidades 0-10, 10-20, 20-40, 40-60 y 60-100 cm; No. obs 0-30. – número de observaciones de 0 a 30 cm de profundidad.

Los diferentes usos de la tierra se agruparon en clases más generales de uso según: Pecuario (pasto cultivado, pastoreo y potrero); Perennes (papaya, maracuyá, cacao, palma, limón, café, neem, mango, moringa, coco); Ciclo intermedio (banano, yuca y caña de azúcar); Ciclo corto (zapallo, sandía, maíz, cebolla, ají, pimienta y otros); Transición (maleza) y Bosques con diferentes grados de intervención.

Determinación de los carbonatos edáficos

Se determinó el carbonato de calcio equivalente (CCE), en muestras de suelos secas al aire y tamizadas a 2 mm, por el procedimiento operativo estándar (FAO, 2021), para ello se empleó un calcímetro de Bernard (*Calcimeter - Laboratory equipment. Eijkelkamp*, 2018). Debido a las características de los materiales de origen de los suelos y la ausencia de fragmentos carbonatados, se asume una baja presencia de carbonatos litogénicos (CL) en el rango de profundidad investigada (1 m).

Análisis estadísticos

Toda la manipulación de datos y el procesamiento estadístico se llevó a cabo en RStudio 2023.06.1+524. Los datos se separaron en dos grupos para su análisis, para lo que se fijó como valor umbral 50 g kg⁻¹ (5%) de CCE, que se considera el límite moderado de tolerancia para cultivos comerciales, confirmado por el análisis exploratorio estadístico descriptivo y la determinación de valores fuera de rango (*outliers*) mediante el filtro de Hampel, valores que se encuentran fuera del intervalo formado por la mediana más o menos 3 veces la desviación absoluta mediana MAD (Pearson *et al.*, 2016).

El grado de asociación, así como la significación estadística de los coeficientes de correlación entre los valores de CCE y el porcentaje de arcilla y arena, se determinaron mediante una correlación de rangos de Spearman Rho (función cor.test) para el análisis de la distribución vertical de los carbonatos pedogénicos.

Para la comparación entre los diferentes grupos de observaciones, según orden de suelo y uso de la tierra, se empleó una prueba de rangos de Kruskal – Wallis, (kruskal-test; Kassambara, 2021), al no cumplirse supuestos sobre la varianza y la normalidad de los datos, y como prueba *post-hoc* se empleó el método de Dunn-Bonferroni (Dinno, 2015), para determinar qué grupos difieren entre sí, al ser una prueba más robusta ante las diferencias en el tamaño de la muestra.

Todo el geoprocésamiento relacionado a la selección de sitios y puntos de muestreo y la generación de mapas se realizó en QGIS versión 3.22.9-Białowieża.

Resultados y discusión

Distribución vertical de los carbonatos edáficos en el perfil de suelo

El régimen de precipitación-disolución-precipitación determina la cantidad de carbonatos pedogénicos y su distribución en el perfil del suelo (Wang *et al.*, 2010). La Figura 2 muestra la distribución de carbonato de calcio equivalente (CCE g kg^{-1}) para los suelos en estudio, representativos de las cuencas Zapotal, Javita y Manglaralto en sitios bajo bosque seco tropical regenerado.

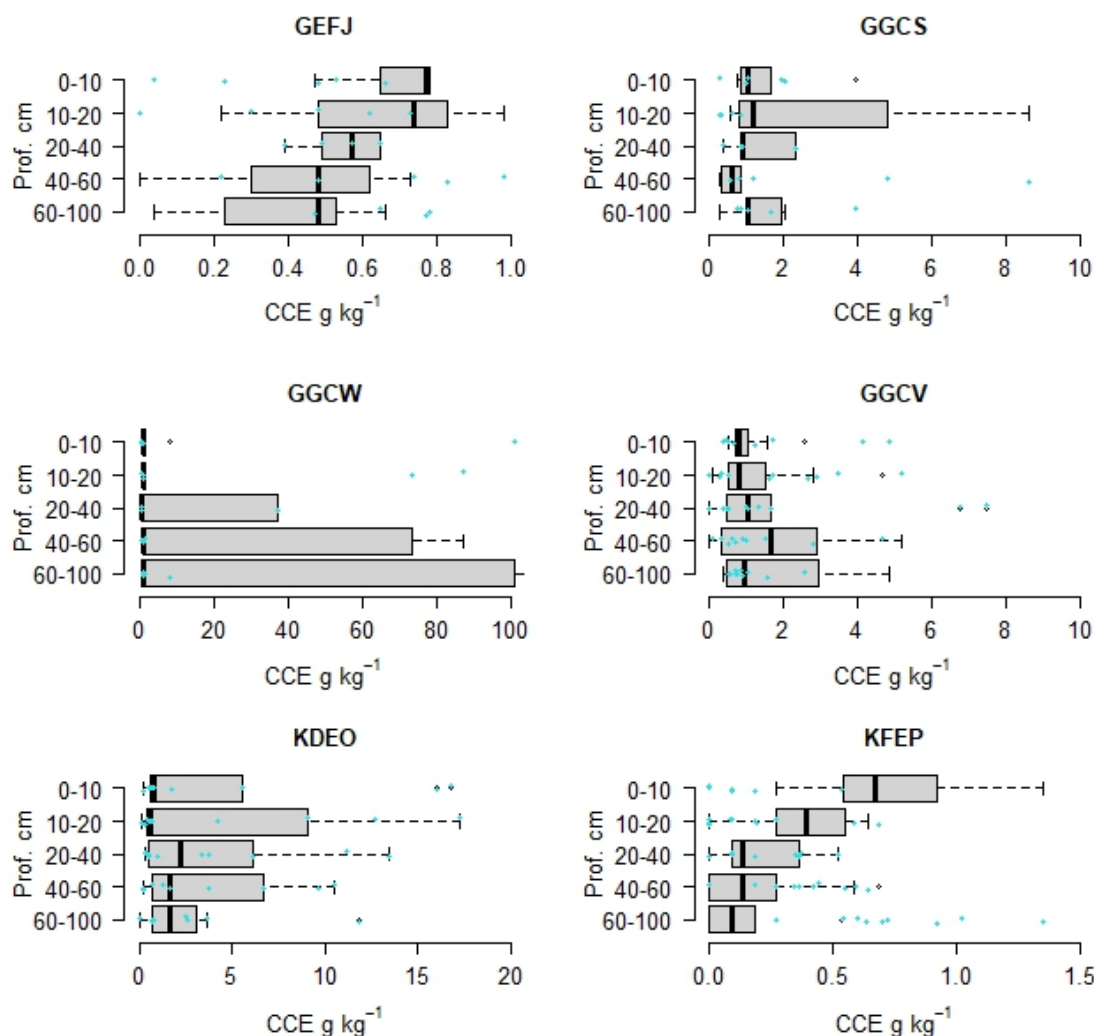


Figura 2. Distribución de carbonatos de calcio equivalente (CCE g kg^{-1}) con la profundidad por subgrupo de suelo. Análisis realizados en muestras inalteradas con tres observaciones por intervalos de profundidad “Prof.” (0-10, 10-20, 20-40, 40-60 y 60-100 cm) y puntos de muestreo (GEFJ, Arenic Haplargids, 5; GGCS, Fluventic Haplocambids, 5; GGCW, Typic Haplocambids, 5; GGCV, Ustic Haplocambids, 10; KDEO, Fluventic Haplustepts, 10; KFEP, Fluventic Eutrupepts, 10).

No se observa un patrón en cuanto a la profundidad de acumulación de los carbonatos en el perfil excepto para los Fluventic Eutrudepts (cuenca Manglaralto), y en general se aprecia una alta variabilidad entre suelos y perfiles dentro de cada grupo y región hasta la profundidad investigada, esto puede deberse a la dinámica de erosión – sedimentación de las áreas estudiadas, con eventos de períodos de alta intensidad pluviométrica asociada a fenómenos ENOS (Ayerza, 2019) y otros factores locales como el uso de la tierra.

Un aspecto por considerar es la textura, la presencia de minerales arcillosos en el suelo puede favorecer la formación y acumulación de carbonato pedogénico. Estos minerales retienen agua que ha migrado al subsuelo, lo que facilita la precipitación de los carbonatos, mientras que la presencia de partículas de grava y arena en el suelo puede afectar el régimen hídrico y su dinámica al migrar y acumularse donde disminuya la permeabilidad (Khalidy *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2020).

Al realizar una correlación de rangos Spearman se obtienen en general bajos coeficientes rho entre la CCE y los porcentajes de arena y arcilla en la mayoría de los suelos, lo que indica un bajo grado de asociación entre la acumulación de carbonatos y la distribución de partículas. Deben destacarse las correlaciones negativas significativas con el porcentaje de arcilla (Tabla 2) para los suelos Fluventic Haplustepts (KDEO), Fluventic Eutrudepts (KFEP) y Arenic Haplargids (GEFJ), de mayor influencia aluvial, ello evidencia que la distribución de carbonatos en el perfil a profundidades menores de un metro puede relacionarse a diferentes eventos locales de transporte y deposición de materiales edáficos, relacionados comúnmente con inundaciones periódicas y eventos climáticos extremos en años “El Niño”.

Tabla 2. Correlación de rangos de Spearman entre el carbonato de calcio equivalente (CCE g kg⁻¹) y porcentajes de arcilla y arena por subgrupo de suelo hasta 60 cm de profundidad (0-10, 10-20, 20-40, 40-60 cm). Se muestran los coeficientes Rho/p-valor para las correlaciones significativas a un nivel de significancia de 0.05.

SGT	Rho/p-valor		n
	CCE-Arena	CCE-Arcilla	
GEFJ		-0,632/0,003	20
KDEO		-0,402/0,014	39
KFEP	0,442/0,004	-0,455/0,003	40
SGT – Subgrupo Taxonómico; n – número de observaciones			

Influencia del tipo de suelos y uso de la tierra

Al ser la presencia de carbonatos en la zona de labor de los suelos un problema potencial para el desarrollo de los cultivos, la investigación se realiza a partir de un muestreo del horizonte superficial de cultivo (0-30 cm) en fincas localizadas en las tres cuencas de interés, representativas en cuanto a tipos de suelos y usos de la tierra.

De la aplicación del filtro de Hampel (Pearson *et al.*, 2016), para separar las observaciones consideradas extremas con relación a las muestras en general, resultó el límite de 5 % que se considera como umbral de tolerancia moderada para la mayoría de los cultivos (Figura 3).

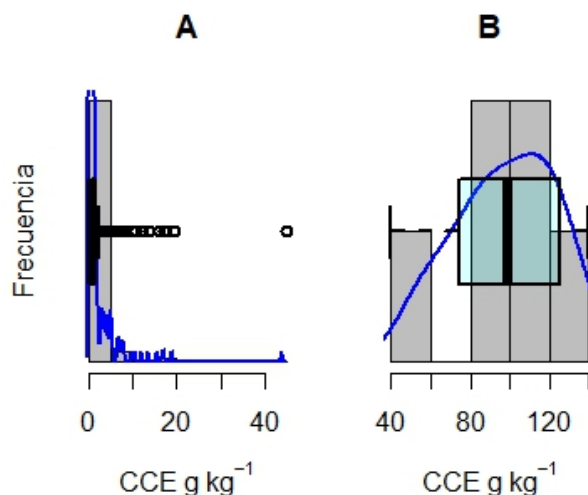


Figura 3. Histograma y diagrama de caja de las observaciones. A. Valores de CCE menores o iguales al 5 % ($\leq 50 \text{ g kg}^{-1}$); B. Valores de CCE mayores de 5 % ($> 50 \text{ g kg}^{-1}$).

En los primeros 30 cm los valores de CCE son bajos (menores del 15 %) y no representan un problema para los cultivos, característica ya observada en el mapa geopedológico de la Península (IEE & MAGAP-SINAGAP, 2012).

Los valores más altos encontrados (Figura 3B) se localizan en la finca Manglaralto de la referida cuenca, ubicada en el tercio inferior del río, específicamente en una zona de uso pecuario sobre el suelo Fluventic Eutrudepts (KFEP), posiblemente asociados a sedimentos fluviales recientes y limitaciones en la permeabilidad que limitan su lavado (Leogrande *et al.*, 2021; Tan *et al.*, 2014), debido a la compactación producida por el uso pecuario.

Modelaciones hidrológicas de la cuenca indican un riesgo de inundación para la parte media y baja de la cuenca, con pendientes menores de 5 % (Catuto Quinde, 2020). De lo anterior se infiere que las áreas aledañas del tercio inferior del río es una zona activa de recepción de sedimentos.

Resúmenes estadísticos de los valores de $\text{CCE} \leq 50 \text{ g kg}^{-1}$ se muestran en la Tabla 3. Los valores mínimos son mayoritariamente 0, mientras que los máximos se asocian a Manglaralto para el suelo KFEP ya discutido, bajo uso pecuario y sin uso (maleza), y el sitio Chaparral en la cuenca Javita, asociada a suelos Fluventic Haplustepts (KDEO), bajo usos de cultivos de ciclo corto y pecuario.

Tabla 3. Resumen estadístico de los valores observados de $\text{CCE} \leq 50 \text{ g kg}^{-1}$ agrupados por sitio, subgrupo de suelo y uso de la tierra.

	m	s	IQR	mín	Q1	med	Q3	máx	n
Sitio									
Finca El Chaparral	4,13	4,68	4,62	0,00	0,51	3,09	5,13	18,89	50
Finca Manglaralto	2,21	6,93	1,43	0,00	0,08	0,43	1,51	43,93	45
PIDAASSE	1,02	1,17	0,61	0,00	0,52	0,77	1,13	7,7	100
Finca Rio Verde	0,57	0,72	0,33	0,00	0,31	0,48	0,63	4,78	99

Subgrupo taxonómico									
KDEO	3,84	4,52	4,57	0,00	0,44	2,53	5,01	18,89	56
KFEP	2,33	7,42	1,25	0,00	0,08	0,41	1,33	43,93	39
GGCV	1,04	1,35	0,72	0,00	0,43	0,76	1,15	7,7	67
LDDG	1,00	0,71	0,52	0,17	0,60	0,82	1,12	3,6	33
GEFJ	0,58	0,75	0,32	0,00	0,31	0,48	0,63	4,78	90
GGCS	0,43	0,40	0,61	0,00	0,00	0,41	0,61	1,1	9
Uso									
Perennes	1,02	1,23	0,78	0,00	0,41	0,62	1,18	7,7	96
Ciclo intermedio	1,24	1,70	0,96	0,00	0,31	0,68	1,27	5,15	8
Ciclo corto	1,54	2,42	0,75	0,00	0,52	0,77	1,27	15,49	57
Bosque	4,55	2,03	2,64	1,53	3,58	4,42	6,22	6,85	6
Pecuario	3,21	4,56	3,90	0,00	0,13	1,26	4,03	18,89	27
Maleza	1,03	4,53	0,46	0,00	0,17	0,41	0,62	43,93	96
Transición	14,08	3,37	5,30	10,48	11,56	14,35	16,86	17,13	4

m – media; s – desviación estándar; IQR – distancia Inter cuartil; mín – mínimo; q1 – primer cuartil; med – mediana; q3 – tercer cuartil; máx. – máximo; n – número de observaciones.

Se realizó una prueba Kruskal-Wallis para comparar las medianas entre varios grupos. El estadístico de la prueba Chi-cuadrado fue 45.324, con un valor $p < 0.001$. Para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, se rechaza la hipótesis nula, indicando diferencias estadísticamente significativas entre al menos dos de los grupos de las observaciones de contenido de carbonato de calcio equivalente (CCE) menores que 50 g kg^{-1} , pertenecientes al horizonte superficial hasta 30 cm de profundidad.

El análisis *post-hoc* (Tabla 4) revela que las diferencias se centran en los subgrupos de suelos de la cuenca Javita en relación con las restantes Zapotal y Manglaralto. No se encontraron diferencias entre el sitio de la cuenca de Manglaralto, que se caracteriza por ser la de mayor humedad, con el sitio de la cuenca Zapotal (Río Verde), este último de marcadas características de aridez, diferente a lo que podría esperarse en concordancia con las características climáticas de las cuencas.

Tabla 4. Resultados de la prueba post-hoc para grupos de suelos y usos obtenidos por el método de Dunn-Bonferroni tras la prueba de rangos Kruskal-Wallis. Se muestran los estadísticos Chi-cuadrado/p-valor de los grupos con significancia estadística para $\alpha = 0.05$.

	SGT				Usos		
	GEFJ	GGCS	KDEO	KFEP	Bosque	CicloC	Malezas
GGCV	-3,622/ 0,002	-	-	-	Malezas	4,630/ 0,000	4,891/ 0,000
KDEO	-5,392/ 0,000	-3,077/ 0,016	-	-	Pecuario	-	-4,080/ 0,000
KFEP	-	-	4,251/ 0,000	-	Perenne	3,241/ 0,009	-4,043/ 0,000
LDDG	-3,937/ 0,001	-	-	-3,250/ 0,009	-	-	-

Los suelos más representativos de estos sitios son el Arenic Haplargids (GEFJ, sitio Río Verde, cuenca Zapotal) y el Fluventic Eutrudepts (KFEP, sitio Manglaralto, cuenca Manglaralto) que muestran una distribución vertical similar de los carbonatos (Figura 2), y ambos presentan influencia aluvial.

Las prácticas agrícolas predominantes en ambos sitios son los cultivos de ciclo corto y cultivos de ciclo intermedio, no existiendo diferencias estadísticas significativas entre estos usos, ambos se desarrollan bajo regadío que se considera la fuente principal de sales con una importante variación estacional (Lino-Suárez *et al.*, 2019).

De lo anterior se puede inferir que las características intrínsecas de los suelos determinan en parte los contenidos de carbonatos pedogénicos con relación al clima, pero el uso tiende a homogeneizar estas diferencias. Existen evidencias de que los contenidos y distribución de los carbonatos pueden ser alterados en períodos de tiempos cortos por las prácticas agrícolas (López, 2021; Lu *et al.*, 2020; Ovalle *et al.*, 2023), mediante los cambios de uso, el riego y la fertilización (Ortiz *et al.*, 2022).

El cultivo en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas aumenta la concentración parcial de $\text{CO}_2(\text{g})$ debido a la respiración microbiana y el aumento de la densidad de raíces, lo que genera acumulaciones poco profundas de CP (Bughio *et al.*, 2016; Gocke *et al.*, 2012).

Un factor decisivo en este sentido es el regadío, que aporta sales carbonatadas y modela la redistribución, tanto en el perfil como espacialmente, en función de las características de los suelos y el relieve como factor pasivo.

Dada la alta tasa de evaporación y en función del riego, el desplazamiento de los carbonatos puede ocurrir horizontalmente (Bughio *et al.*, 2016). Las características del riego por goteo, principal técnica utilizada, y el riego deficitario (Orrala Borbor *et al.*, 2020) recomendado para el ahorro del recurso hídrico, propiciaría la acumulación superficial.

Ante el reconocido proceso de desertificación que sufre la región (Ayerza, 2019) matizado por una disminución en los promedios de lluvia, los resultados pueden ser un indicio de los cambios que ocurren en el sitio Manglaralto y la cuenca en general, y refuerza la necesidad de tomar medidas para frenar su avance.

Conclusiones

Se confirma que los niveles de carbonatos edáficos no representan un problema para los cultivos de las regiones estudiadas en la actualidad, con valores que varían de 0.0 a 18.89 g kg^{-1} de suelo (mediana 0.89; moda 0.0).

La distribución en profundidad de los carbonatos pedogénicos en los suelos con influencia aluvial de la península de Santa Elena (Fluventic Haplustepts, Fluventic Eutrudepts y Arenic Haplargids) puede estar relacionada a la dinámica de sedimentación pasada y presente, principalmente durante períodos de anomalías pluviométricas e inundaciones relacionadas con eventos ENOS.

Existen diferencias entre los subgrupos taxonómicos en cuanto al contenido de carbonatos pedogénicos (CP) expresados mediante el carbonato de calcio equivalente (CCE g kg^{-1}) para los primeros 30 cm de profundidad, en los usos con menos intervención antrópica, en concordancia con el clima de la cuenca y las características intrínsecas de los suelos.

En suelos bajo uso agrícola, cultivos de ciclo corto e intermedio bajo riego, no se encontraron las diferencias esperadas entre los sitios representativos de las dos cuencas con condiciones climáticas más contrastantes, Manglaralto en su cuenca homónima más húmeda y Río Verde en la cuenca Zapotal con régimen de humedad arídico. Las prácticas agrícolas pueden minimizar estas diferencias, sin embargo, en un contexto de disminución de las lluvias, estos resultados podrían considerarse un indicio del avance en las últimas décadas de la desertificación en el norte de la Península.

Referencias

- Andrade, P. R. V., & Ortiz, C. T. (2020). Agua en territorios comunales: Gestión del riego en el valle del río Javita, provincia de Santa Elena. *Siembra*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.29166/siembra.v7i1.1865>
- Ayerza, R. (2019). Importancia hídrica de los bosques de la cordillera Chongón-Colonche para las tierras áridas del noroeste de Santa Elena. *Bosques Latitud Cero*, 9(1), 16-30.
- Bughio, M. A., Wang, P., Meng, F., Qing, C., Kuzyakov, Y., Wang, X., & Junejo, S. A. (2016). Neoformation of pedogenic carbonates by irrigation and fertilization and their contribution to carbon sequestration in soil. *Geoderma*, 262, 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.003>
- Calcimeter—Laboratory equipment | Eijkelkamp. (2018). <https://en.eijkelkamp.com/products/laboratory-equipment/calcimeter.html>
- Carvalhais, N., Forkel, M., Khomik, M., Bellarby, J., Jung, M., Migliavacca, M., Mu, M., Saatchi, S., Santoro, M., Thurner, M., Weber, U., Ahrens, B., Beer, C., Cescatti, A., Randerson, J. T., & Reichstein, M. (2014). Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems. *Nature*, 514(7521), 213-217. <https://doi.org/10.1038/nature13731>
- Catuto Quinde, M. M. (2020). Modelación hidrológica del río Manglaralto para la generación de mapas de inundación de la parroquia Manglaralto provincia de Santa Elena. [B.S. thesis]. La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2020.
- Dinno, A. (2015). Nonparametric Pairwise Multiple Comparisons in Independent Groups Using Dunn's Test. *The Stata Journal*, 15(1), 292-300.
- FAO. (2021). Procedimiento operativo estándar para el análisis de carbonato de calcio equivalente en suelo—Método del calcímetro volumétrico. GLOSOLAN SOP Tech. W.G. <https://www.fao.org/3/ca8620es/ca8620es.pdf>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., Zheng, B. (2022). Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11), 4811-4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
- Gocke, M., Pustovoytov, K., & Kuzyakov, Y. (2012). Pedogenic carbonate formation: Recrystallization versus migration—Process rates and periods assessed by ¹⁴C labeling. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(1). <https://doi.org/10.1029/2010GB003871>

- González, A., Coloma, J., Sevillano, G., Rodríguez, A., Lasso, L., Cruz, G., Sánchez, D., Ayala, O., Haro, R., Valverde, O., Yerovi, F., Morales, A., Collaguazo, J., Cazar, C., Chasipanta, D., Báez, C., Yépez, R., Merlo, J., Moncayo, P., ... Tapia, G. (2012). Memoria técnica cantón Santa Elena. Proyecto: “Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional, escala 1: 25000” (Geopedología, p. 282). Instituto Espacial Ecuatoriano, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. https://www.geoportaligm.gob.ec/geodescargas/santa_elena/mt_santa_elena_geopedologia.pdf
- Heusser, L. E., & Shackleton, N. J. (1994). Tropical Climatic Variation on the Pacific Slopes of the Ecuadorian Andes Based on a 25,000-Year Pollen Record from Deep-Sea Sediment Core Tri 163-31B. *Quaternary Research*, 42(2), 222-225. <https://doi.org/10.1006/qres.1994.1072>
- IEE, & MAGAP-SINAGAP. (2012). Geopedología. Memoria técnica cantón Santa Elena. Proyecto: “Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional, escala 1: 25 000” (p. 282) [Memoria técnica]. Instituto Espacial Ecuatoriano. https://www.geoportaligm.gob.ec/geodescargas/santa_elena/mt_santa_elena_geopedologia.pdf
- Kassambara, A. (2021). rstatix: Pipe-Friendly Framework for Basic Statistical Tests. <https://CRAN.R-project.org/package=rstatix>
- Khalidy, R., Arnaud, E., & Santos, R. M. (2022). Natural and Human-Induced Factors on the Accumulation and Migration of Pedogenic Carbonate in Soil: A Review. *Land*, 11(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/land11091448>
- Koutroulis, A. G. (2019). Dryland changes under different levels of global warming. *The Science of the Total Environment*, 655, 482-511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.215>
- Lal, R., Kimble, J. M., Stewart, B. A., & Eswaran, H. (1999). Global climate change and pedogenic carbonates. Lewis Publishers, Boca Raton, FL (United States). <https://www.osti.gov/biblio/691460>
- Leogrande, R., Vitti, C., Castellini, M., Mastrangelo, M., Pedrero, F., Vivaldi, G. A., & Stellacci, A. M. (2021). Comparison of Two Methods for Total Inorganic Carbon Estimation in Three Soil Types in Mediterranean Area. *Land*, 10(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/land10040409>
- Li, Y., Fu, C., Zeng, L., Zhou, Q., Zhang, H., Tu, C., Wei, J., Li, L., & Luo, Y. (2020). Carbon accumulation in the red clay layer of the subsoil in a major river delta: Contribution of secondary carbonate. *CATENA*, 186, 104391. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104391>
- Lino-Suárez, J. L., Balmaseda-Espinosa, C. E., & Ponce de León, D. P. de. (2019). Comportamiento espacial y temporal de la salinidad de suelos del Centro de Apoyo Manglaralto UPSE. *Killkana Técnica*, 3(3), Article 3. https://doi.org/10.26871/killkana_tecnica.v3i3.571
- Liu, Z. (2011). Is pedogenic carbonate an important atmospheric CO₂ sink? *Chinese Science Bulletin*, 56(35), 3794-3796. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-4288-8>
- López, R. E. O. (2021). Influencia de las prácticas agrícolas en la dinámica de los carbonatos en los suelos.

- Lu, T., Wang, X., Xu, M., Yu, Z., Luo, Y., & Smith, P. (2020). Dynamics of pedogenic carbonate in the cropland of the North China Plain: Influences of intensive cropping and salinization. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 292, 106820. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106820>
- Mazuela, P. (2013). Agricultura en zonas áridas y semiáridas. *Idesia (Arica)*, 31(2), 3-4. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292013000200001>
- Mesías, F. W., Hernández-Jiménez, A., Vera-Macías, L. R., Guzmán-Cedeño, Á. M., Cedeño-Sacón, Á. F., Ormaza-Cedeño, K. P., & López-Alava, G. A. (2018). Reservas de carbono orgánico en suelos de la llanura fluvial Calceta-Tosagua, Manabí, Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 39(4), 27-33.
- Monger, C. (2014). Soils as Generators and Sinks of Inorganic Carbon in Geologic Time (pp. 27-36). https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_3
- Moreno-Lora, A., & Delgado, A. (2020). Factors determining Zn availability and uptake by plants in soils developed under Mediterranean climate. *Geoderma*, 376, 114509. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114509>
- Orrala Borbor, N. A., Drouet Candell, A., Mejía, A. L., & Arzube Mayorga, M. (2020). Efecto del riego deficitario controlado en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) utilizando la tina de evaporación clase A, en Río Verde, Santa Elena, Ecuador. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 5(1), 114-124.
- Ortiz, A. C., Jin, L., Ogrinc, N., Kaye, J., Krajnc, B., & Ma, L. (2022). Dryland irrigation increases accumulation rates of pedogenic carbonate and releases soil abiotic CO₂. *Scientific Reports*, 12(1), 464. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04226-3>
- Ovalle, R., Seguel, O., & Pfeiffer, M. (2023). Influencia de las prácticas agrícolas en la dinámica de los carbonatos en los suelos. *Agro sur*, 51(1), 19-32. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2023.v51n1-02>
- Pearson, R. K., Neuvo, Y., Astola, J., & Gabbouj, M. (2016). Generalized Hampel Filters. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2016(1), 87. <https://doi.org/10.1186/s13634-016-0383-6>
- Piperno, D. R., & Pearsall, D. M. (1998). The origins of agriculture in the lowland neotropics. Academic Press. <https://catalog.loc.gov/vwebv/search?searchCode=LCCN&searchArg=98084003&searchType=1&permalink=y>
- Rogovska, N. P., Blackmer, A. M., & Mallarino, A. P. (2007). Relationships between Soybean Yield, Soil pH, and Soil Carbonate Concentration. *Soil Science Society of America Journal*, 71(4), 1251-1256. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0235>
- Sharififar, A., Minasny, B., Arrouays, D., Boulonne, L., Jang, H., Mcbratney, A., Chevallier, T., Deventer, P., Field, D., Gomez, C., Jeon, S.-H., Koch, J., Malone, B., Marchant, B., Martin, M., Monger, C., Munera-Echeverri, J., Padarian, J., Pfeiffer, M., & Zijl, G. M. (2023). Soil inorganic carbon, the other and equally important soil carbon pool: Distribution, controlling factors, and the impact of climate change.

- Soil Survey Staff. (2014). Keys to Soil Taxonomy (Twelfth Edition). USDA-Natural Resources Conservation Service.
https://www.nrcs.usda.gov/wps/PA_NRCSCconsumption/download?cid=stelprdb1252094&ext=pdf
- Stothert, K. E., Piperno, D. R., & Andres, T. C. (2003). Terminal Pleistocene/Early Holocene human adaptation in coastal Ecuador: The Las Vegas evidence. *Quaternary International*, 109-110, 23-43.
[https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00200-8](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00200-8)
- Tan, W.-F., Zhang, R., Cao, H., Huang, C.-Q., Yang, Q.-K., Wang, M., & Koopal, L. K. (2014). Soil inorganic carbon stock under different soil types and land uses on the Loess Plateau region of China. *CATENA*, 121, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.014>
- Wang, Y., Li, Y., Ye, X., Chu, Y., & Wang, X. (2010). Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: From forest to desert. *Science of The Total Environment*, 408(8), 1925-1931.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.01.015>
- Yeh, S.-W., Kug, J.-S., Dewitte, B., Kwon, M.-H., Kirtman, B. P., & Jin, F.-F. (2009). El Niño in a changing climate. *Nature*, 461(7263), Article 7263. <https://doi.org/10.1038/nature08316>
- Zamanian, K., Pustovoytov, K., & Kuzyakov, Y. (2016). Pedogenic carbonates: Forms and formation processes. *Earth-Science Reviews*, 157, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.03.003>