

Stocks de carbono orgánico en suelos de un valle interandino en Colombia: implicaciones para la mitigación del cambio climático

Andrea Hoyos Sanclemente¹ Germán Rueda Saa²



¹Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Departamento de Ingeniería, e-mail ahoyos@unal.edu.co

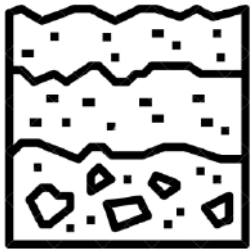
²Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Departamento de Ingeniería, e-mail ghruedas@unal.edu.co



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Importancia del carbono orgánico del suelo (COS)

El suelo



El suelo es vital para la vida y para la **regulación de ciclos biogeoquímicos** como el del carbono, funcionando además como un importante **reservorio de este elemento** (Anthony et al., 2023; Dazzi & Lo Papa, 2022; Lal, 2015; Jassey et al., 2022).

COS



El Carbono Orgánico del Suelo (COS) es una de las **principales reservas de carbono terrestre**, superando a la atmósfera y la vegetación. (Akbar et al., 2023; Lal et al., 2018; Rodrigues et al., 2023).

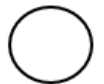
Impactos



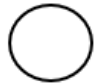
La pérdida de COS por erosión, deforestación y malas prácticas agrícolas deteriora la **fertilidad** y resiliencia del suelo, afectando la productividad y poniendo en riesgo la **seguridad alimentaria** (Han et al., 2023; Lorenz et al., 2019; IPCC, 2020).



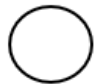
Introducción



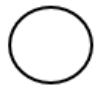
Materiales y métodos



Resultados y discusión



Conclusiones



Referencias bibliográficas

Importancia del monitoreo y mapeo de COS

Monitoreo de COS



El monitoreo del COS es una estrategia para la **mitigación del cambio climático**, ya que facilita la identificación de **áreas prioritarias** para **conservar y restaurar** suelos (Q. Li et al., 2024; World Economic Forum, 2024; Parlamento Europeo, 2021).

Mapeo de COS



Técnicas como el **Kriging** y el **CoKriging** permiten estimar con **precisión la distribución espacial del COS**, apoyando la identificación de áreas críticas y la toma de decisiones en conservación de suelos (Chabala et al., 2017; Estrada-Godoy et al., 2023; L. Chen et al., 2019).

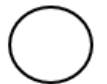
Objetivo general



Evaluar la **capacidad de almacenamiento** y **distribución espacial** del carbono orgánico en suelos agrícolas de la **cuenca Guachal** en el **Valle del Cauca** y su **relación con las propiedades fisicoquímicas** y algunas **variables ambientales**.



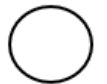
Introducción



Materiales y métodos



Resultados y discusión



Conclusiones



Referencias bibliográficas

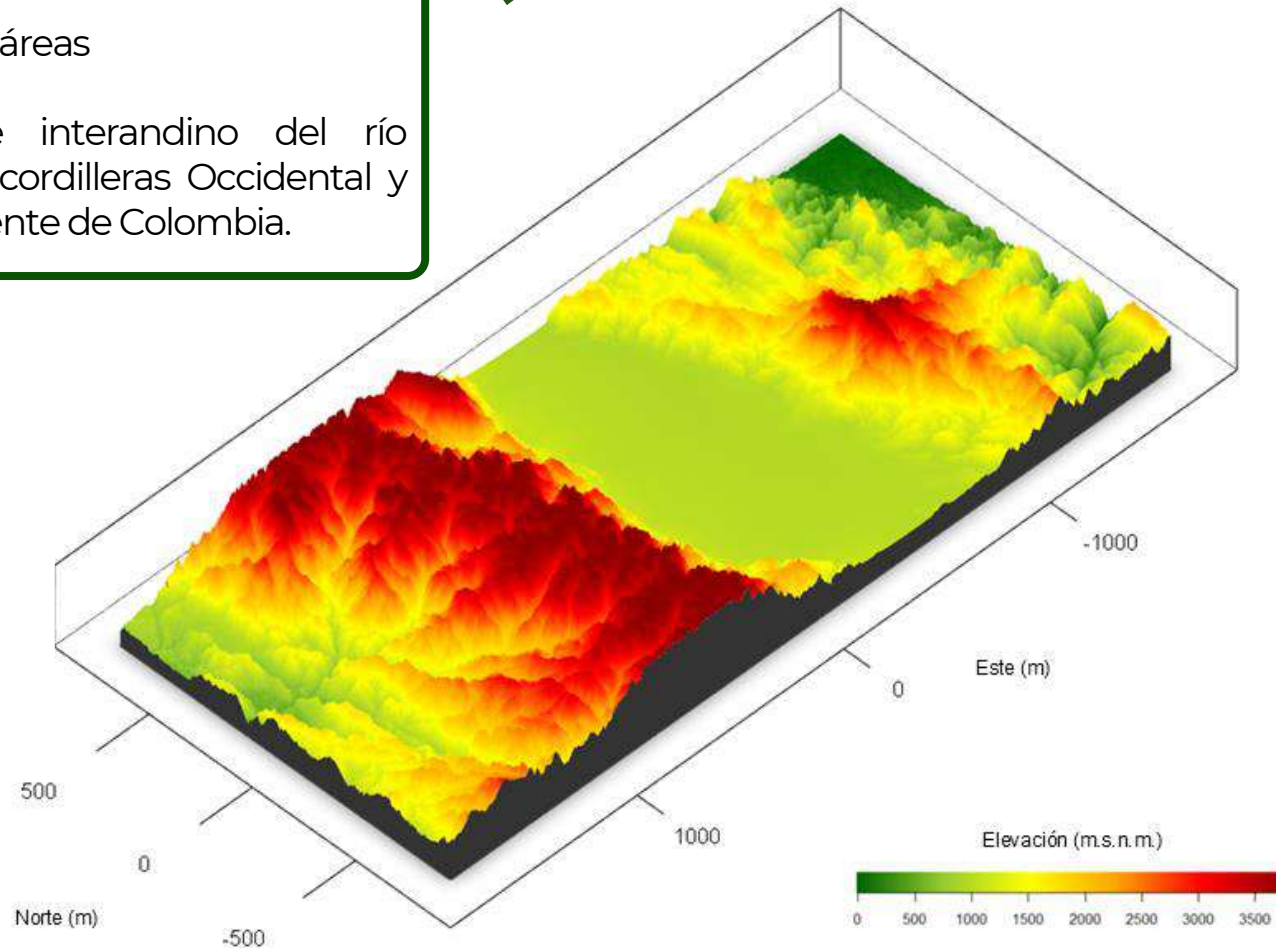
Área de estudio

Nombre: Cuenca del río Guachal

Área: 116,248 hectáreas

Ubicación: Valle interandino del río Cauca, entre las cordilleras Occidental y Central, suroccidente de Colombia.

Clima: Cálido semiárido, Cálido semihúmedo, Templado semihúmedo, Frío húmedo, Muy frío superhúmedo (Clasificación Caldas-Lang adaptada por IDEAM, 2017).



Principales coberturas

- Cultivo intensivo de caña de azúcar (principal)
- Pastos y cultivos permanentes como cacao

Introducción

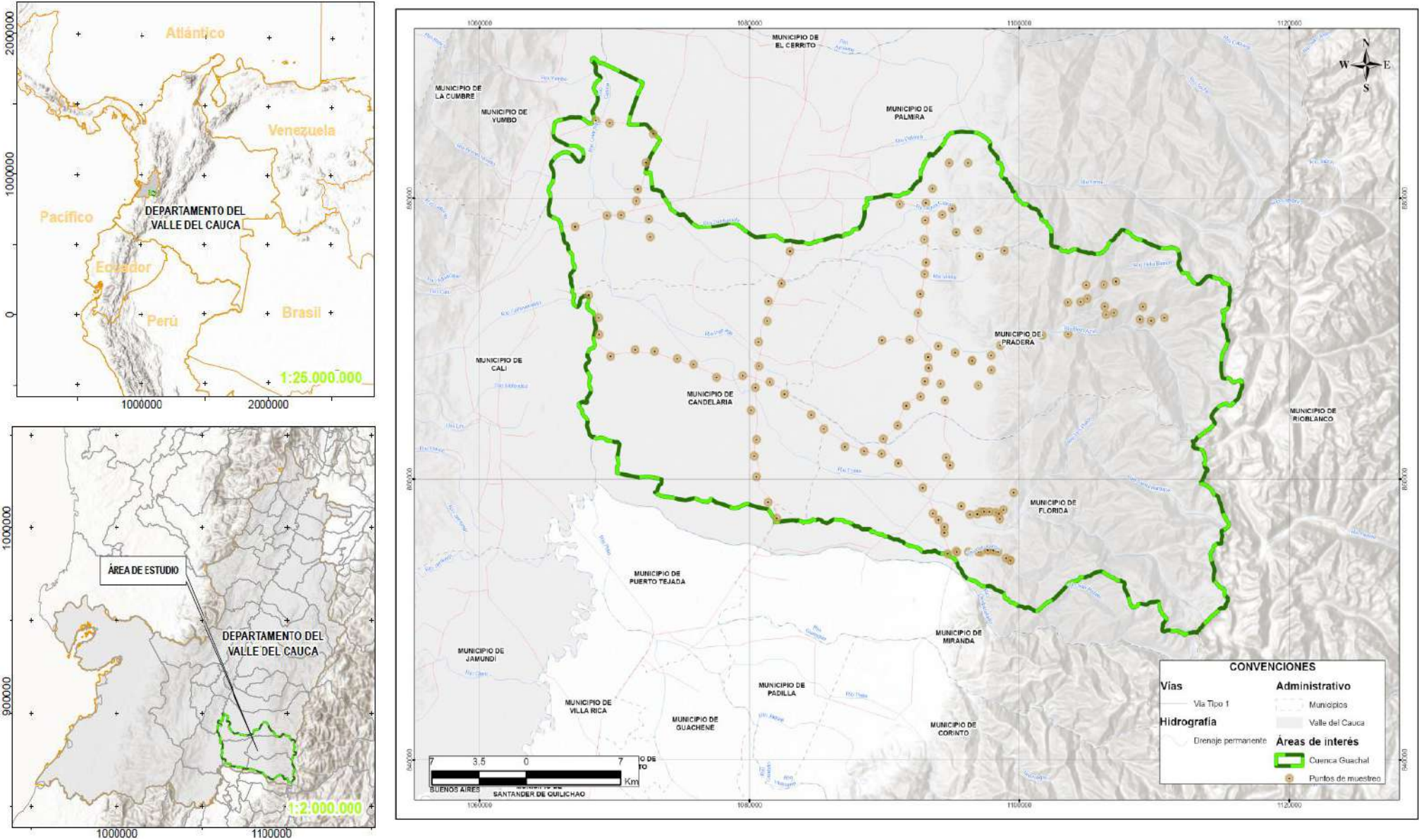
Materiales y métodos

Resultados y discusión

Conclusiones

Referencias bibliográficas

Figura 1. Localización del área de estudio y sitios de muestreo



Introducción

Materiales y métodos

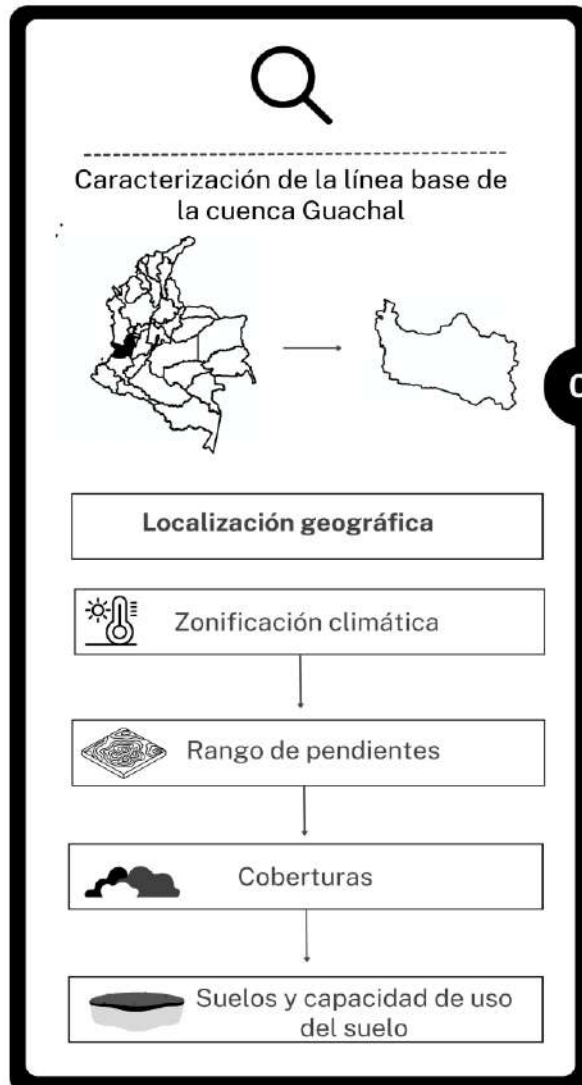
Resultados y discusión

Conclusiones

Referencias bibliográficas

Esquema metodológico de la investigación – Parte 1

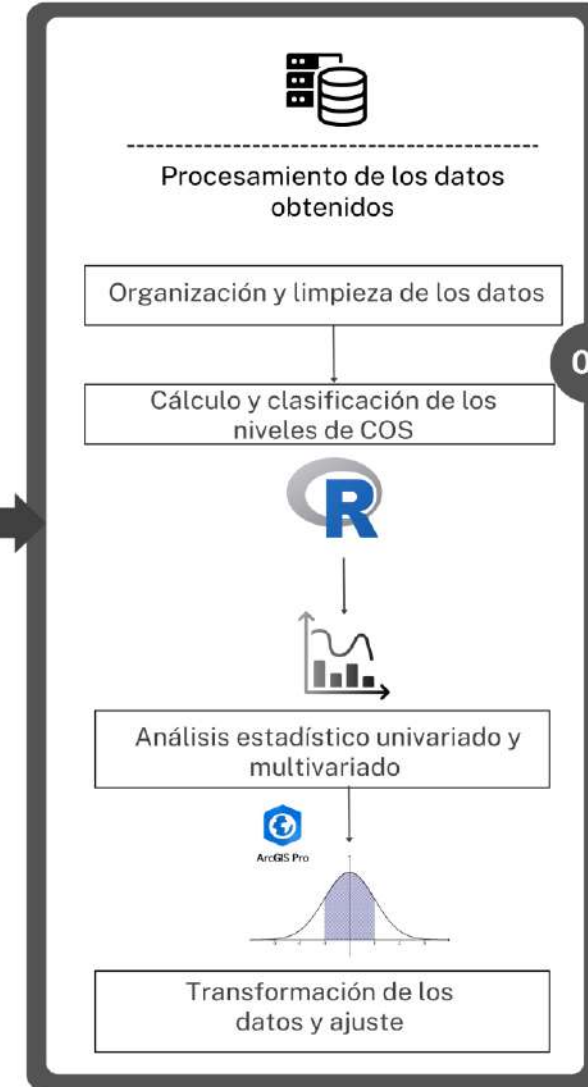
Reconocimiento del área de estudio



Muestreo de suelos



Preparación de los datos



Introducción

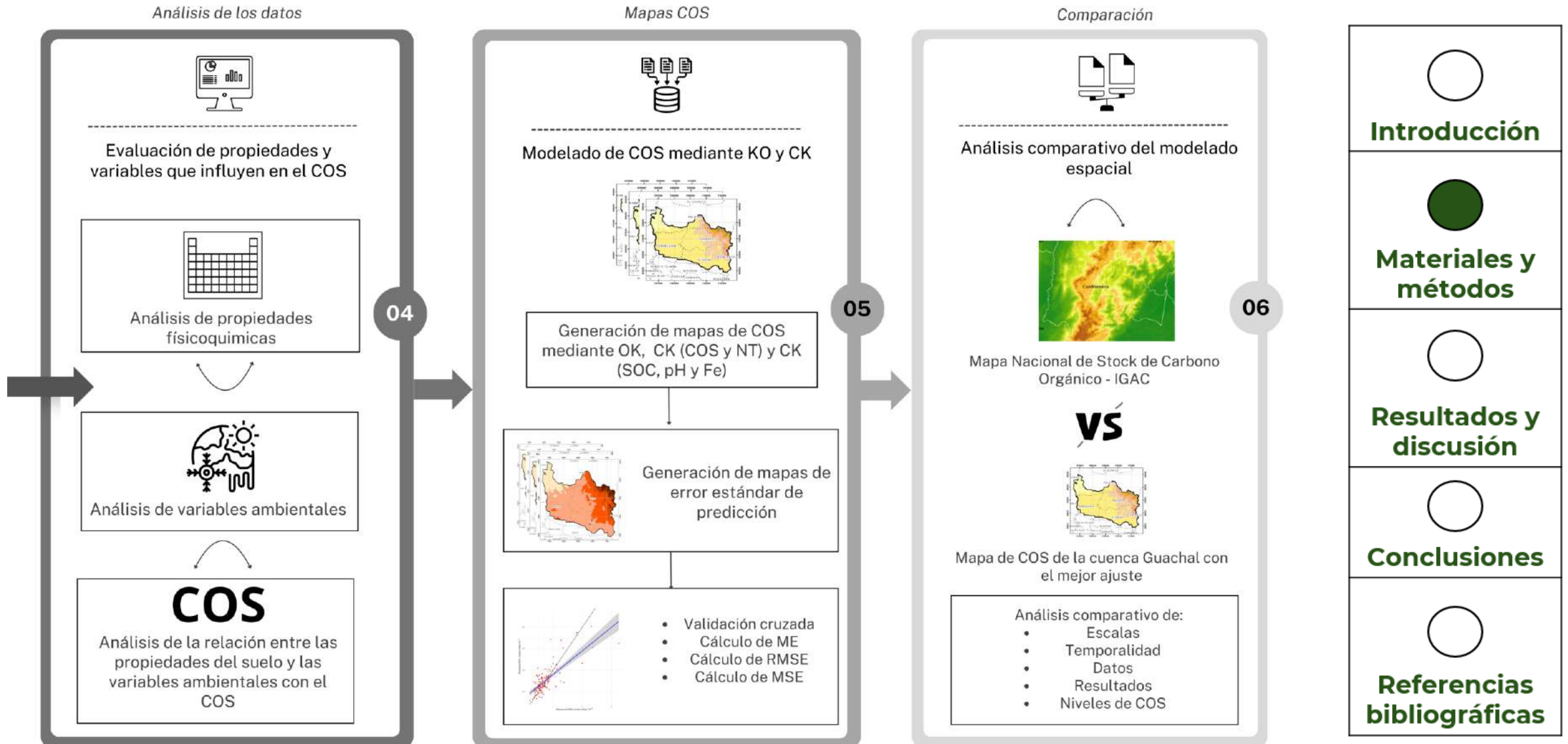
Materiales y métodos

Resultados y discusión

Conclusiones

Referencias bibliográficas

Esquema metodológico de la investigación – Parte 2



Cálculo y categorías de COS

Cálculo

Ecuación propuesta por Clara et al. (2017)

$$SOC = d \times BD \times OC$$

donde **BD** es la **densidad aparente** del suelo (g cm^{-3}), **d** es la **profundidad del muestreo** (30 cm) y **OC** es el contenido de **carbono orgánico** expresado en $\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$.

Clasificación

Clasificación del almacenamiento de COS (Loayza et al., 2020):

Baja: $<40 \text{ t ha}^{-1}$

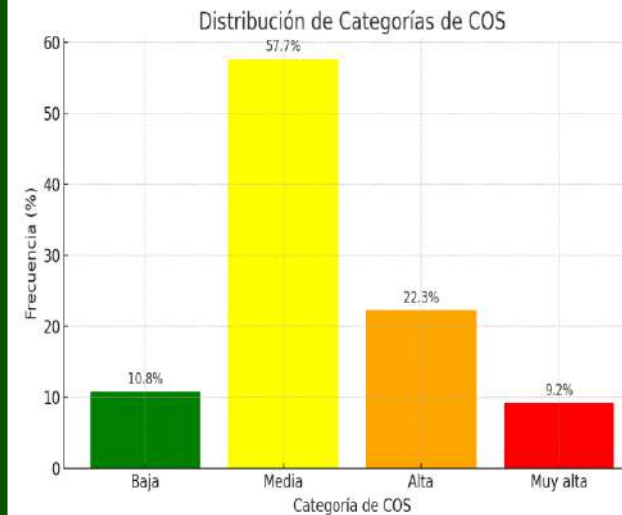
Media: $40 - 79.9 \text{ t ha}^{-1}$

Alta: $80 - 119.9 \text{ t ha}^{-1}$

Muy alta: $\geq 120 \text{ t ha}^{-1}$

Resultados

El **57,7%** del área de estudio presenta **niveles medios de COS**, asociados al tipo de cobertura y manejo agrícola (Cortés Lombana, 1981; Gómez-Balanta & Ramírez-Náder, 2022; Uribe Castro, 2014).



 **Introducción**

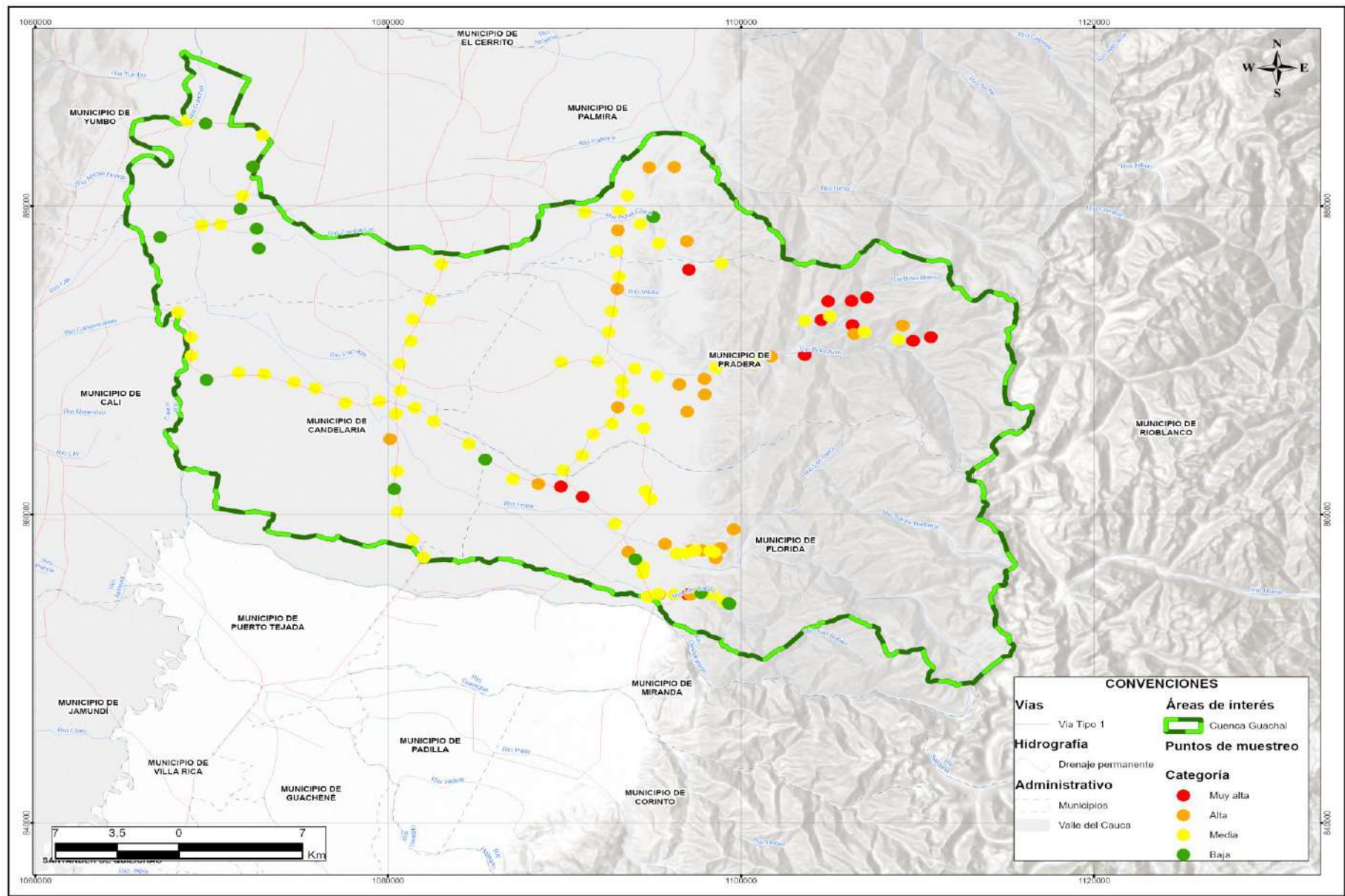
 **Materiales y métodos**

 **Resultados y discusión**

 **Conclusiones**

 **Referencias bibliográficas**

Figura 2. Categorías de COS obtenidas



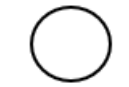
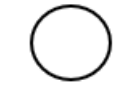
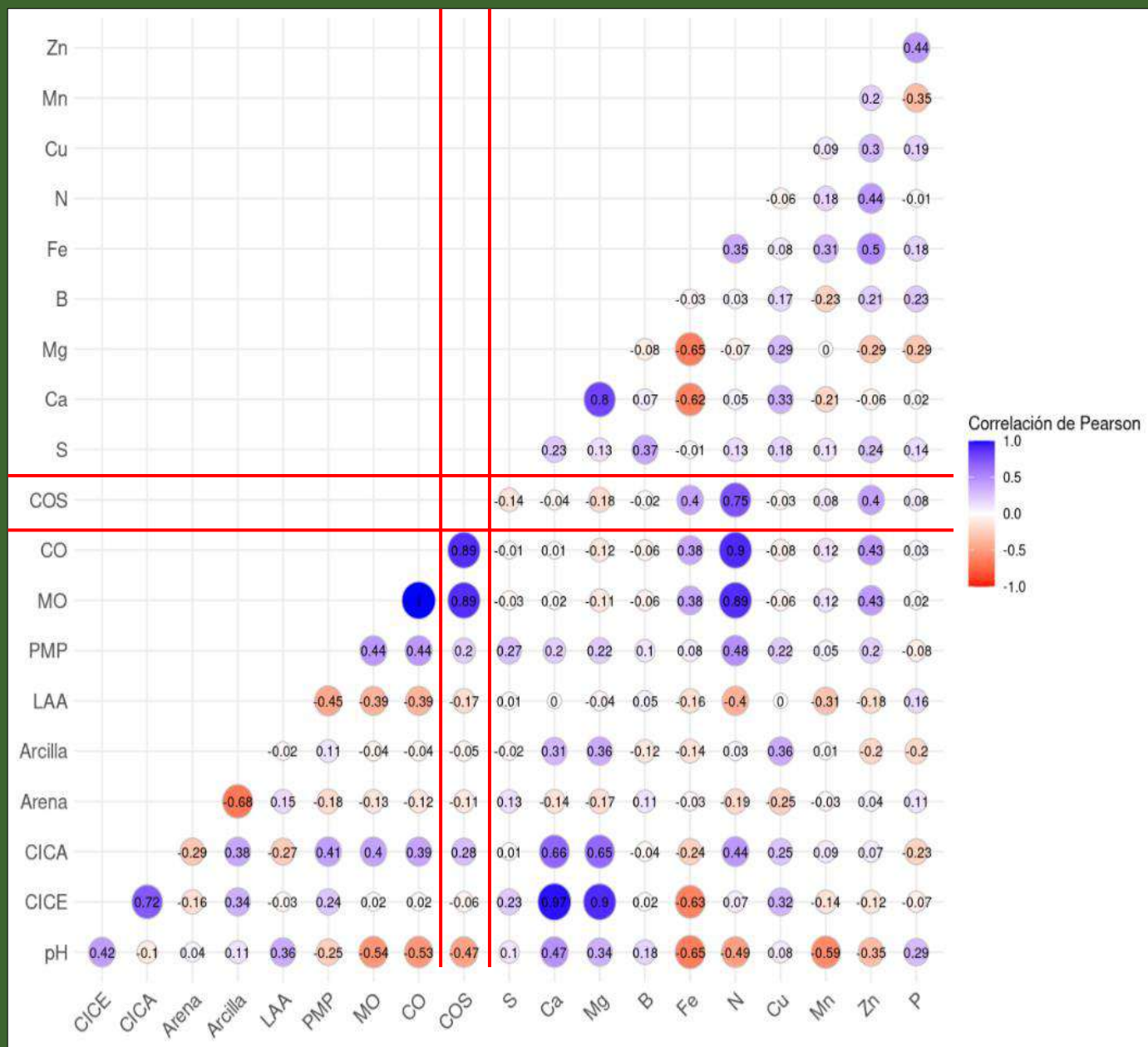
	Introducción
	Materiales y métodos
	Resultados y discusión
	Conclusiones
	Referencias bibliográficas

Figura 3. Correlación de Pearson con variables transformadas



- El COS presentó **fuerte correlación positiva** con materia orgánica y carbono total ($r = 0.89$).
- La correlación del COS con el nitrógeno total mejoró tras la transformación de datos ($r = 0.75$).
- Se observaron correlaciones positivas moderadas entre COS, hierro (Fe) y zinc (Zn), sugiriendo su rol en la estabilización del carbono (Che et al., 2021; Krishna et al., 2023).
- El pH mostró correlación **negativa moderada** con el COS, indicando que suelos más ácidos tienden a acumular más carbono (S. Jin & Wang, 2018; X. Lu et al., 2022).

Introducción

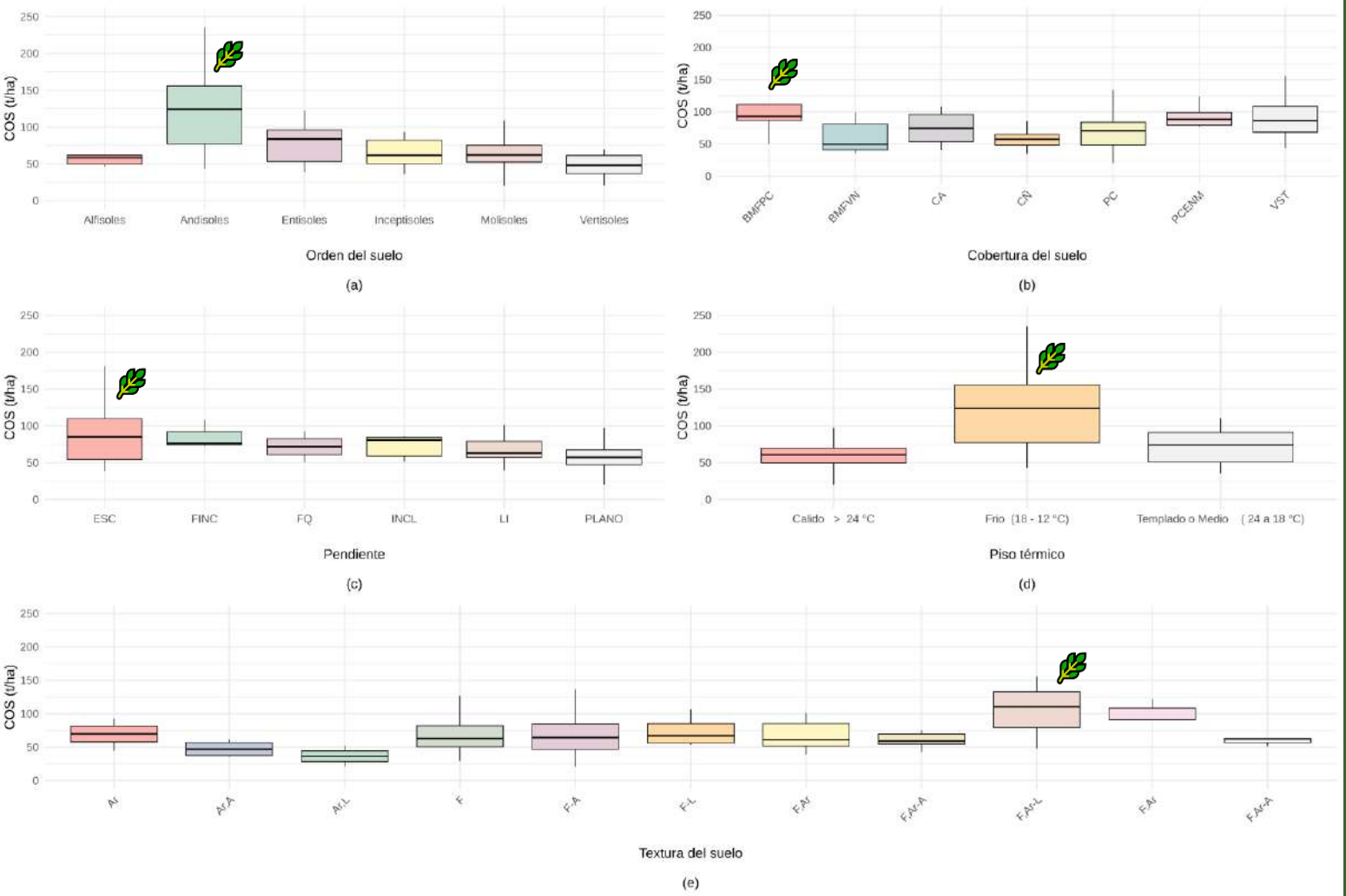
Materiales y métodos

Resultados y discusión

Conclusiones

Referencias bibliográficas

Figura 4. Identificación de condiciones edafoclimáticas con mayor potencial de captura de carbono orgánico del suelo (COS)

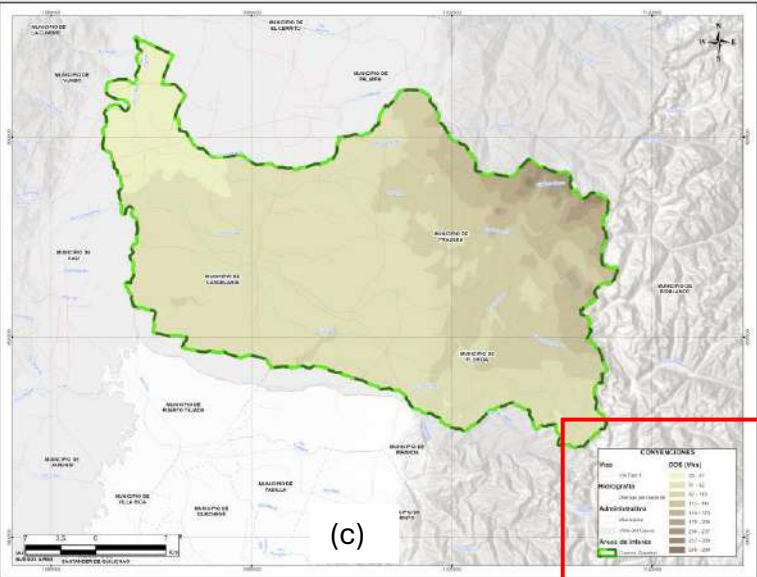
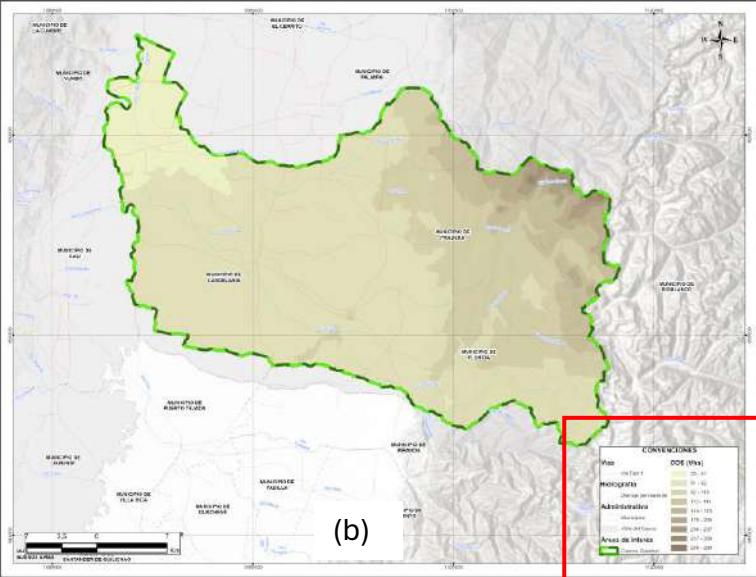
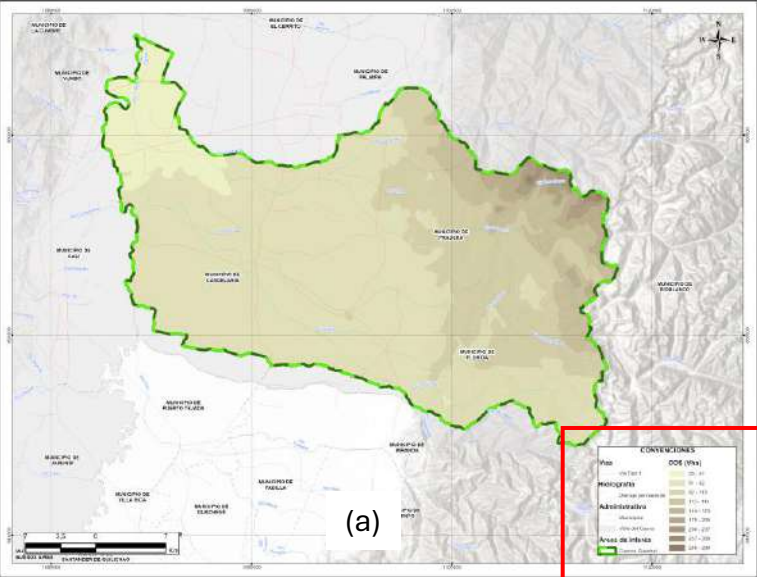


Las condiciones señaladas corresponden a **unidades edafoclimáticas con mayor potencial de almacenamiento de carbono**. Estas áreas **deben priorizarse** en programas de conservación del suelo y **mitigación del cambio climático**.

	Introducción
	Materiales y métodos
	Resultados y discusión
	Conclusiones
	Referencias bibliográficas

Nota. (a) Orden del suelo (b) Cobertura del suelo: BMFPC (Bosque mixto fragmentado con cultivos), BMFVN (Bosque mixto fragmentado con vegetación natural), CA (Cacao), CA (Caña de azúcar), PC (Pastos cultivados), PCENM (Pastos cultivados con malezas) y VST (Vegetación secundaria o de transición). (c) Pendiente: ESC (Escarpada, >50%), FINC (Fuertemente inclinada, 25-50%), FQ (Fuertemente quebrada), INCL (Inclinada, 7-12%), LI (Ligeramente inclinada, 3-7%) y PLANO (Plano, <3%). (d) Piso térmico y (e) Textura del suelo: F-A (Franco arcilloso), F (Franco), F-L (Franco limoso), F,Ar (Franco-arenoso), F,Ar-A (Franco-arenoso arcilloso), F,Ar-L (Franco-arenoso limoso), Ar (Arenoso) y Ar,L (Arenoso limoso).

Figura 5. Mapas de predicción espacial del COS en la cuenca Guachal. (a) Kriging ordinario univariado. (b) CoKriging multivariado utilizando COS y nitrógeno total (NT). (c) CoKriging multivariado incorporando COS, pH y hierro (Fe).



CONVENCIONES

Vías

- Via Tipo 1

Hidrografía

- Drenaje permanente

Administrativo

- Municipios
- Valle del Cauca

Áreas de interés

- Cuenca Guachal

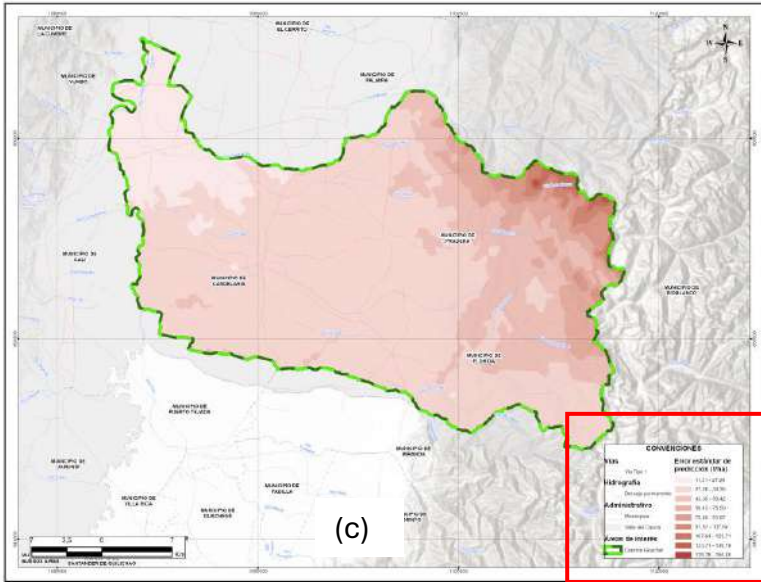
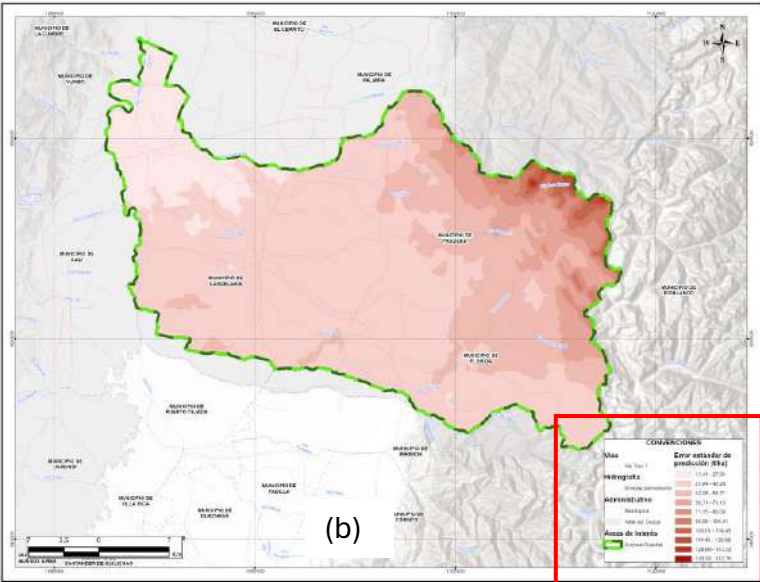
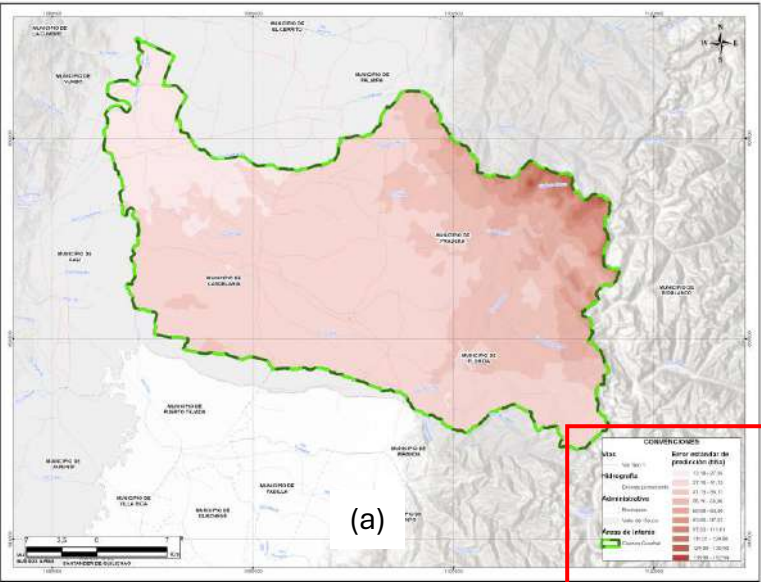
COS (t/ha)

- 20 - 51
- 51 - 82
- 82 - 113
- 113 - 144
- 144 - 175
- 175 - 206
- 206 - 237
- 237 - 268
- 268 - 299

Categoría	Rango de COS (t ha ⁻¹)
Baja	<40.0
Media	40.0 - 79.9
Alta	80.0 - 119.9
Muy alta	≥120.0

	Introducción
	Materiales y métodos
	Resultados y discusión
	Conclusiones
	Referencias bibliográficas

Figura 6. Mapas del error estándar de predicción del COS. (a) Kriging Ordinario (OK), (b) Cokriging (CK) (COS y NT), y (c) Cokriging (CK) (COS, pH y Fe).



(a)		(b)		(c)	
CONVENCIONES		CONVENCIONES		CONVENCIONES	
Vías	Error estándar de predicción (t/ha)	Vías	Error estándar de predicción (t/ha)	Vías	Error estándar de predicción (t/ha)
Vía Tipo 1	13,18 - 27,16	Vía Tipo 1	13,41 - 27,84	Vía Tipo 1	11,21 - 27,28
Hidrografía		Hidrografía		Hidrografía	
Drenaje permanente	27,16 - 41,13	Drenaje permanente	27,84 - 42,28	Drenaje permanente	27,28 - 43,35
Administrativo		Administrativo		Administrativo	
Municipios	41,13 - 55,11	Municipios	42,28 - 56,71	Municipios	43,35 - 59,42
Valle del Cauca	55,11 - 69,08	Valle del Cauca	56,71 - 71,15	Valle del Cauca	59,42 - 75,50
Áreas de interés		Áreas de interés		Áreas de interés	
Cuenca Guachal	69,08 - 83,06	Cuenca Guachal	71,15 - 85,58	Cuenca Guachal	75,50 - 91,57
	83,06 - 97,03		85,58 - 100,01		91,57 - 107,64
	97,03 - 111,01		100,01 - 114,45		107,64 - 123,71
	111,01 - 124,98		114,45 - 128,88		123,71 - 139,78
	124,98 - 138,96		128,88 - 143,32		139,78 - 155,85
	138,96 - 152,94		143,32 - 157,75		

Introducción

Materiales y métodos

Resultados y discusión

Conclusiones

Referencias bibliográficas

Evaluación de los modelos de predicción

Tabla 1. Medidas de validación cruzada de la interpolación residual para los modelos

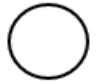
Measure	OK	CK (SOC and NT)	CK (SOC, pH and Fe)
Samples	130	130	130
ME	1,34	1,70	1,83
RMSE	35,33	27,06	34,78
MSE	0,02	0,05	0,03
RMSS	0,82	0,73	0,78
ASE	38,12	34,27	39,96

Nota. ME: Media del error, RMSE: Raíz del error cuadrático medio, MSE: Media del error estandarizado, RMSS: Raíz del error estandarizado al cuadrado, ASE: Error estándar promedio.

- El modelo de CoKriging multivariado (SOC y NT) mostró mayor precisión y consistencia.
- Aunque el modelo CK con pH y Fe tuvo errores ligeramente mayores, sigue siendo una opción válida por capturar mayor variabilidad.
- El Kriging ordinario mostró limitaciones frente a los modelos multivariados, destacando la utilidad de incorporar variables auxiliares para mejorar la predicción del COS.



Introducción



Materiales y métodos



Resultados y discusión



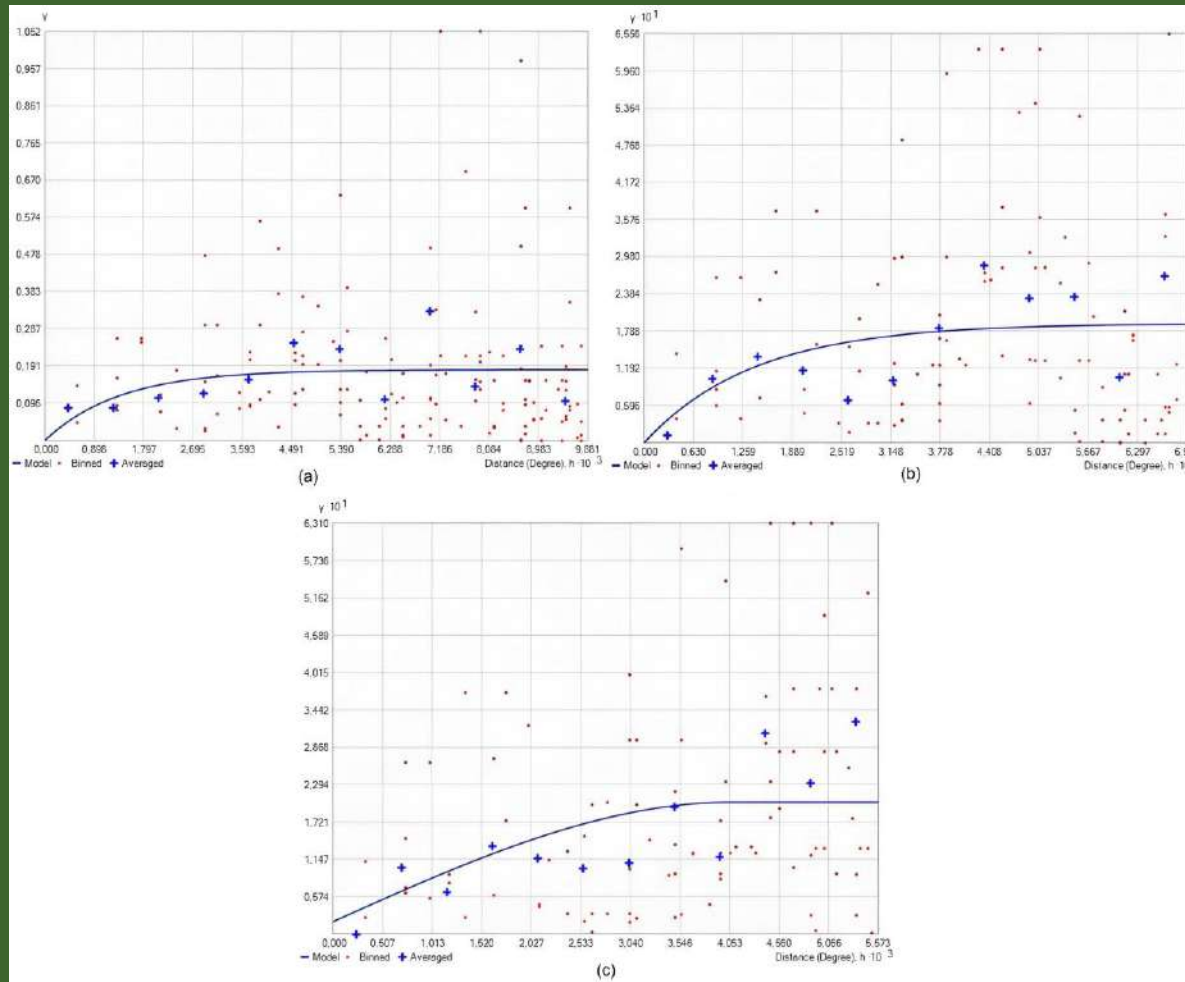
Conclusiones



Referencias bibliográficas

Semivariogramas de las predicciones

Figura 7. Semivariogramas del COS. (a) Kriging ordinario univariado (COS). (b) CoKriging (COS y nitrógeno total, NT). (c) CoKriging (COS, pH y Fe).



○
Introducción

○
Materiales y
métodos

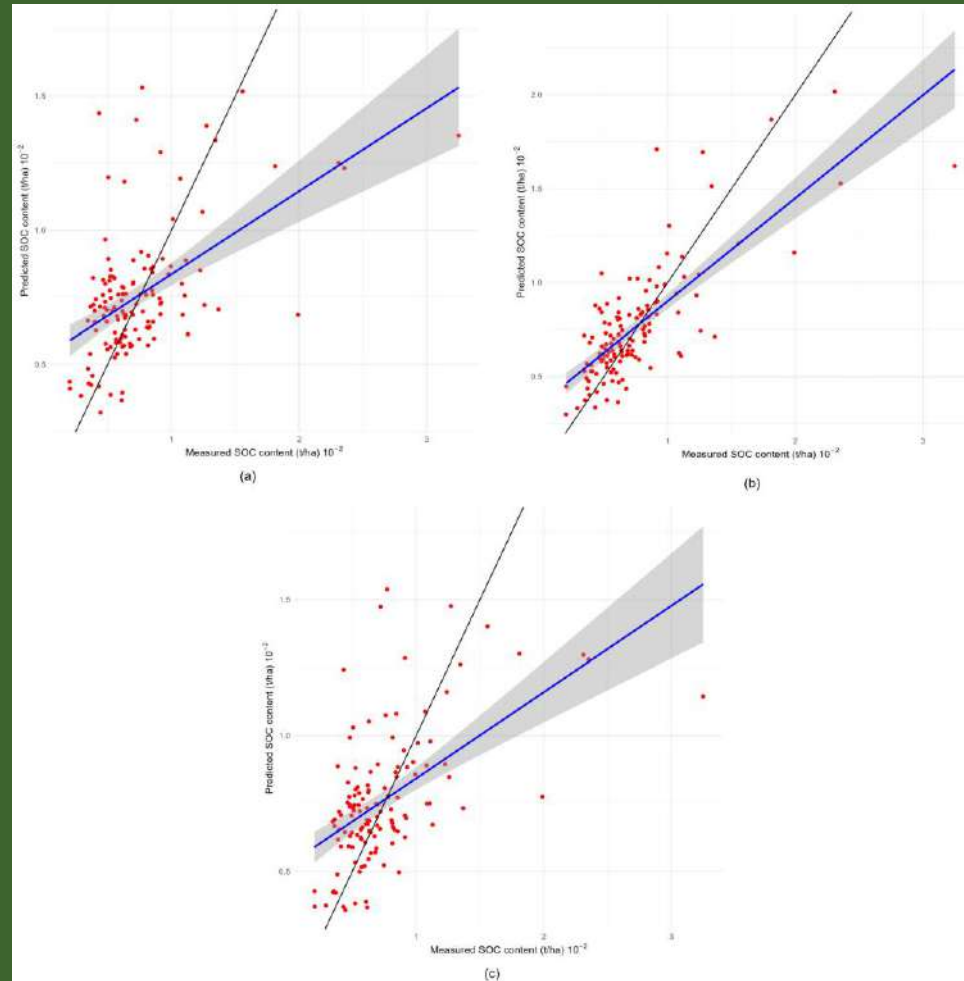
●
Resultados y
discusión

○
Conclusiones

○
Referencias
bibliográficas

Comparación entre las modelaciones

Figura 8. Comparación entre los valores predichos y observados. (a) Kriging ordinario univariado (COS). (b) CoKriging multivariado (COS y NT). (c) CoKriging multivariado (COS, pH y Fe)



○
Introducción

○
Materiales y
métodos

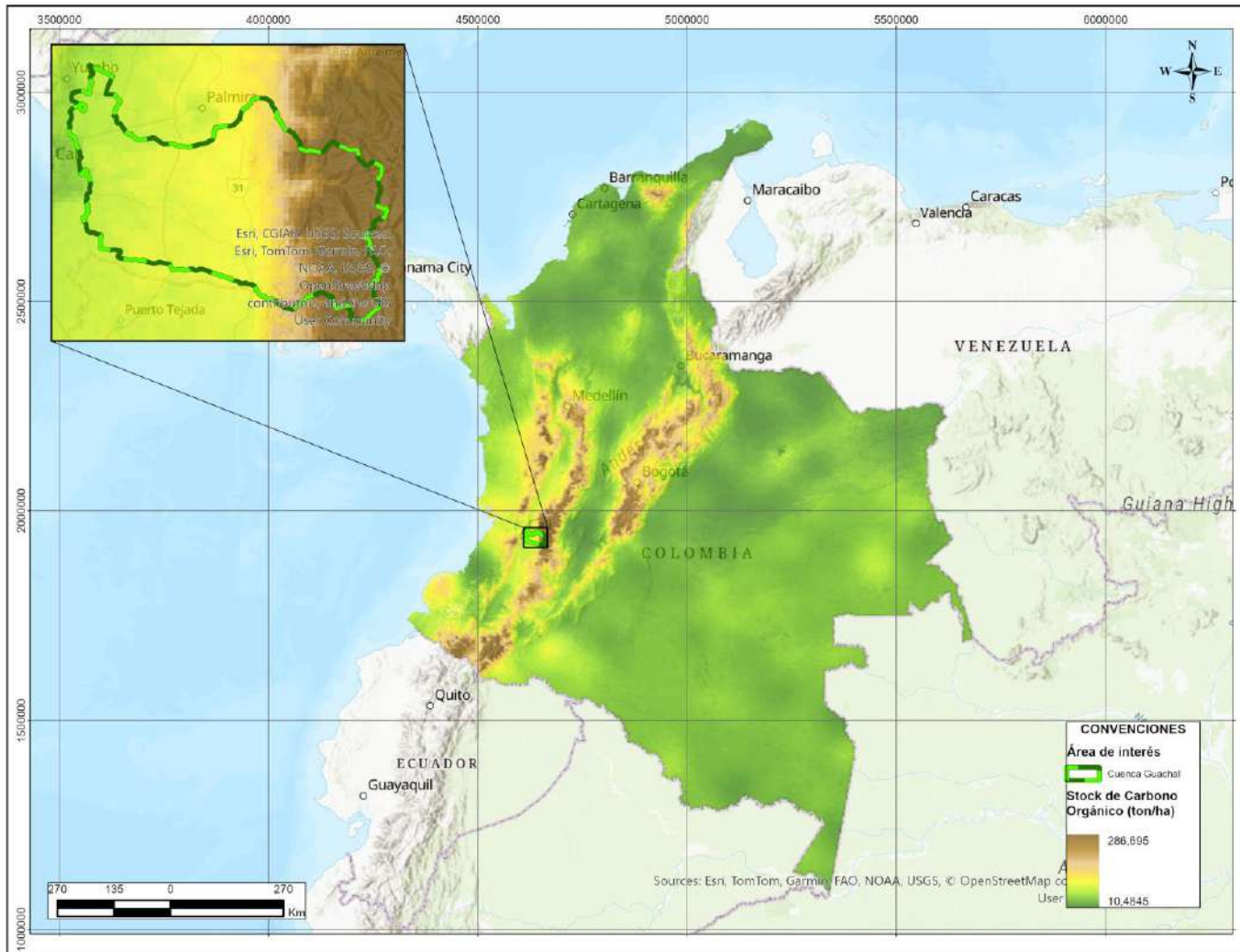
●
Resultados y
discusión

○
Conclusiones

○
Referencias
bibliográficas

Análisis comparativo del modelado espacial

Figura 9. Mapa Nacional de Stock de Carbono Orgánico con zoom en el área de estudio



- El Mapa Nacional de Stock de COS (2017) de Colombia se elaboró mediante mapeo digital de suelos de la FAO y datos de **4.329 perfiles** recolectados entre **1980 y 2012**.
- El análisis, a escala **1:100.000**, utilizó Kriging de regresión para estimar el carbono orgánico en todo el territorio nacional.
- El contenido de COS varía entre **10 y 287 t ha⁻¹**, siendo mayor en las **zonas altas del país**.

○
Introducción

○
Materiales y métodos

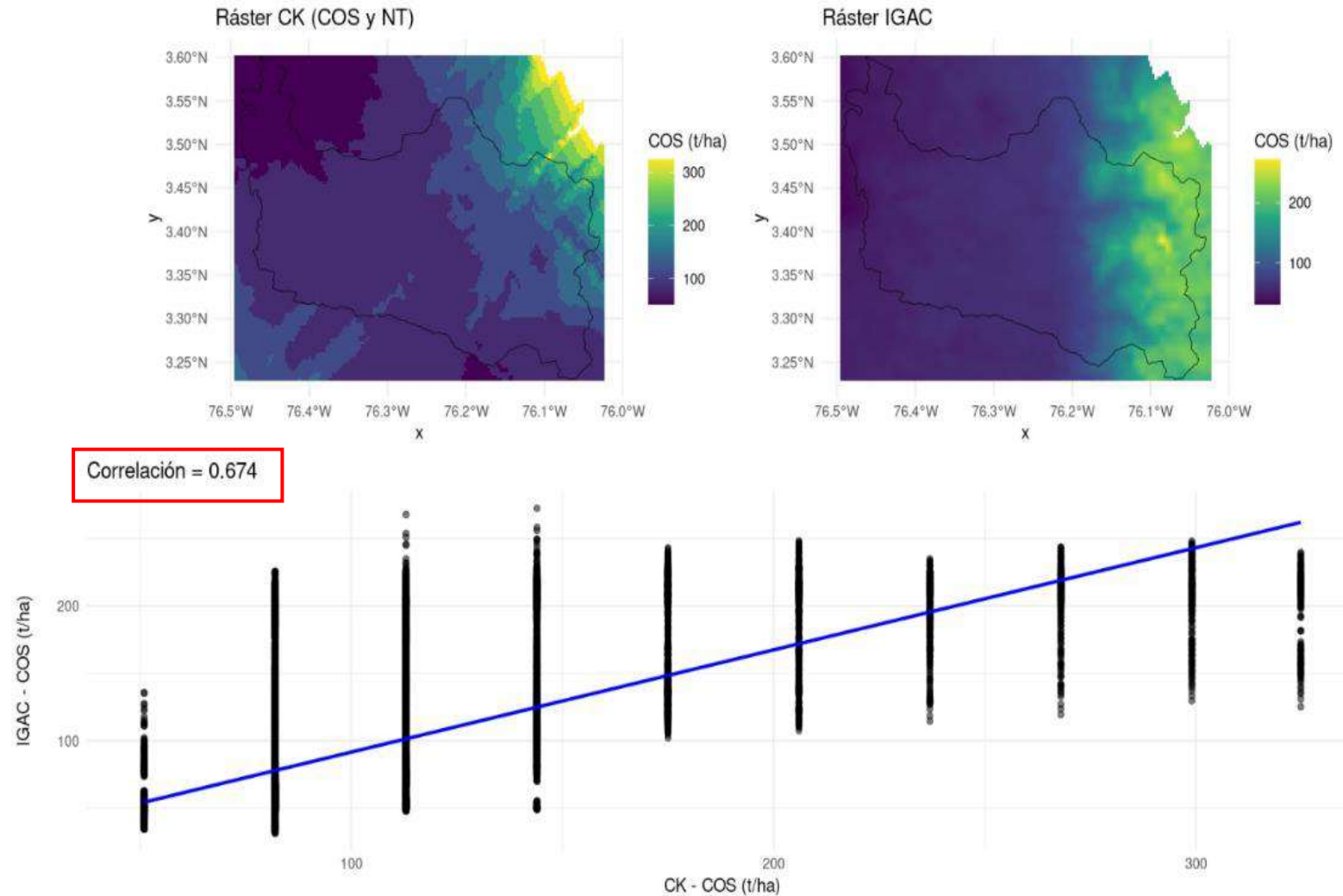
●
Resultados y discusión

○
Conclusiones

○
Referencias bibliográficas

Correlación entre mapas

Figura 10. Correlación entre el mapa del IGAC y el mejor modelado espacial (CK, COS y NT)



Introducción

Materiales y métodos

Resultados y discusión

Conclusiones

Referencias bibliográficas

Conclusiones

- El contenido de carbono orgánico del suelo (COS) mostró alta variabilidad espacial (20–299 t ha⁻¹), influenciado por propiedades del suelo, uso del suelo y clima.
- Los Andisoles presentaron los mayores valores de COS por su origen volcánico, mientras que los Vertisoles y Alfisoles mostraron los menores contenidos, asociados a su estructura densa y baja permeabilidad.
- Texturas finas como franco arcillosa favorecen mayor retención de materia orgánica.
- Zonas de pendiente pronunciada acumulan más carbono, a diferencia de las zonas planas con agricultura intensiva, que presentan los valores más bajos.
- Bosques mixtos fragmentados, vegetación secundaria y pastos cultivados se destacan por su mayor capacidad de captura y almacenamiento de carbono.
- El uso de variables auxiliares (nitrógeno total, pH, Fe) mediante CoKriging mejoró significativamente la precisión de los mapas de COS frente al Kriging ordinario.
- Los niveles de carbono orgánico del suelo (COS) en la cuenca Guachal evidencian el potencial de estos suelos como sumideros de carbono, lo que representa una **oportunidad estratégica para contribuir a la mitigación del cambio climático** a escala local. La identificación de áreas con alta capacidad de almacenamiento y la relación con factores edafoclimáticos permiten priorizar zonas clave para la implementación de prácticas agroecológicas que aumenten el secuestro de carbono y reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero.



Introducción



Materiales y
métodos



Resultados y
discusión



Conclusiones



Referencias
bibliográficas

- Akbar, N., Farooq, T. H., Shah, A. A., Alahmadi, A. S., & Mahmood, S. (2023). Soil organic carbon and its importance in climate change mitigation. *Environmental Research*, 216, 114648.
- Anthony, J. L., Chevallier, T., & Soti, V. (2023). Soil ecosystem services and climate regulation. *Geoderma*, 430, 116280.
- Bouslih, Y., Zouahri, A., Douaik, A., & Bouhlassa, S. (2024). Assessment of soil organic carbon distribution under different land uses. *Catena*, 232, 107310.
- Chabala, L. M., Mulolwa, A., Lungu, O. I., & Kantengwa, S. (2017). Estimating Soil Organic Carbon Stocks Using Different Geostatistical Techniques in Zambia. *Geoderma Regional*, 10, 28–36.
- Chen, L., Liu, X., Zhang, G., & Wang, J. (2019). Comparison of spatial interpolation methods for estimating soil organic carbon stocks. *Geoderma*, 343, 184–195.
- Cortés Lombana, A. (1981). *Suelos y vegetación del Valle del Cauca*. Universidad Nacional de Colombia.
- Dazzi, C., & Lo Papa, G. (2022). Soil functions and the carbon cycle: Importance for soil protection. *Geoderma*, 426, 116109.
- Estrada-Godoy, F., Ramirez, D. A., Condori, B., & Quispe, L. A. (2023). Mapping soil organic carbon using geostatistical approaches in Andean agroecosystems. *Agricultural Systems*, 208, 103657.
- Gómez-Balanta, A., & Ramírez-Náder, L. (2022). Manejo del carbono orgánico en sistemas agrícolas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 16(2), 340-355.
- Han, G., Zhou, W., & Xu, Z. (2023). Soil organic carbon dynamics under different land uses in tropical regions. *Soil and Tillage Research*, 227, 105661.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2017). Mapa Nacional de Stock de Carbono Orgánico. Disponible en: <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2020). Climate Change and Land: Summary for Policymakers. IPCC.
- Jassey, V. E., & otros. (2022). Soil carbon sequestration and climate change. *Nature Climate Change*, 12(1), 35–43.
- Jin, S., & Wang, L. (2018). Soil pH effects on organic matter stabilization. *Journal of Soils and Sediments*, 18(1), 1-14.
- Krishna, M. P., Mohan, M., & otros autores. (2023). Influence of micronutrients on carbon dynamics in tropical soils. *Catena*, 220, 106583.
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895.
- Lal, R., Negassa, W., & Lorenz, K. (2018). Soil carbon sequestration for climate change mitigation and food security. *Soil Research*, 56(7), 491–501.
- Li, Q., Liu, X., Guo, Z., & Peng, C. (2024). Soil organic carbon and its role in climate change adaptation and mitigation. *Science of The Total Environment*, 906, 167670.
- Loayza, A., León, J., & De la Rosa, D. (2020). Soil Organic Carbon Stocks and Mapping in Latin America. *Revista Geográfica Española*, 32(2), 120-133.
- Lorenz, K., & Lal, R. (2019). *Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems*. Springer.
- Lu, X., Liang, C., & Liang, G. (2022). Effects of soil pH on carbon dynamics: Mechanisms and implications. *Soil Biology and Biochemistry*, 166, 108568.
- Parlamento Europeo. (2021). *La política de protección del suelo en la Unión Europea*. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.
- Rodrigues, J., Torres, S., & Oliveira, D. (2023). Soil carbon pools in tropical agricultural systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 343, 107102.
- Uribe Castro, C. (2014). *Evaluación del uso agrícola en la cuenca del río Guachal*. Universidad del Valle.
- World Economic Forum. (2024). *The Global Risks Report 2024*. World Economic Forum


Introducción


**Materiales y
métodos**


**Resultados y
discusión**


Conclusiones


**Referencias
bibliográficas**

Más información



<https://casap.science/>



casap@casap.science



Medellín, Colombia

CASAP X

CONGRESO COLOMBIANO Y
CONFERENCIA INTERNACIONAL

DE CALIDAD DE AIRE, CAMBIO CLIMÁTICO Y SALUD PÚBLICA



Más información



<https://casap.science/>



casap@casap.science