



# Estimación de carbono orgánico del suelo en Colombia, una herramienta de gestión del territorio

Adriana Bolívar<sup>2</sup> , Camilo Camacho<sup>1</sup> , Napoleón Ordoñez<sup>1,3,\*</sup>, Joan Gutiérrez<sup>1</sup> , Germán Álvarez<sup>4</sup>, Mario Guevara<sup>5</sup>, Carolina Olivera<sup>6</sup>, Guillermo Federico Olmedo<sup>7,8</sup> , Sally Bunning<sup>8</sup>, Ronald Vargas<sup>8</sup>

- (1) Subdirección de Agrología. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Carrera 30 N° 48-51, Bogotá. Colombia, 110221.  
 (2) Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Ave., Central del Norte 39-115, Tunja, Colombia. 150001.  
 (3) Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias. Carrera 45 N° 26-85, Bogotá. Colombia, 111321.  
 (4) Jardín Botánico de Bogotá (JBB). Calle 63 N° 68-95, Bogotá. Colombia, 111071.  
 (5) Centro de Geociencias - Universidad Nacional Autónoma de México Campus Juriquilla, Qro. MX..  
 (6) Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Oficina Regional para Latinoamérica y el Caribe, Dag Hammarskjöld, Vitacura, Chile.  
 (7) INTA EEA Mendoza, San Martín 3853, Luján de Cuyo, Mendoza, Argentina.  
 (8) Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Viale delle Terme di Caracalla, Roma, Italia.

\* Autor de Correspondencia: N. Ordoñez [[nordonez@igac.gov.co](mailto:nordonez@igac.gov.co)]

> Recibido el 26 de junio de 2020 - Aceptado el 14 de marzo de 2021

**Como citar:** Bolívar, A., Camacho, C., Ordoñez, N., Gutiérrez, J., Álvarez, G., Guevara, M., Olivera, C., Olmedo, G.F., Bunning, S., Vargas, R. 2021. Estimación de carbono orgánico del suelo en Colombia, una herramienta de gestión del territorio. *Ecosistemas* 30(1): 2019. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2019>

## Estimación de carbono orgánico del suelo en Colombia, una herramienta de gestión del territorio

**Resumen:** El suelo desarrolla funciones base que proporcionan valiosos servicios ecosistémicos, como la captura de carbono. En el marco de gestión del territorio, es importante contar con información nacional confiable y representativa para mantener la calidad y salud del suelo en el país. El objetivo del presente trabajo fue establecer el contenido y distribución de carbono orgánico del suelo (COS) hasta 30 cm en Colombia, con resolución espacial de 1 km, usando técnicas de mapeo digital de suelos. La motivación principal de este trabajo fue documentar la contribución de Colombia al mapa global de COS de la FAO. Se utilizó información de 4329 perfiles de suelo, distribuidos en los 32 departamentos del país, recopilados entre los años 1970 y 2012. Estos datos se relacionaron con la información de 140 covariables que describen los factores de formación de los suelos (clima, topografía, cobertura y uso de la tierra, tipo de suelos, material parental). El modelado espacial predictivo se realizó con Regression Kriging y se evaluó mediante validación cruzada y revisión por expertos. Los residuales del modelo ajustado se interpolaron para la obtención del mapa de incertidumbre de la predicción. Los resultados se compararon con productos similares preexistentes de mayor resolución espacial (SoilGrids 250m), obteniendo que el modelo ajustado representa la variabilidad del COS con mayor exactitud ( $r^2=0.49$  y  $RMSE=0.71$ ). El clima es el factor que explicó en mayor medida el comportamiento de la variable. El producto fue validado por expertos nacionales y se busca que este insumo sea considerado como un apoyo para la toma de decisiones en la gestión del territorio y así fortalecer los compromisos del país en degradación de tierras y cambio climático.

**Palabras Clave:** covariables ambientales; mapeo digital de suelos; planificación de tierras; Regression Kriging

## Estimation of soil organic carbon in Colombia, a territory management tool

**Abstract:** Soil performs base functions that provide valuable ecosystem services, such as carbon sequestration. In land planning management framework, it is important to have reliable and representative national information to manage the quality and health of the soil in the country. This study aimed to establish the content and distribution of soil organic carbon (COS) up to 30 cm in Colombia, with a spatial resolution of 1 km, using digital mapping techniques. The main motivation was to document the contribution of Colombia to the global COS of the FAO. Information from 4329 soil profiles of 32 departments collected between 1970 and 2012 was used. These data were related to information of 140 covariates that describe soil-forming factor (climate, topography, land cover and use, soil type, parent material). Predictive spatial modeling was performed with Regression Kriging and evaluated by cross-validation and expert knowledge. Fitted model residuals were interpolated to obtain the prediction uncertainty map. The results were compared with pre-existing similar products with higher spatial resolution (SoilGrids 250m), obtaining that the fitted model represents the variability of COS with greater accuracy ( $r^2=0.49$  and  $RMSE=0.71$ ). Climate is the factor that explained the behavior of the variable to a greater extent. The product was validated by national experts and it is sought that this input be considered as a support for decision-making in the management of the lands and thus strengthen the country's commitments in land degradation and climate change.

**Keywords:** digital soil mapping; environmental covariates; land planning; Regression Kriging

## Introducción

El suelo se ha convertido en uno de los recursos más susceptibles al cambio climático, la degradación de la tierra y a la pérdida de la biodiversidad (FAO 2017a). El suelo proporciona una gran variedad de servicios ecosistémicos esenciales incluyendo el aprovisionamiento de comida, regulación hídrica y climática, hábitat para organismos (biodiversidad), servicios culturales y retención de carbono entre otros (Lefevre et al. 2017).

Actuando como el segundo sumidero de carbono más grande de la tierra, después del océano, el suelo compensa significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> (Lefevre et al. 2017); sin embargo, la intervención humana, relacionada con el cambio de uso del suelo, reduce la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) y por ende aumenta significativamente la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera (Feller et al. 2001).

De acuerdo a lo anterior, la determinación global del contenido del COS, tanto en el espacio como en el tiempo, tiene gran utilidad como herramienta de monitoreo de la condición actual del suelo (Forkuor et al. 2017); no obstante, son numerosos los retos de esta evaluación, dentro de los cuales se pueden mencionar la colecta de información, la estandarización de datos y la implementación de técnicas de modelado que permitan representar verazmente la variabilidad espacial y temporal del COS (Stockmann et al. 2015).

Diversos investigadores en el área de suelos han realizado mapas digitales de COS basados en la correlación de distintos factores formadores de suelo como el relieve, el clima, los organismos, los materiales parentales e incluso algunas propiedades físicas, químicas y biológicas de los mismos (MacBratney et al 2011), fundamentados en lo descrito por Jenny (Jenny 1941) donde el suelo y sus características son resultado de la interacción de elementos formadores en una determinada área. Este proceso de mapeo emplea herramientas que permiten analizar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo (Martin et al. 2011).

Como ejemplo de la aplicación de estas metodologías se encuentra el trabajo realizado por Hengl et al. (2014), desarrollando *SoilGrids*, un sistema de información global de suelos con una resolución de 1 km y 250 m, que contiene predicciones espaciales para una selección de propiedades del suelo (a seis profundidades estándar), entre ellas el stock de COS (Mg ha<sup>-1</sup>) (Hengl et al. 2014).

Guevara et al. (2018), compararon diferentes algoritmos predictivos en 19 países de América Latina y el Caribe con información disponible públicamente, para apoyar el desarrollo de mapas de carbono orgánico de suelo de cada país e incluirlos en la iniciativa de la FAO para generar el mapa global de COS *GSOCMap* (FAO e ITPS 2020). Gutiérrez et al. (2020), publicaron el primer mapa de estimación de COS de ecosistema de páramo en Colombia, obtenido mediante mapeo digital de suelos.

El desarrollo de investigaciones en el área de mapeo digital de suelos y en la estimación de la capacidad de almacenamiento de COS, busca apoyar a los países en el conocimiento de sus recursos, y servir para el establecimiento de líneas base y seguimiento al manejo del componente edáfico, ya que este es uno de los recursos más vulnerables al cambio climático, la degradación de la tierra y la pérdida de biodiversidad (FAO 2017b), razón por la cual la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CNUDB) y la Convención de Lucha contra la Desertificación (CNULD), han establecido acuerdos internacionales jurídicamente vinculantes que integran temas ambientales con el desarrollo sustentable. En estos marcos de trabajo se contempla el COS como un indicador de cambio climático y degradación de las tierras (MADS 2007).

En Colombia son diversos los esfuerzos que se han realizado en este tema a nivel nacional, uno de estos es el realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), quien elaboró el mapa de distribución porcentual de COS basado en los datos de laboratorio obtenidos para cada unidad cartográfica de suelos a escala

1:100 000 para todo el territorio nacional, mediante técnicas convencionales, donde se asigna el porcentaje de COS de acuerdo al ponderando de los valores a 30 cm, según lo reportado en los dos principales perfiles descritos en la UCS y al porcentaje de representatividad de cada uno en cada polígono (IGAC 2016), sin embargo, no se llegó a realizar un mapa que mostrara el almacenamiento COS en el país. Por otro lado en 2017 el Ministerio de Relaciones Exteriores, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en el sexto Informe de Neutralidad en la Degradación de las Tierras, dieron a conocer el mapa de estimación del COS suelos realizado para los diferentes tipos de suelos, definidos por el IPCC (IPCC 2006), con base en valores de referencia definidos por la misma institución, sin embargo, este tipo de predicciones no contemplan el valor de la incertidumbre asociada al dato determinado, lo que hace difícil en términos cuantitativos determinar la precisión del insumo generado.

Por consiguiente y de acuerdo a los compromisos adquiridos por Colombia ante entidades internacionales, resulta fundamental explorar metodologías que permitan disponer de cifras confiables referentes a la calidad de los suelos con el fin de establecer áreas prioritarias de manejo y conservación. El país se ha enfocado en el establecimiento del contenido de COS hasta 30 cm de profundidad, llevando a diversos investigadores a presentar esfuerzos en los cuales se incluye como resultado, los mapas que reflejan el contenido del COS en el territorio con la determinación de su incertidumbre asociada.

Con el objetivo de generar el mapa de COS del territorio Colombiano, el cual involucre el grado de incertidumbre y sirva como base para el cumplimiento de los compromisos de país y la gestión de su territorio, en este documento se presentan los resultados del trabajo interinstitucional realizado entre la FAO, la Alianza Mundial por el Suelo y el IGAC, para la actualización del mapa nacional de stock de COS hasta 30 cm de profundidad con una resolución espacial de 1 Km, obtenido mediante técnicas de mapeo digital de suelos. Nosotros hipotetizamos que la inclusión de variables ambientales que ayuden a explicar el COS, información patrimonial de estudios de suelos propios del país, conocimiento edafológico experto y técnicas de modelado que permitan mejoras continuas, posibilitará la obtención de un producto representativo para el país, que pueda ser considerado como insumo oficial para la planificación del territorio colombiano.

La elaboración de este mapa permitió establecer relaciones espaciales de los aspectos físicos, climáticos y geográficos caracterizados y asociados a las regiones fisiográficas del territorio colombiano, con el comportamiento del COS.

## Materiales y métodos

### Área de Estudio

Colombia, es un país con una extensión de 114 174 800 ha, situado en la región noroccidental de América del Sur. Se organiza políticamente en 32 departamentos y se subdivide en cinco regiones fisiográficas naturales continentales: Andina, Caribe, Pacífico, Orinoquia, Amazonia y una región insular formada por las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, rodeadas por una serie de islotes y cayos en el caribe (Mendivelso et al. 2016).

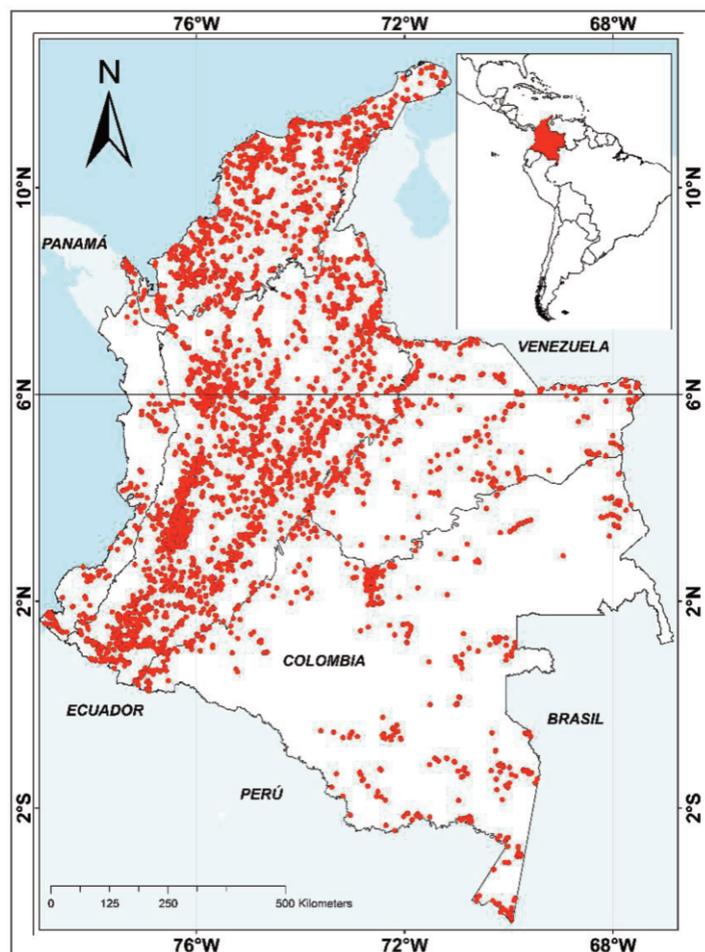
La distribución de la precipitación presenta dos tipos de regímenes, uno bimodal en el que se observan dos periodos marcados de lluvias durante el año (regiones andina y caribe) y un régimen monomodal donde la ocurrencia máxima de lluvias se da en un periodo del año (regiones Orinoquia y Amazonia). En la región del pacífico las lluvias se distribuyen de manera homogénea durante el año, y se constituye como la zona más lluviosa de Colombia con una precipitación media anual que varía entre 8000 y 10 000 mm (Hurtado-Montoya y Mesa-Sánchez 2014).

Según IDEAM y UNAL (2018), los sistemas orográficos en Colombia orientan la distribución de la temperatura media del aire y

forman los pisos térmicos. Las temperaturas medias anuales en el 70% del área total del país (llanuras del Caribe, la Orinoquía, Amazonía y la costa Pacífica) se encuentran por encima de 24°C. En las áreas de mayor elevación el descenso de temperatura no es homogéneo en el Pacífico esta disminución se encuentra alrededor de 4.62°C km<sup>-1</sup>, en la región Andina 6.13°C km<sup>-1</sup> y un poco mayor en la región Caribe, particularmente en La Guajira. Según el mapa realizado por Alarcón-Hincapié (2017), se encuentran zonas con temperaturas medias anuales desde <3°C hasta los 32°C.

### Bases de datos

Para la elaboración de este trabajo se consultaron y utilizaron los datos disponibles en el territorio nacional, basados en los datos de perfiles modales descritos en las unidades cartográficas de suelos de los estudios generales, pertenecientes a los 32 departamentos (escala 1:100 000) realizados entre 1970 y 2012, temporalidad en la cual se abarcó la totalidad de la superficie colombiana (Batjes et al. 2020). En total fueron analizados 4329 perfiles modales distribuidos en toda la geografía nacional (Tabla 1), incluyendo 148 perfiles del sistema WoSIS (Servicio Mundial de Información sobre Suelos, que posee una colección de datos de perfiles de suelos estandarizados, armonizados y georreferenciados de libre acceso que se derivan del aporte de diversas fuentes, incluidas organizaciones de estudios de suelos, institutos de investigación y expertos individuales); los cuales cuentan información de contenido de carbono orgánico determinado por combustión húmeda (Walkley y Black 1934). La distribución espacial de los perfiles de suelos empleados para el mapeo de COS en Colombia, se observa en la Figura 1. La información base para este estudio puede ser consultada en el Sistema de Información de Suelos de Latinoamérica y el Caribe-SISLAC (URL: <http://54.229.242.119/sislac/es>).



**Figura 1.** Localización del área de estudio (Colombia) y de los perfiles incluidos en la base de datos de suelos.

**Figure 1.** Location of the study area (Colombia) and soil database profiles.

Un 60% de la base de datos de partida no contó con información analítica de densidad aparente, por tanto, se realizó su estimación a partir de funciones de pedotransferencia, basadas en modelos de regresión lineal múltiple ajustados por los autores de este trabajo, partiendo de porcentajes de arena, limo y arcilla, para los departamentos que carecían de información.

### Cálculo de stock de COS

El porcentaje de carbono orgánico y la densidad aparente hasta 30 cm para cada perfil de suelo (profundidad objetivo estándar para compilación del mapa global de carbono del suelo GSOC [FAO e ITPS 2020]), fue modelada con funciones de suavizado de áreas equivalentes ("splines") (Bishop et al. 1999; Ponce-Hernandez et al. 1986). A partir de estos valores, se calculó el almacenamiento de COS (Mg ha<sup>-1</sup>) mediante la siguiente ecuación:

$$cos = CO * DA * E * \left(1 - \frac{FG}{100}\right)$$

donde, es el contenido de carbono orgánico (%) determinado en laboratorio, es la densidad aparente (g cm<sup>-3</sup>), es el espesor (30 cm) y es el contenido de fragmentos gruesos para cada perfil (%).

**Tabla 1.** Perfiles de suelo por Departamento.

**Table 1.** Soil profiles by department.

Departamento	Perfiles
Amazonas	157
Antioquia	440
Arauca	98
Atlántico	59
Bolívar	119
Boyacá	111
Caldas	45
Caquetá	83
Casanare	63
Cauca	149
Cesar	70
Choco	60
Córdoba	229
Cundinamarca	209
Guainía	37
Guaviare	128
Huila	136
La Guajira	137
Magdalena	190
Meta	93
Nariño	247
Norte de Santander	177
Putumayo	104
Quindío	4
Risaralda	12
San Andrés y Providencia	0
Santander	78
Sucre	46
Tolima	123
Valle del Cauca	594
Vaupés	36
Vichada	133
WoSIS*	148

## Preparación de variables predictoras

Se recopilaron covariables ambientales para el ajuste de modelos de estimación de COS, como variables topográficas derivadas de un modelo digital de elevación (MDE), información obtenida de imágenes del satélite MODIS-Terra, variables climáticas de temperatura y precipitación a escala 1:100 000 y capas temáticas como coberturas y uso de la Tierra, relieve, tipo de suelo (orden, según taxonomía USDA), tipo de paisaje y material parental.

El conjunto de variables ambientales disponibles fue armonizado a una misma extensión (área del país), redimensionado a un tamaño de pixel de 1 km x 1 km y reproyectado a datum WGS84 (EPSG: 4326). Esta transformación fue requerida para cumplir con las especificaciones del mapa global de carbono de la FAO, el cual tiene una resolución espacial de 1 km x 1 km. La **Tabla 2** muestra el resumen de las capas empleadas, detallando su fuente y resolución o escala original.

## Ajuste y validación del modelo espacial predictivo de COS

Para la predicción espacial de COS en los primeros 30 cm se empleó la técnica de *Regression Kriging* (RK), que consiste en realizar una regresión para obtener la predicción de la variable objetivo y luego interpolar los errores de la predicción mediante *kriging ordinario* para obtener la incertidumbre de la estimación (Odeh et al. 1995). Keskin y Grunwald (2018), afirman que el uso de RK y otras técnicas híbridas brindan información más explícita acerca de la evaluación de la incertidumbre de la predicción de la variable objetivo.

El kriging luego de la regresión, puede mejorar la predicción en comparación con la regresión y el kriging actuando por separado (Keskin y Grunwald 2018).

Inicialmente, se realizó un análisis de correlación de Pearson para determinar las variables que más se relacionan con el COS

hasta 30 cm. Con las variables seleccionadas se especificó el modelo de regresión lineal múltiple, empleando el algoritmo *step-wise regression* para seleccionar automáticamente las variables de mayor capacidad predictiva de la variable de interés. Se verificaron supuestos de normalidad de residuales, homocedasticidad y no multicolinealidad. Una vez especificado el modelo final, se estimó el COS con las covariables ambientales y los errores de la predicción se interpolaron con *kriging ordinario* para obtener la incertidumbre de la estimación, se realizó validación cruzada para calcular medidas de ajuste del modelo.

Se compararon los resultados del modelo RK con la información de stock de COS para Colombia hasta 30 cm de la plataforma *SoilGrids* (Hengl et al. 2014), mediante el cálculo de medidas como el error cuadrático medio (MSE), el error medio absoluto (MAE), el error medio (ME) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE).

Adicional a la validación estadística, el mapa fue evaluado por expertos nacionales en suelos y se comparó con el mapa de COS de *SoilGrids* (Hengl et al. 2014), con resolución espacial de 250 m, para verificar su representatividad para el territorio colombiano.

## Resultados

### Estadísticas descriptivas de COS y densidad aparente

Las medidas descriptivas de la densidad aparente, el COS observado, COS estimado mediante RK y COS reportado en *SoilGrids*, hasta 30 cm de profundidad en los suelos de Colombia, se observan en la **Tabla 3**. El resumen de los modelos empleados y sus medidas de ajuste para la estimación de datos faltantes de densidad aparente se observa en el material suplementario (**Tabla A1** del Apéndice).

Los datos de densidad aparente oscilaron entre 0.05 y 1.79 g cm<sup>-3</sup>, con un promedio de 1.21 g cm<sup>-3</sup> (valores de DA obtenidas por

**Tabla 2.** Covariables ambientales empleadas, fuente y resolución espacial (datos ráster) o escala cartográfica (datos vector).

**Table 2.** Environmental covariates used, source and spatial resolution (raster data) or cartographic scale (vector data).

Fuente	Nombre	Escala/resolución original
IGAC	Elevación, pendiente, índice topográfico de humedad, índice de vegetación, tipo de suelo (orden)	1 Km (ráster) 1:100.000 (vector)
IDEAM-IGAC -IAVH	Coberturas y uso de la tierra (metodología Corine Land Cover, adaptada en Colombia)	1:100.000 (vector)
IDEAM	Índice de aridez, índice de regulación hídrica, producción potencial de sedimentos, inundación máxima, humedad relativa, precipitación, temperatura	1 Km (ráster)
WorldGrids	Temperatura diurna, temperatura nocturna, precipitación, forma del terreno, índices topográficos, radiación solar incidente, índice de área foliar, evapotranspiración, productividad primaria bruta, probabilidad de presencia de Histosoles e índices de vegetación.	1 Km (ráster)

**Tabla 3.** Estadística descriptiva de densidad aparente (g cm<sup>-3</sup>), carbono orgánico observado (Mg ha<sup>-1</sup>), carbono orgánico estimado RK (Mg ha<sup>-1</sup>) y carbono orgánico estimado *SoilGrids* (Mg ha<sup>-1</sup>) hasta 30 cm en suelos de Colombia.

**Table 3.** Descriptive statistics of bulk density (g cm<sup>-3</sup>), observed organic carbon (Mg ha<sup>-1</sup>), estimated organic carbon by RK (Mg ha<sup>-1</sup>) and estimated organic carbon by *SoilGrids* (Mg ha<sup>-1</sup>) up to 30 cm in Colombian soils.

	Min.	Q1	Prom.	Med.	Q3	Máx.	DesvEst.	Curt.	Asim.
DA (g cm <sup>-3</sup> )	0.05	1.06	1.21	1.26	1.40	1.79	0.27	3.89	-0.77
COS observado (t ha <sup>-1</sup> )	0.16	34.30	76.34	55.33	88.53	1214.30	74.66	31.99	3.86
COS estimado RK (t ha <sup>-1</sup> )	10.12	38.14	64.27	51.65	77.19	264.16	39.03	6.32	1.76
COS estimado <i>SoilGrids</i> (t ha <sup>-1</sup> )	34.00	78.00	118.11	105.00	150.00	441.00	52.83	4.23	1.07

Min: valor mínimo. Q1: primer cuartil. Prom: promedio. Med: mediana. Q3: tercer cuartil. Máx: valor máximo. DesvEst: desviación estándar. Curt: curtosis. Asim: asimetría.

funciones de pedotransferencia, se pueden identificar valores muy por debajo de lo normal y por debajo de algunos rangos disponibles en la literatura, especialmente en aquellos suelos con altos contenidos de materia orgánica y pertenecientes al orden de histosoles, sin embargo, estos datos representan menos del 0.1% del total de los perfiles analizados). El valor de asimetría para esta variable es negativo, indicando que los datos se concentran hacia valores altos, lo cual sugiere que la mayor parte del país está dominada por suelos minerales. La asimetría positiva del contenido de COS observado y estimado señala que los datos se concentran hacia valores mayores que el promedio, lo que podría estar condicionado por el tipo de suelo predominante. Según los datos obtenidos a partir del proceso de mapeo digital los rangos de COS para Colombia varían entre 10 y 264 Mg ha<sup>-1</sup> (Fig. 2), variaciones determinadas principalmente por el clima, tipo de suelo y el uso manejo del mismo.

### Covariables ambientales predictoras

Según el modelo ajustado ( $r^2=0.49$  y  $RMSE=0.74$ ), las variables ambientales de mayor importancia para estimar el COS en páramos de Colombia fueron la temperatura media, máxima y mínima, precipitación, radiación solar y el nivel base de la red de canales, derivado del modelo digital de elevación, que presentan los coeficientes de correlación más altos entre las variables predictoras y el COS hasta 30 cm de profundidad (Tabla 4).

### Variabilidad espacial de COS

Los valores de COS dentro de la información reportada en SoilGrids (Tabla 5), muestra un almacenamiento de COS de aproximadamente 12.8 Gt de carbono en los primeros 30 cm profundidad, las regiones Insular y Pacífica muestran los mayores contenidos de COS con un promedio de 194,4 Mg ha<sup>-1</sup> y 193 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, seguidas por la región Andina con 150 Mg ha<sup>-1</sup> y la región de la Amazonia 101 Mg ha<sup>-1</sup>, los valores más bajos

se ubican en la región Caribe (89.9 Mg ha<sup>-1</sup>) y la Orinoquia (77.4 Mg ha<sup>-1</sup>). El ordenamiento de las regiones con relación al carbono almacenado en el suelo se diferencia significativamente en el modelo RK. En primer lugar, se tiene a la región Andina con 83.8 Mg ha<sup>-1</sup>, seguida por la región Pacífica (68.4 Mg ha<sup>-1</sup>), región Amazónica con 47.2 Mg ha<sup>-1</sup>, región Insular (46.5 Mg ha<sup>-1</sup>), y en último lugar las regiones Caribe y Orinoquia con 38.5 y 35.3 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente, para un total de almacenamiento de COS de aproximadamente 6.2 GtC.

Los mapas de distribución espacial de COS, obtenidos del modelo RK y de *SoilGrids* (Fig. 3), muestran mayor cantidad de COS almacenado en los primeros 30 cm de suelo en la zona alta del territorio; no obstante, el modelo RK da cuenta de un alto contenido de COS en la zona occidental, correspondiente a la región fisiográfica del pacífico, que podría estar relacionado con las condiciones climáticas específicas de la zona.

Por su parte la Figura 4 muestra la distribución espacial de la incertidumbre del modelo RK con una oscilación entre 10 y casi 15 Mg ha<sup>-1</sup> para todo el territorio colombiano y su patrón espacial señala mayor incertidumbre hacia la parte noroccidental y nororiental de la región amazónica, así como también la parte norte de la región Pacífica. En general la región Andina, además de presentar los mayores valores de COS hasta 30 cm, también se presenta como la zona del país con menor incertidumbre. La Tabla 6 presenta las medidas de validación cruzada del kriging de los residuales del modelo de regresión lineal múltiple ajustado a los datos.

Finalmente, al comparar los valores observados y predichos con el modelo RK y *SoilGrids* (Tabla 7), se observa que el coeficiente de correlación de Pearson fue superior para el modelo RK con un valor de 0.66 con respecto al modelo de *SoilGrids* con un 0.46. El ME fue más alto cuando se compararon los valores observados con el mapa *SoilGrids*. El RMSE fue de casi 60 Mg ha<sup>-1</sup> para el modelo RK y 81 Mg ha<sup>-1</sup> para el modelo de *SoilGrids*.

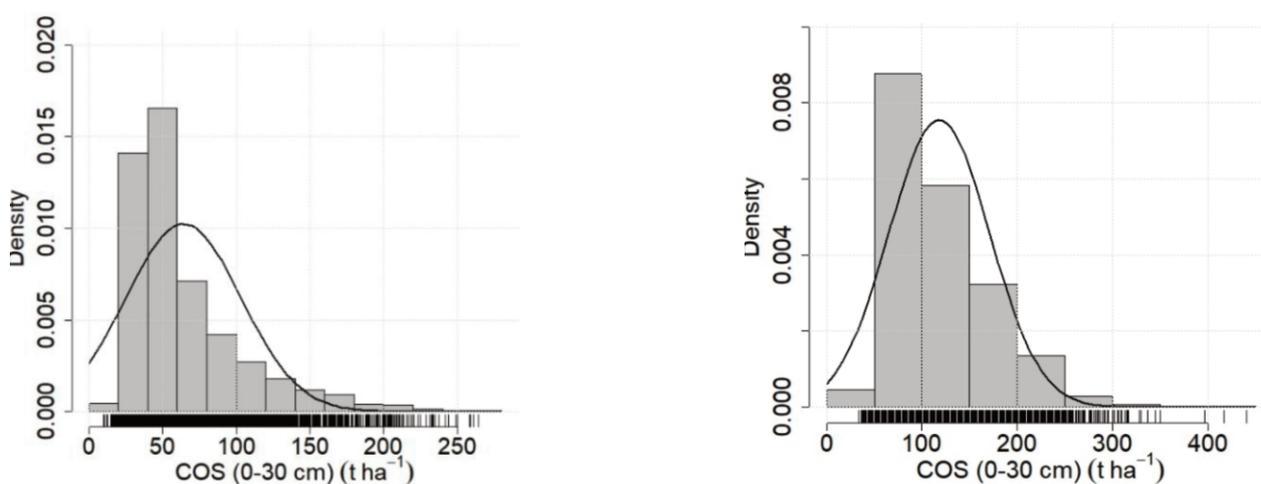


Figura 2. Valores estimados de COS hasta 30 cm, usando RK (izquierda) e información de *SoilGrids* (derecha).

Figure 2. Estimated values of SOC up to 30 cm, using RK (left) and *SoilGrids* information (right).

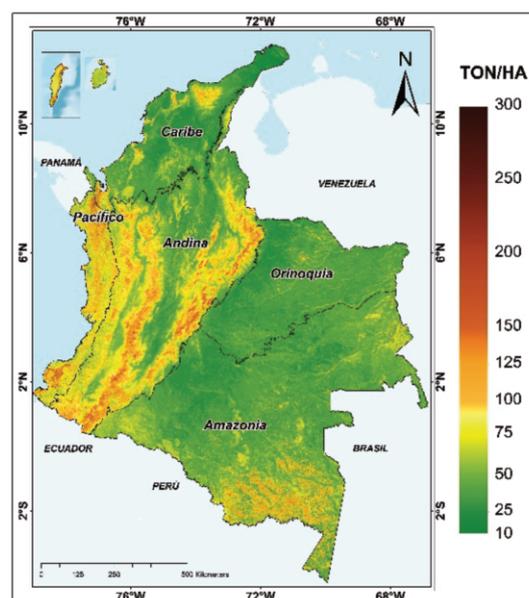
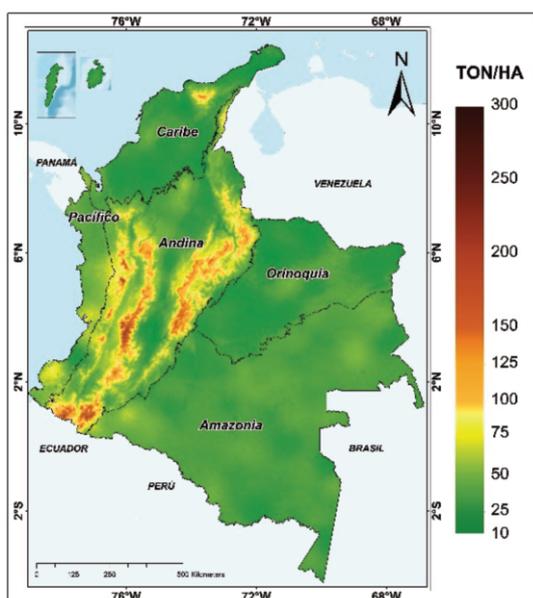
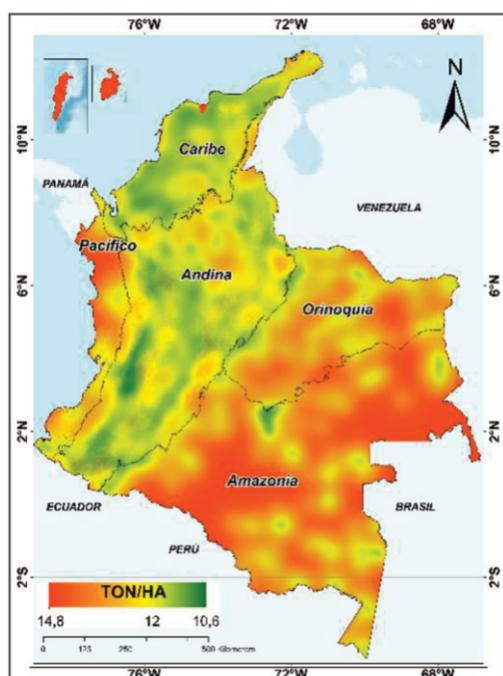
Tabla 4. Coeficiente de correlación de Pearson entre covariables ambientales y COS hasta 30 cm.

Tabla 4. Pearson's correlation coefficient between environmental covariates and COS up to 30 cm.

Covariable ambiental	R
Tx2mod3a	-0.48
Tnlmod3a	-0.45
Tdhmod3a	-0.45
Inssre3a	0.43
Channel Network Base Level	0.41
Inmsre3a	0.39

**Tabla 5.** Valores de COS obtenidos para cada región basados en el modelo RK e información de SoilGrids.**Table 5.** Obtained SOC values for each region based on RK model and SoilGrids information.

REGIÓN	AREA_NETA (ha)	AREA_EFECTIVA* (ha)	REGRESSION KRIGING IGAC					SOIL_GRIDS_250				
			MIN	MAX	RANGO	PROM t.ha <sup>-1</sup>	TOTAL (GtC <sup>**</sup> )	MIN	MAX	RANGO	PROM t.ha <sup>-1</sup>	TOTAL (GtC <sup>**</sup> )
Amazonia	45 663 019.64	44 948 162.69	17.9	175.9	158	47.2	2.1	23	514	491	101	4.5
Andina	32 534 238.66	31 907 319.28	13.7	401.1	387.4	83.8	2.7	21	609	588	150.2	4.8
Caribe	12 056 136.73	11 315 320.54	9.1	262.8	253.7	38.5	0.4	16	633	617	89.8	1
Insular	4971.5	4671.83	43.7	49.5	5.8	46.5	0	115	397	282	194.4	0.0009
Orinoquia	17 695 329.15	17 398 733.28	17.3	79.6	62.3	35.3	0.6	26	415	389	77.4	1.3
Pacífico	6 082 183.54	5 886 518.00	15.2	179.5	164.3	68.4	0.4	44	628	584	193	1.1
TOTAL	11 4035 879.22	111 460 725.62	Almacenamiento Total				6.2	Almacenamiento Total				12.8

**Figura 3.** Mapa de predicción de COS hasta 30 cm, Regression Kriging (Izquierda), SoilGrids(Derecha).**Figure 3.** SOC Prediction Map up to 30 cm, Regression Kriging (Left), SoilGrids(Right).**Figura 4.** Mapa de incertidumbre de predicción de COS para Colombia.**Figure 4.** SOC prediction uncertainty map for Colombia.**Tabla 6.** Medidas de validación cruzada de la interpolación de residuales para el modelo de regresión ajustado.**Table 6.** Cross-validation measurements of residual interpolation for the fitted regression model.

Medida	Valor
ME	0.0008179
MAE	0.5584
MSE	0.5503
MSNE	1.112
R Obs-Pred	0.584
R Pred-Res	-0.02298
RMSE	0.7418
RMSE_sd	0.8119
URMSE	0.7418
IQR	0.8712

**Tabla 7.** Medidas de comparación entre valores observados y predichos con el modelo RK y SoilGrids.**Table 7.** Comparison measurements between observed and predicted values with the RK model and SoilGrids.

Insumo	R	ME	MAE	MSE	RMSE
Mapa SoilGrids	0.46	41.83	60.73	64.775.728	80.48
Modelo RK	0.66	-12.41	31.11	34.115.622	58.41

## Discusión

Los valores de COS determinados en el presente trabajo, permiten tener una visión de la distribución en el territorio de esta propiedad. Lo anterior se basó en la recopilación y utilización de los datos existentes de suelos (4329 perfiles) y la utilización de covariables ambientales relacionadas principalmente con la temperatura, el brillo solar y la elevación del terreno (Tx2mod3a, Tn1mod3a, Tdhmod3a, Inssre3a, Channel Network Base Level y Inmsre3a), concordando con lo reportado por [Guevara et al. \(2018\)](#) y [Loayza et al. \(2020\)](#), en el caso de Ecuador.

### Estimación del COS en Colombia

Uno de los objetivos fundamentales del presente trabajo es apoyar los compromisos del país en el tema de cambio climático para tal fin se consultaron reportes realizados a nivel internacional en el tema y se compararon con los datos obtenidos a través del mapeo con RK, uno de estos esfuerzos es el realizado por [Hengl et al. 2014](#), los cuales presentaron *SoilGrids*, un sistema de información global de suelos en 3D con una resolución de 250 m, contiene predicciones espaciales para una selección de propiedades del suelo (a seis profundidades estándar) entre ellas el COS ( $\text{g kg}^{-1}$ ) y el stock de COS ( $\text{t ha}^{-1}$ ), estos autores se basan en modelos de predicción espacial global junto a bases de datos internacionales de perfiles de suelos (aproximadamente 110 000 perfiles de suelos) y una selección de 75 covariables ambientales globales que representan factores de formación del suelo.

Para el caso de Colombia este insumo muestra un almacenamiento de COS de aproximadamente 12.8 Gt de carbono hasta 30 cm de profundidad, sin embargo, estos valores reflejan una sobreestimación en general del territorio colombiano, de acuerdo a lo revisado en cada región, y apoyados en datos de investigaciones realizadas en las diferentes áreas.

Para la validación cruzada de los resultados del mapa de COS RK y *SoilGrids* con los valores observados, el ME fue más alto para el mapa *SoilGrids* (41.83), lo que señala que la información consignada en este mapa tiende a sobreestimar los valores para Colombia de COS. Es así que el modelo RK (ME= -12.41) explica mejor la distribución espacial de COS en Colombia. Sin embargo, las zonas con mayor incertidumbre y por consiguiente menor precisión del modelo RK, se ubican hacia la parte norte de la región Pacífica, así como la parte noroccidental y nororiental de la región amazónica; lo que puede asociarse a la baja densidad de datos disponibles para el mapeo en estas zonas, ya que por ser zonas con coberturas vegetales asociadas en su mayoría a bosques densos tienen poca accesibilidad para la toma y captura de información. En general la región Andina, también se presenta como la zona del país con menor incertidumbre y mayor precisión del modelo RK. A este respecto, [Kempen et al. \(2019\)](#), sugieren que una distribución adecuada de puntos, bajo un esquema de muestreo no probabilístico, repercute en la obtención de incertidumbres bajas y una mejor capacidad predictiva.

### COS en las regiones fisiográficas de Colombia

De acuerdo a los datos obtenidos a través del mapeo digital con RK en Colombia, la región natural con los mayores contenidos de COS es la Andina con un promedio de 84  $\text{Mg ha}^{-1}$  en los primeros 30 cm de profundidad, un máximo de 400  $\text{Mg ha}^{-1}$  y un mínimo de

13  $\text{Mg ha}^{-1}$ , comparados con los obtenidos con *SoilGrids* en la cual se reportan 150.2  $\text{Mg ha}^{-1}$  promedio de COS, un máximo de 609  $\text{Mg ha}^{-1}$  y un mínimo de 21  $\text{Mg ha}^{-1}$ , evidenciando un incremento en el dato del contenido de COS del 77%. Esta región se caracteriza por su diversidad climática, tipos de suelos y alto grado de intervención (MADS 2014; IGAC 2019). Los suelos pertenecen al orden Andisol y aquellos con características similares ocupan 11 millones de hectáreas (IGAC 2014). Según [Buytaert et al. \(2006\)](#) constituyen en un enorme reservorio de carbono orgánico. [Rojas et al. \(2018\)](#) reportan para suelos del paisaje alto andino (Santa Isabel, Tolima) un almacenamiento de COS a 40 cm de profundidad en suelos bajo sistemas nativos un contenido de 122.4  $\text{Mg ha}^{-1}$ , en cultivos agrícolas 79.8  $\text{Mg ha}^{-1}$  y 79.6  $\text{Mg ha}^{-1}$  en sistemas silvopastoriles, coincidiendo estos últimos con el almacenamiento promedio para la región según lo obtenido con RK.

Por otro lado [Montes et al. \(2016\)](#) con el objetivo de determinar el secuestro del COS a tres profundidades bajo dos tipos de uso del suelo en el páramo de Sumapaz (Cundinamarca), reporta promedios del COS bajo la cobertura vegetal natural de 188  $\text{Mg ha}^{-1}$  a 25 cm, 183  $\text{Mg ha}^{-1}$  a 50 cm, y 178  $\text{Mg ha}^{-1}$  a profundidades del suelo inferiores a 50 cm de igual manera para los cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.), el almacenamiento de COS de 119  $\text{Mg ha}^{-1}$  a 25 cm, 83  $\text{Mg ha}^{-1}$  a 50 cm, y 71.8  $\text{Mg ha}^{-1}$  a profundidades del suelo inferiores a 50 cm, valores que muestran relación con lo obtenido en el presente trabajo. Según [Loayza et al. \(2020\)](#) en Ecuador las áreas de alto COS reportan valores entre 80-120  $\text{Mg ha}^{-1}$ , las cuales bordean el paisaje andino y muy alto COS (>120  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) en la sierra Andina donde el clima frío y las temperaturas entre -3 y 18°C, y los suelos de origen volcánicos (Andisoles) han favorecido la formación de abundante vegetación que aporta residuos al suelo, coincidiendo con los datos en la zona andina colombiana.

La alta capacidad de almacenamiento de carbono en los Andisoles, está asociada a los altos contenidos de Al y Fe y la formación de complejos estables entre estos metales y el humus ([Crow et al. 2014](#)). Lo anterior se ve favorecido por la temperatura, principalmente en las zonas de alta montaña. [Wang et al. \(2010\)](#), reportan que temperaturas bajas inhiben la actividad enzimática de microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica, posibilitando una mayor acumulación de COS. En total esta región posee un almacenamiento aproximado de COS en los primeros 30 cm de profundidad de 2.7 Gt de carbono orgánico.

Esta región es la de mayor intervención en el país cercana a un 70% de su territorio (IGAC 2014), por lo cual si la gestión agrícola y pecuaria no es sostenible (sistemas de monocultivos, uso extensivo de labranza y utilización intensiva de insumos químicos entre otros), se afectarán las funciones ecosistémicas del suelo, entre ellas el almacenamiento de carbono ([Orrego y del Valle 2001](#)).

La Región Pacífica de acuerdo al mapa obtenido por RK presenta un contenido promedio de almacenamiento de carbono de 68.4  $\text{Mg ha}^{-1}$  en los primeros 30 cm de profundidad, y un contenido máximo 179.5  $\text{Mg ha}^{-1}$  y mínimo de 15.2  $\text{Mg ha}^{-1}$  en contraste con los datos obtenidos a partir de *SoilGrids*, la cual reporta un promedio de COS de 193  $\text{Mg ha}^{-1}$  a 30 cm de profundidad, un contenido máximo 628  $\text{Mg ha}^{-1}$  y mínimo de 44  $\text{Mg ha}^{-1}$ , estos valores permiten identificar una diferencia de 1.8 veces el dato entre los dos sistemas de mapeo. En esta región los contenidos más altos de COS están asociados a los suelos presentes en las áreas de manglar

donde el aporte de material orgánico es constante y proceso de descomposición es afectado por las condiciones anaeróbicas del medio. De acuerdo a lo anterior [Valdes et al. \(2011\)](#), con el objetivo de determinar el contenido de COS en los primeros 20 cm del suelo en áreas de manglar de Marismas Nacionales en Nayarit (México), evaluaron esta propiedad teniendo en cuenta la vegetación presente (asociación de manglar) para las especies *A. germinans*, *L. racemosa*, y *R. mangle* con valores de 81.4 Mg ha<sup>-1</sup>, 96.6 Mg ha<sup>-1</sup> y 81.5 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente y de acuerdo a la posición geomorfológica donde se desarrollan los suelos Barra 57.9 Mg ha<sup>-1</sup>, Orilla 91 Mg ha<sup>-1</sup>, Isla 125.9 Mg ha<sup>-1</sup> y Cuenca 85.7 Mg ha<sup>-1</sup>. Estos valores se encuentran dentro de los reportados para la región pacífica en el mapeo realizado por RK.

La variación en los contenidos de carbono está dada en mayor proporción por el tipo de suelo, la posición geomorfológica y el clima; lo anterior concuerda con lo reportado por [Sasmith et al. \(2020\)](#), quienes relacionan altos contenidos de CO en la planicie fluvio-marina y aluvial a lo largo de la costa en las áreas de manglar en Histosoles y en el paisaje de montaña en sectores con presencia de Andisoles. Cabe mencionar la importancia del nivel base de la red de canales variable predictora de la distribución de COS. Para [Bock y Kothe \(2008\)](#), el nivel base de la red de canales es esencial para predecir la profundidad de los suelos hidromórficos influenciados por la escorrentía del subsuelo y las aguas subterráneas, de manera que la información, da cuenta del movimiento del agua subsuperficial ([Olaya y Conrad 2009](#)), lo cual influye significativamente en el valor de COS. En total esta región almacena aproximadamente 0,4 Gt de carbono orgánico.

En la Región Amazónica el contenido promedio de COS estimado mediante RK de 47.2 Mg ha<sup>-1</sup> en los primeros 30 cm de profundidad, con un contenido máximo 158 Mg ha<sup>-1</sup> y mínimo de 17.9 Mg ha<sup>-1</sup>; en el caso de los datos obtenidos de *SoilGrids* el COS promedio se estableció en 101 Mg ha<sup>-1</sup>, el valor máximo en 514 Mg ha<sup>-1</sup> y mínimo de 23 Mg ha<sup>-1</sup>, evidenciando una diferencia entre las dos superficies generadas de 100%. Según [Guallo \(2018\)](#), con el objetivo de caracterizar el secuestro de carbono como servicio ecosistémico en tres usos de la tierra (sistema agroforestal, monocultivo, y un bosque secundario) ubicados en la cuenca media del río Napo, región Amazónica ecuatoriana encontró, valores de almacenamiento de carbono entre 49.78 Mg ha<sup>-1</sup> y 62.94 Mg ha<sup>-1</sup> para cacao agroforestal, 51.78 y 73.15 Mg ha<sup>-1</sup> para cacao monocultivo y de 158.77 Mg ha<sup>-1</sup> en bosque secundario. Por otro lado, [Kanninen \(2003\)](#), reporta almacenamiento de COS de bosques tropicales entre 60 Mg ha<sup>-1</sup> y 115 Mg ha<sup>-1</sup>.

Al comparar los datos producto de las investigaciones citadas con los valores promedio obtenidos por RK se observa una estimación baja, lo cual puede ser originado por que en algunos de los perfiles descritos en la zona y tomados como insumo del mapeo no reportaban la presencia de capas orgánicas en la superficie de los suelos las cuales son comunes en este tipo de áreas. De igual manera la incertidumbre asociada a esta área es una de las más altas en el país por la baja densidad de puntos de muestreo, esto evidencia la necesidad de priorizar estas áreas para monitoreo. En total esta región almacena aproximadamente 2.1 Gt CO.

La Región Caribe presenta un contenido promedio de carbono de 38.5 Mg ha<sup>-1</sup> en los primeros 30 cm de profundidad, y un valor máximo de 253.7 Mg ha<sup>-1</sup> y mínimo de 9.1 Mg ha<sup>-1</sup>, el almacenamiento de carbono determinado en el sistema *SoilGrids* es de 89.8 Mg ha<sup>-1</sup>, promedio, un máximo de 633 Mg ha<sup>-1</sup> y 16 Mg ha<sup>-1</sup> mínimo. [Conteras et al. \(2020\)](#) con el objeto de cuantificar la cantidad de carbono acumulado en el suelo bajo sistemas silvopastoriles en la región Caribe de Colombia y medir sus efectos sobre algunas propiedades físicas del suelo, mostraron que en promedio los arreglos silvopastoriles presentaron una acumulación de carbono que varió entre 60.6 y 65.1 Mg.ha<sup>-1</sup>, en comparación con el sistema tradicional ganadero, de pasturas sin árboles, en el cual se detectó una acumulación de 38.3 Mg.ha<sup>-1</sup>. De igual manera [Vásquez et al. \(2011\)](#) determinó contenidos de carbono orgánico en diferentes tipos de uso del suelo a una profundidad de 20 cm, así los suelos de bos-

ques presentan una acumulación media de de 42.4 Mg ha<sup>-1</sup> frente a 33.8 Mg ha<sup>-1</sup> en los suelos cultivados. Estos resultados presentan una alta concordancia con el contenido carbono promedio de determinado con RK.

En esta región predominan los bajos niveles de carbono determinados principalmente por el clima (cálido árido, muy seco y seco) y el uso del suelo presentando un 30% de sobreutilización ([IGAC 2014](#)), donde la vegetación es escasa y los procesos de mineralización son rápidos ([Moinet et al. 2020](#)); los contenidos medios de COS en estas áreas están asociados a incrementos de humedad y desarrollo de vegetación, sus suelos dominantes son los Molisoles, Vertisoles y Alfisoles. Los altos contenidos de COS de esta región son reportados en las zonas de manglar donde dominan principalmente los Histosoles, de acuerdo a lo reportado por [IGAC \(2018\)](#), de máximo 241,22 Mg ha<sup>-1</sup> y un promedio de 195 Mg ha<sup>-1</sup>. El manejo inadecuado de los recursos según lo reportado por [IDEAM y UDCA \(2015\)](#), describen a la Región Caribe como una de la más susceptibles a presentar problemas de erosión y salinización, ya que, en departamentos como Magdalena, Atlántico, Cesar y La Guajira se concentra la mayoría de los suelos con degradación severa y muy severa.

La Región de la Orinoquia presenta un contenido promedio de carbono de 35.3 Mg ha<sup>-1</sup> en los primeros 30 cm de profundidad, un valor máximo de 62.3 Mg ha<sup>-1</sup> y mínimo de 17.3 Mg ha<sup>-1</sup>, según los datos obtenidos de *SoilGrids*, el COS promedio se estableció en 77.4 Mg ha<sup>-1</sup>, el valor máximo en 415 Mg ha<sup>-1</sup> y mínimo de 26 Mg ha<sup>-1</sup>, evidenciando una diferencia entre los dos superficies generadas de 100%. En general los contenidos de carbono son bajos para esta región, relacionados con condiciones de alta temperatura y precipitación y con los materiales de los cuales se originan sus suelos, con mayor grado de evolución: como Oxisoles, Inceptisoles óxicos y Ultisoles cándicos en su mayoría. Las pocas áreas con contenidos medios de COS están relacionadas con zonas de alta saturación de humedad y sin ningún tipo de intervención antrópica, donde los procesos de acumulación de la materia orgánica han primado sobre la mineralización ([Wang et al. 2010](#)). En general, la Orinoquia colombiana es una gran reserva de recursos: edáficos, energéticos, mineros, agrícolas, pecuarios y de biodiversidad; son ecosistemas frágiles dada su alta susceptibilidad a la degradación.

La utilización de maquinaria e implementos inapropiados que, por efectos de la intensidad de las precipitaciones, ocasionan daños severos a la estructura del suelo; estos problemas conducen al sellamiento de la capa superficial reduciendo las tasas de infiltración, flujo de aire y agua, repercutiendo en la disponibilidad de nutrientes y en la formación de cobertura vegetal ([Armenise et al. 2018](#)). Así mismo, la compactación de los suelos generada por el pisoteo del ganado, impide la infiltración del agua en el suelo proveniente las lluvias o de riego, que fluye rápidamente a los arroyos, quebradas y cuerpos de agua, arrastrando las partículas de suelo y, con ellas, el COS, produciendo erosión. En la Región de la Orinoquia, los procesos de erosión se vienen manifestando desde la colonización con la introducción de la ganadería vacuna sobre sabanas naturales sin manejos sostenibles ([IDEAM y UDCA 2015](#)).

La caracterización del estado de COS en los primeros 30 cm de profundidad presentada en este estudio ha sido incluida como anexo de información de este indicador en el séptimo informe presentado por Colombia ante la convención de las Naciones Unidas contra la Desertificación dentro del objetivo estratégico N1. *Mejorar el estado de los ecosistemas afectados, combatir la desertificación o degradación de la tierra, promover la ordenación sostenible de la tierra y contribuir a la neutralidad en la degradación de la tierra*, específicamente en el indicador SO1-3 *Tendencias en la reserva de carbono en la superficie y en el suelo*.

## Conclusiones

El COS en Colombia estimado a través de técnicas de mapeo digital a una profundidad superficial de 0 - 30 cm, es de 6.2 Gt, evidenciando subestimación en la región de la amazónica.

En Colombia los mayores contenidos de carbono se encuentran asociados a los suelos presentes en las áreas de las cordilleras, derivados de los materiales parentales que los componen (cenizas volcánicas y materiales orgánicos) y de los climas presentes, dependiendo de sus condiciones de altitud. Los menores valores de COS se encuentran asociados a las áreas con altas precipitaciones y altas temperaturas donde se encuentran los suelos de mayor evolución pertenecientes al arden oxisol y ultisol.

Capas de información relacionadas con temperatura Tx2mod3a (-0.48), Tn1mod3a (-0.45), Tdhmod3a (-0.45), radiación solar Insre3a (-0.43), Inmsre3a (-0.39) y el nivel base de canales (-0.41) resultaron las covariables más importantes para estimar COS en Colombia. A través del mapeo digital con RK se desarrolló una metodología para la cartografía del COS, con la ventaja de disminuir su incertidumbre con la incorporación de nuevos datos de muestreo o nuevas covariables que ayuden a explicar el fenómeno.

La posibilidad de obtener mapas con la incertidumbre asociada, permitirá a los planificadores del territorio establecer zonas para el desarrollo de nuevos muestreos.

La realización de este tipo de trabajos a nivel nacional con el apoyo de instituciones como la FAO permite capacitar a profesionales en el área de suelos del país, en técnicas de mapeo digital, que permitirán generar conocimientos en el territorio de diferentes propiedades de los suelos.

El mapa generado se convirtió en insumo como apoyo a los compromisos de país, como anexo en el séptimo informe presentado por Colombia ante la convención de las Naciones Unidas contra la Desertificación, siendo considerado como principal fuente de consulta sobre contenido de carbono orgánico en la superficie de los suelos del país.

## Contribución de los autores

Adriana Bolívar: Conceptualización, Investigación, Curado de datos, Análisis de datos, Software, Redacción - manuscrito original, Visualización, Redacción - revisión y edición. Camilo Camacho: Conceptualización, Investigación, Curado de datos, Análisis de datos, Software, Redacción - manuscrito original, Visualización, Redacción - revisión y edición. Napoleón Ordoñez: Conceptualización, Adquisición de fondos, Administración del proyecto, Recursos, Supervisión. Joan Gutiérrez: Redacción - manuscrito original, Visualización, Análisis de datos, Redacción - revisión y edición. Germán Álvarez: Adquisición de fondos, Administración del proyecto, Recursos. Mario Guevara: Conceptualización, Software, Metodología, Validación, Redacción - revisión y edición. Carolina Olivera: Conceptualización, Redacción - revisión y edición, Recursos, Administración del proyecto. Guillermo Federico Olmedo: Conceptualización, Software, Metodología, Validación, Redacción - revisión y edición. Sally Bunning: Adquisición de fondos, Recursos. Ronald Vargas: Adquisición de fondos, Recursos.

## Agradecimientos

Esta iniciativa fue apoyada por la Alianza Global por el Suelo y la Alianza Suramericana por el Suelo, ambos patrocinados por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

M.G. agradece una beca de CONACyT de México (382790) para estudios de doctorado.

Al equipo de profesionales del IGAC por su colaboración y apoyo en la colecta de la información de suelos que sirvió como insumo para esta investigación.

## Referencias

Alarcón-Hincapié J.C. 2017. *EL cambio climático como factor transformador del territorio*. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/60117/79558538.2017.pdf?sequence=1>

- Armenise, E., Simmons, R.W., Ahn, S., Garbout, A., Doerr, S.H., Mooney, S.J., Sturrock, C.J., Ritz, K. 2018. Soil seal development under simulated rainfall: Structural, physical and hydrological dynamics. *Journal of Hydrology* 556: 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.073>
- Batjes, N.H., Ribeiro, E., Oostrum, V.A. 2020. Datos de perfil de suelo estandarizados para respaldar el mapeo y el modelado global (instantánea WoSIS 2019). *Earth System Science Data* 12, 299–320, <https://doi.org/10.5194/essd-12-299-2020>
- Bishop, T.F.A., McBratney, A.B., Laslett, G.M. 1999. Modeling soil attribute depth functions with equal-area quadratic smoothing splines. *Geoderma* 91: 27-45. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00003-8)
- Bock, M., Kothe, R. 2008. Predicting the Depth of hydromorphic Soil Characteristics influenced by Ground Water. En: Böhner, J., Blaschke, T., Montanarella, L. (eds.), *SAGA - Seconds out*, pp. 13-22. Hamburgo, Alemania.
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., Hofstede, R. 2006. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews* 79, 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Contreras-Santos, J.L., Martínez-Atencia, J., Cadena-Torres, J., Falla-Guzmán, C.K. 2020. Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del Caribe colombiano. *Agronomía Costarricense* 44(1), 29-41. <https://dx.doi.org/10.15517/rac.v44i1.39999>
- Crow, S.E., Reeves, M., Schubert, O.S., Sierra, C.A. 2015. Optimization of method to quantify soil organic matter dynamics and carbon sequestration potential in volcanic ash soils. *Biogeochemistry* 123: 27-47. <https://doi.org/10.1007/s10533-014-0051-6>
- FAO 2017a. Liberación del potencial del carbono orgánico del suelo. En: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ed.), Documento de resultados del Simposio internacional sobre el carbono orgánico del suelo 21-23 de marzo de 2017, pp. 40. FAO, Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i7268s/i7268s.pdf>
- FAO 2017b. *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Italia.
- FAO, ITPS 2020. *Global Soil Organic Carbon Map (V1.5) Technical Report*. FAO, Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/3/ca7597en/ca7597en.pdf>
- Feller, C., Albrecht, A., Blanchart, E., Cabidoche, Y.M., Chevallier, T., Hartmann, C., Eschenbrenner, V., et al. 2001. Soil organic carbon sequestration in tropical areas. General considerations and analysis of some edaphic determinants for Lesser Antilles soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 61: 19-31. <https://doi.org/10.1023/A:1013359319380>
- Forkuor, G., Hounkpatin, O.K.L., Welp, G., Thiel, M. 2017. High resolution mapping of soil properties using Remote Sensing variables in southwestern Burkina Faso: A comparison of machine learning and multiple linear regression models. *PLoS ONE* 12: 1-21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170478>
- Guallo Aguinda, N.G. 2018. *Secuestro de carbono como servicio ecosistémico en distintos usos de la tierra en la cuenca media del río Napo, región Amazónica Ecuatoriana*. Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador. pp 48. <https://repositorio.uea.edu.ec/handle/123456789/425>
- Guevara, M., Federico Olmedo, G., Stell, E., Yigini, Y., Aguilar Duarte, Y., Arellano Hernández, C., Arévalo, G.E. et al. 2018. No silver bullet for digital soil mapping: Country-specific soil organic carbon estimates across Latin America. *Soil* 4: 173-193. <https://doi.org/10.5194/soil-4-173-2018>
- Gutiérrez, J., Ordoñez, N., Bolívar, A., Bunning, S., Guevara, M., Medina, E., Olivera, C. et al. 2020. Estimación del carbono orgánico en los suelos de ecosistema de páramo en Colombia. *Ecosistemas* 29(1), 1855. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1855>
- Hengl, T., de Jesus, J.M., MacMillan, R.A.R., Batjes, N.N.H., Heuvelink, G.G.B.M., Ribeiro, E., et al. 2014. SoilGrids1km — Global Soil Information Based on Automated Mapping Bond-Lamberty, B. (ed.). *PLoS ONE* 9: e105992. <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0105992>
- Hurtado, G., González, O., Cadena, M., Benavides, H., Ruiz, F., Montealegre, E., et al. 2017. *Atlas climatológico de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá D.C.
- Hurtado-Montoya, A.F., Mesa-Sánchez, Ó.J. 2014. Reanalysis of monthly precipitation fields in Colombian territory. *Dyna* 81: 251. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n186.40419>
- IDEAM, UDCA 2015. *Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia* [Audiovisual], IDEAM, UDCA, Bogotá, Colombia.

- IDEAM, UNAL 2018. *Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia*, IDEAM, UNAL, Bogotá, Colombia. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf>
- IGAC 2014. *Manejo de Suelos Colombianos*. Subdirección de Agrología. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- IGAC 2016. *Suelos y Tierras de Colombia*. Subdirección de Agrología. Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- IGAC 2018. *Análisis de resultados del contenido de carbono orgánico en los suelos de ecosistemas de páramos y humedales de Colombia*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Instituto Alexander Von Humboldt. pp294. Bogotá, Colombia.
- IGAC 2019. *Colombia, un país con una diversidad de suelos ignorada y desperdiciada*. [Consultado el 18 de junio de 2020]. Disponible en: <https://igac.gov.co/es/noticias/colombia-un-pais-con-una-diversidad-de-suelos-ignorada-y-desperdiciada>
- IPCC 2006. Agriculture, Forestry and Other Land Use. En: Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (eds.), *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 4*. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Hayama, Japón. Disponible en: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- Jenny, H. 1941. *Factors of soil formation—A System of Quantitative Pedology*. Dover Publications, New York, Estados Unidos.
- Kanninen, M. 2003. *Secuestro de carbon en bosques, su papel en el ciclo global*. En: Sánchez, M.D., Rosales Méndez, M. (eds.), *Agroforestería para la Producción Animal en América Latina - II - Memorias de la Segunda Conferencia Electrónica (Agosto de 2000-Marzo de 2001)*. Disponible en: <http://www.fao.org/3/y4435s/y4435s09.htm#bm9>
- Kempen, B., Dalsgaard, S., Kaaya, A.K., Chamuya, N., Ruipérez-González, M., Pekkarinen, A., Walsh, M.G. 2019. Mapping topsoil organic carbon concentrations and stocks for Tanzania. *Geoderma* 337, 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.011>
- Keskin, H., Grunwald, S. 2018. Regression kriging as a workhorse in the digital soil mapper's toolbox. *Geoderma* 326, 22-41. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.04.004>
- Lefevre, C., Rekić, F., Alcantara, V., Wiese, L. 2017. What are the global SOC stocks? En Wiese, L., Alcantara, V., Baritz, R., Vargas, R. (eds.), *Soil Organic Carbon The Hidden Potential*, pp. 90. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Roma, Italia. <https://doi.org/10.1038/nrg2350>
- Loayza, V., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., Vargas, R., et al. 2020. Mapeo digital de carbono orgánico en suelos de Ecuador. *Ecosistemas* 29(1):1852. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1852>
- MADS 2007. *Tercer Informe Nacional de Implementación de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Sequía*. 64. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/>
- MADS 2014. *Caracterización de las regiones para la preparación de la EN-REDD+*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, Bogotá, Colombia. Disponible en: [https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Documentos-Redd/021013\\_anexo\\_1b2\\_caracterizacion\\_regiones.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Documentos-Redd/021013_anexo_1b2_caracterizacion_regiones.pdf)
- Martin, M.P., Wattenbach, M., Smith, P., Meersmans, J., Jolivet, C., Boulonne, L., Arrouays, D. 2011. Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France. *Biogeosciences* 8: 1053-1065. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1053-2011>
- McBratney, A.B., Mendonça-Santos, M.L., Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3–52. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- McBratney, A.B., Minasny, B., MacMillan, R.A., Carré, F. 2011. Mapeo digital de suelos. En: Li, H., Sumner, M. (eds.), *Handbook of Soil Science*, pp. 1-45. CRC Press, Florida, Estados Unidos.
- Mendivelso, D., Romero, J., Gómez, F., Polo, S., Díazgranados, D. 2016. El medio biofísico y su relación con los suelos y las tierras del país. En: IGAC (ed.), *Suelos y Tierras de Colombia*, pp. 79 – 418. Subdirección de Agrología. Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Moinet, G.Y.K., Moinet, M., Hunt, J.E., Rumpel, C., Chabbi, A., Millard, P. 2020. Temperature sensitivity of decomposition decreases with increasing soil organic matter stability. *Science of the Total Environment* 704: 135460. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135460>
- Montes, C., Ramos, J., San José, A. 2016. Estimation of soil organic carbon (SOC) at different soil depths and soil use in the Sumapaz paramo, Cundinamarca, Colombia. *Acta Agronómica*, 66(1), 95–101. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n1.53171>
- Odeh, I.O.A., McBratney, A.B., Chittleborough, D.J. 1995. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. *Geoderma* 67, 215–226. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061\(95\)00007-B](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(95)00007-B)
- Olaya, V., Conrad, O. 2009. Geomorphometry in SAGA. En: Hengl, T., Reuter, H. (eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Application*, pp. 293-308. Elsevier, Budapest, Hungría.
- Orrego, S., del Valle, J.I. 2001. Existencias y Tasas de Incremento Neto de la Biomasa y del Carbono en Bosques Primarios y Secundarios de Colombia. En: *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales 18 al 20 de octubre de 2001 Valdivia - Chile*. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11262>
- Ponce-Hernandez, R., Marriot, F.H.C., Beckett, P.H.T. 1986. An improved method for reconstructing a soil profile from analyses of a small number of samples. *Journal of Soil Science* 37: 455-467. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1986.tb00377.x>
- Rojas, A.S., Andrade, H.J., Segura M.A. 2018. ¿Son los suelos de paisajes alto-andinos de Santa Isabel (Tolima, Colombia) sumideros de carbono orgánico? *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica* 21(1): 51-59. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n1.2018.662>
- Sasmith, S.D., Kuzyakov, Y., Lubis, A.A., Murdiyarsa, D., Hutley, L.B., Bachri, S., et al. 2020. Organic carbon burial and sources in soils of coastal mudflat and mangrove ecosystems. *Catena* 187: 104414. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104414>
- Stockmann, U., Padarian, J., McBratney, A., Minasny, B., de Brogniez, D., Montanarella, L., et al. 2015. Global soil organic carbon assessment. *Global Food Security* 6: 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2015.07.001>
- Valdés, V.E., Valdez, H.I., Ordaz, C.V., Gallardo Lancho, J.F., Pérez Nieto, J., Ayala Sánchez, C. 2011. Evaluación del carbono orgánico en suelos de los manglares de Nayarit. *Revista mexicana de ciencias forestales* 2(8), 47-58.
- Walkley, A., Black, I. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37, 29–37. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wang, X., Li, X., Hu, Y., Lv, J., Sun, J., Li, Z., Wu, Z. 2010. Effect of temperature and moisture on soil organic carbon mineralization of predominantly permafrost peatland in the Great Hing'an Mountains, Northeastern China. *Journal of Environmental Sciences* 22: 1057-1066. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60217-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60217-5)

## Apéndice

**Tabla A1.** Resumen de funciones de pedotransferencia ajustadas para estimación de densidad aparente.

**Table A1.** Summary of fitted pedotransfer functions to estimate bulk density missing data.

DEPARTAMENTO	Coeficientes				Medidas de ajuste				
	A	Ar	L	Int.	r	R2	R2 ajustado	Error típico	Obs
Antioquia	-0.156	-0.002	0	1.417	0.608	0.369	0.365	0.243	443
Arauca	-0.137	0.001	0.002	1.52	0.647	0.419	0.409	0.138	179
Cauca	-0.072	-0.001	0.002	1.385	0.691	0.478	0.473	0.25	347
Cesar	-0.145	0	-0.002	1.636	0.636	0.404	0.375	0.15	66
Cundinamarca	-0.177	-0.002	-0.002	1.632	0.676	0.456	0.448	0.252	194
Guainía	-0.123	-0.003	-0.005	1.682	0.657	0.431	0.384	0.18	40
Guajira	-0.111	0.005	0.007	1.197	0.723	0.523	0.47	0.105	31
Guaviare	-0.138	0.005	-0.003	1.419	0.656	0.43	0.419	0.227	162
Huila	-0.056	0.008	0.014	0.652	0.709	0.503	0.493	0.323	155
Putumayo	-0.033	-0.001	0.001	0.963	0.741	0.549	0.538	0.165	127
Risaralda	-0.007	-0.037	-0.036	3.452	0.893	0.798	0.737	0.095	14
Santander	-0.052	0.001	0.006	0.97	0.739	0.546	0.46	0.139	20
Vaupés	-0.182	-0.006	-0.01	2.042	0.755	0.57	0.547	0.166	59
Vichada	-0.16	0.001	-0.001	1.527	0.667	0.445	0.435	0.188	175