

Mapeo digital de carbono orgánico en suelos de Ecuador

V. Loayza^{1,2,*}, V. Sevilla³, C. Olivera⁴, M. Guevara⁵, G. Olmedo⁶, R. Vargas⁴, C. Oyonarte^{7,8}, W. Jiménez¹

(1) Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Dirección de Generación de Geoinformación Agropecuaria. Av. Amazonas y Av. Eloy Alfaro, Quito 170516, Ecuador.

(2) Punto Focal del Pilar 4 de la Alianza Mundial por el Suelo en Ecuador (MAG), Av. Amazonas y Av. Eloy Alfaro, Quito 170516, Ecuador.

(3) Instituto de Edafología. Universidad Central de Venezuela. Avenida Universidad, Maracay 2103, Aragua, Venezuela.

(4) Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Vialle de Terme di Caracalla, Roma, Italia.

(5) Department of Plant and Soil Sciences, University of Delaware, Newark, DE 19716, Estados Unidos.

(6) Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Hurlingham, Buenos Aires, Argentina.

(7) Departamento de Agronomía, Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global (CAESCG). Ctra. Sacramento, s/n, 04120 La Cañada de San Urbano, Almería, Almería, España.

(8) Universidad de Almería, España. Ctra. Sacramento, s/n, 04120 La Cañada de San Urbano, Almería, Almería, España.

* Autor de correspondencia: V. Loayza [veronica_loayza@yahoo.es]

> Recibido el 24 de septiembre de 2019 - Aceptado el 07 de abril de 2020

Loayza, V., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., Vargas, R., Oyonarte, C., Jiménez, W. 2020. Mapeo digital de carbono orgánico en suelos de Ecuador. *Ecosistemas* 29(1):1852. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1852>

Los suelos son el mayor reservorio terrestre de carbono orgánico (COS), en comparación con los océanos, la vegetación terrestre y la atmósfera. El carbono orgánico del suelo (COS) es dinámico y debido a la acción antropogénica puede convertirse en un sumidero o en una fuente neta de gases de efecto invernadero (GEI). Por ello, el Ecuador sumó esfuerzos y aportó a la construcción del Mapa Mundial de Carbono Orgánico del Suelo (GSOCmap), con el que se pudo estimar mediante el mapeo digital de suelos, el contenido de COS dentro de los 30 cm de profundidad a nivel nacional, así como su variabilidad espacial identificando los factores ambientales que intervienen en su almacenamiento y aquellas covariables que influyen en su incertidumbre respecto a su contenido. Para lograrlo, se empleó un modelo geoestadístico (Regresión-Kriging), que combinó 12 924 datos de perfiles de suelos patrimoniales a escala 1: 25 000 junto con 140 covariables edáficas y ambientales. El modelo obtenido con resolución espacial de 1 km estimó la reserva de COS entre 10 a 297.8 t ha⁻¹, (media de 55.69 t ha⁻¹), y sugiere un reservorio de COS en los 30 cm superficiales de 1.37 Pg. Sin embargo, fue imprescindible para fortalecer la confianza del valor reportado calcular la incertidumbre mediante este estudio a través de kriging ordinario entre las diferencias de los valores de COS estimado por la ecuación de regresión y los valores reales, mediante una validación cruzada (5%), y posteriormente mediante una validación externa, de lo cual se obtuvo un valor de incertidumbre de COS almacenado en los suelos de Ecuador de 1.63 ± 0.38 Pg de COS. Se obtuvo de este modelo que el 40% de variación espacial de COS, presentó una raíz del error medio cuadrático (RMSE) de 0.52 t ha⁻¹ y una correlación (R²) de 0.41. Las covariables con mayor peso y que influyen directamente en el stock de carbono son la temperatura, tipo de suelo, altitud, y el índice de humedad topográfico. La mayor concentración de COS está presente en la región de los Andes (>120 t ha⁻¹), en tanto que en la región de la Costa y región Insular los valores fluctúan entre medios a bajos y en la región Amazónica los valores son bajos (<40 t ha⁻¹). El análisis permitió conocer las áreas que presentan mayor incertidumbre y menor precisión, con lo cual se podrá fortalecer un monitoreo en zonas que actualmente presentan vacíos de información en estudios futuros.

Palabras claves: COS; mapeo digital de suelos; variabilidad espacial del suelo; regresión-kriging; secuestro de carbono; sumidero de carbono

Loayza, V., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., Vargas, R., Oyonarte, C., Jiménez, W. 2020. Digital mapping of organic carbon in Ecuador soils. *Ecosistemas* 29(1):1852. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1852>

Soils are the largest organic carbon terrestrial reservoir (COS), compared to the oceans, terrestrial vegetation, and the atmosphere. Soil organic carbon (COS) is dynamic and, due to anthropogenic action, it can become a sink or a net source of greenhouse gases (GHG). For this reason, Ecuador joined efforts and contributed to the construction of the World Map of Organic Soil Carbon (GSOCmap), with which it was possible to estimate, by means of digital soil mapping, the COS content within the 30 cm depth level. national as well as its spatial variability by identifying the environmental factors involved in its storage and those covariates that influence its uncertainty regarding its content. To achieve this, a geostatistical model (Regression - Kriging) was used, which combined 12 924 data from profiles of Heritage soils at 1: 25 000 scale along with 140 edaphic and environmental covariates. The model obtained with a spatial resolution of 1 km, estimated the COS reserve between 10 to 297.8 t ha⁻¹, (mean of 55.69 t ha⁻¹), and suggests a COS reservoir in the surface 30 cm of 1.37 Pg. However, in order to strengthen the confidence of the reported value, it was essential to calculate the uncertainty through this study through ordinary kriging between the differences in the COS values estimated by the regression equation and the real values, through cross-validation (5%), and later by external validation, from which an uncertainty value of COS stored in the soils of Ecuador of 1.63 ± 0.38 Pg of COS was obtained. It was obtained from this model that 40% of the spatial variation of COS presented a root of the root mean square error (RMSE) of 0.52 t ha⁻¹ and a correlation (R²) of 0.41. The covariates with the greatest weight and which directly influence the carbon stock are temperature, soil type, altitude, and the topographic humidity index. The highest concentration of COS is present in the Andes region (> 120 t ha⁻¹), while in the Coast region and Insular region the values fluctuate between medium to low and in the Amazon region the values are low (<40 t ha⁻¹). The analysis allowed to know the areas that present greater uncertainty and less precision, with which it will be possible to strengthen monitoring in areas that currently have information gaps in future studies.

Key words: COS; digital mapping of soils; spatial variability of the soil; regression-kriging; carbon sequestration; carbon sink

Introducción

Según FAO (2002), el suelo es el mayor sumidero de carbono puesto que secuestra al metro de profundidad 1417 Pg C, y a los dos metros 2500 Pg C, es decir que almacena aproximadamente dos veces más que la atmósfera (750 Pg C) y la vegetación (560 Pg C). La capacidad de sumidero de carbono orgánico (COS) de los suelos agrícolas en el Ecuador y en general en el mundo puede verse afectada por las prácticas agropecuarias insostenibles que causan la pérdida del contenido de COS y por ende la degradación y erosión de los suelos. La pérdida de COS no solo afecta a la salud y productividad del suelo, sino que también agrava el cambio climático.

El carbono orgánico del suelo (COS) es el carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de materiales orgánicos producido por los organismos vivos y puede persistir en el suelo durante décadas, siglos o incluso milenios, sin embargo, al ser muy dinámico puede perderse en forma de dióxido de carbono (CO₂) o metano (CH₄), siendo emitido nuevamente a la atmósfera, por lo que es clave en el ciclo del carbono y constituye el componente principal de la materia orgánica del suelo (MOS) la cual contribuye fundamentalmente a sus funciones, respecto al ciclo de nutrientes, la estabilización de la estructura del suelo, la aireación, productividad, infiltración, humedad y almacenamiento de agua, entre otros aspectos esenciales que garantizan la salud, fertilidad y la producción de alimentos; por ello, la pérdida de COS es un indicador del grado de degradación del suelo, esto significa que a mayor contenido de COS, la calidad y salud del suelo serán mayores frente a un suelo que presente un bajo contenido de COS. Este carbono puede ser liberado a la atmósfera si el suelo es trabajado inadecuadamente debido a prácticas agrícolas insostenibles como el riego y la labranza excesiva, el sobrepastoreo, la compactación, la pérdida de cobertura vegetal, el abuso en la aplicación de pesticidas y fertilizantes, así como a la producción de cultivos sin considerar la aptitud o capacidad del uso del suelo. Por el contrario, mediante prácticas sostenibles de gestión del suelo que incluye la fertilización y riego eficiente y controlado, cobertura orgánica, siembra de cultivos considerando su aptitud, y la reducción de la labranza entre otros, el COS puede ser preservado para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y reducir los efectos del cambio climático.

Actualmente para el Ecuador es una prioridad la gestión sostenible del recurso suelo. Mediante la formulación del Programa Nacional de Conservación y Recuperación de Suelos y los proyectos que de este se deriven, el país apunta hacia la conservación de los suelos, preservando aquellos que secuestran mayor contenido de carbono como aquellos que se encuentran degradados, susceptibles y/o en proceso de algún tipo de degradación, sea esta química, física o biológica.

En este sentido Ecuador en el año 2017, construyó el Mapa de Carbono Orgánico del Suelo a 30 cm de profundidad, resolución 1 km, realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) y el pilar 4 de la Alianza Mundial por los Suelos (AMS) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (www.sipa.gob.ec). Guevara et al. 2018, reportan datos libres en: <https://doi.org/10.5194/soil-4-173-2018>, calculados del proyecto a nivel mundial SoilGrids y datos libres en: <https://soilgrids.org/>, Hengl et al. 2004, en los que se observa la incertidumbre asociada principalmente al acceso de uso de datos limitados y a las diversas metodologías utilizadas para su modelo de estimación. Este mapa de Ecuador, se estimó la reserva de COS entre 10 a 297.8 t ha⁻¹, (media de 55.69 t ha⁻¹), y sugirió un reservorio de COS en los 30 cm superficiales de 1.37 Pg C. Las covariables con mayor peso y que influyeron directamente en el stock de carbono resultaron ser la temperatura, el tipo de suelo (principalmente los Andisoles e Histosoles que presentan el mayor contenido de COS), la altura y el índice de humedad topográfico. La mayor concentración de COS está presente en la región de los Andes (>120 t ha⁻¹), en tanto que en la región de la Costa y región Insular los valores fluctúan entre medios a bajos y en la región Amazónica los valores son bajos (<40 t ha⁻¹). Sin em-

bargo, este mapa inicial careció del análisis de incertidumbre, lo cual es imprescindible para fortalecer la confianza del valor reportado. Por cuanto, para Ecuador, es necesario calcular el valor de incertidumbre asociado, por lo que el presente trabajo tiene como objetivo estimar el COS superficial (0-30 cm) mediante el mapeo digital de suelos y determinar cuál es la incertidumbre de los valores preliminarmente estimados de COS.

Materiales y Métodos

A continuación, se describe brevemente el paisaje del Ecuador y seguidamente los pasos (Fig. 1) empleados para estimar el stock o reserva de CO en los primeros 30 cm de los suelos de Ecuador.

Área de estudio

El estudio ha sido realizado en la República del Ecuador, este país se encuentra ubicado sobre la línea ecuatorial al noroeste de América del Sur y limita al norte con Colombia, al sur y al este con Perú y al oeste con el océano Pacífico. Con apenas 283 560 Km², presenta la mayor biodiversidad de especies de fauna y flora por metro cuadrado de superficie. Debido a una múltiple combinación entre ubicación geográfica y geopolítica, características geológicas y topográficas, climáticas, de precipitación y temperatura, factores biológicos y evolutivos, el Ecuador, es un país megadiverso que se encuentra dentro del listado de los diecisiete países de mayor diversidad que aunque ocupan menos del 10% de la superficie del planeta, albergan siete de cada diez especies reconocidas. El Ecuador se ubica en el cinturón tropical del planeta, y es atravesado por la línea ecuatorial, por lo que presenta territorios ubicados tanto en el hemisferio norte como en el hemisferio sur, de esta manera, recibe alta insolación y luminosidad, por lo que posee luz diaria durante todo el año.

La intensa actividad tectónica y volcánica presente en el país, debido a la presencia de la Cordillera de los Andes que atraviesa al territorio ecuatoriano fracciona a este en Occidental y Oriental. En la mitad de las dos cordilleras se encuentra el Callejón Interandino, dando lugar a que en el país existan lugares con altitudes desde 0 msnm hasta los 6384 msnm que es el pico más alto del país en referencia al volcán Chimborazo. Geográficamente el Ecuador se divide en cuatro regiones naturales, cada una con múltiples pisos altitudinales, zonas de vida y barreras geográficas: las planicies occidentales o Región Costa; en el centro la zona alto andina o Región Sierra; la Región Amazónica al oriente; y el Archipiélago Galápagos o Región Insular a 1000 km del continente en el océano Pacífico. Cada una de estas regiones es un complejo y variado sistema de climas, paisajes, suelos, relieves y biodiversidad, producto de las condiciones ecuatoriales del país y la altitud. La luz al no ser uniforme en todas las áreas del país, promueve la presencia de diferentes características en cuanto a vientos, regímenes pluviales y de temperatura que controlan e inciden en el desarrollo de los suelos.

Ecuador recibe además la influencia de las corrientes marinas, fría de Humbolt, al sur del país y cálida del Niño, al norte, así como de los vientos alisios que combinados generan una gran variedad de regímenes climáticos que marcan la pluviosidad e influyen en la precipitación.

Descripción general del Ecuador

A continuación, se describe brevemente los paisajes físicos del Ecuador (Winckell et al. 1997):

Región Insular.- Corresponde al Archipiélago de las Islas Galápagos, estas islas emergieron fabulosamente del Océano Pacífico, debido a la erupción de volcanes submarinos que desarrollaron diversos paisajes, también influenciados por el clima y la altitud. Constituye un conjunto está constituida por 13 islas principales que se encuentran a una distancia entre 900 y 1200 km del continente. Estas islas fueron formadas por los volcanes que emergen del mar. Morfológicamente se reconocen relieves suaves y ondulados, escudo de volcanes sin caldera y volcanes de escudo grande con crestas.

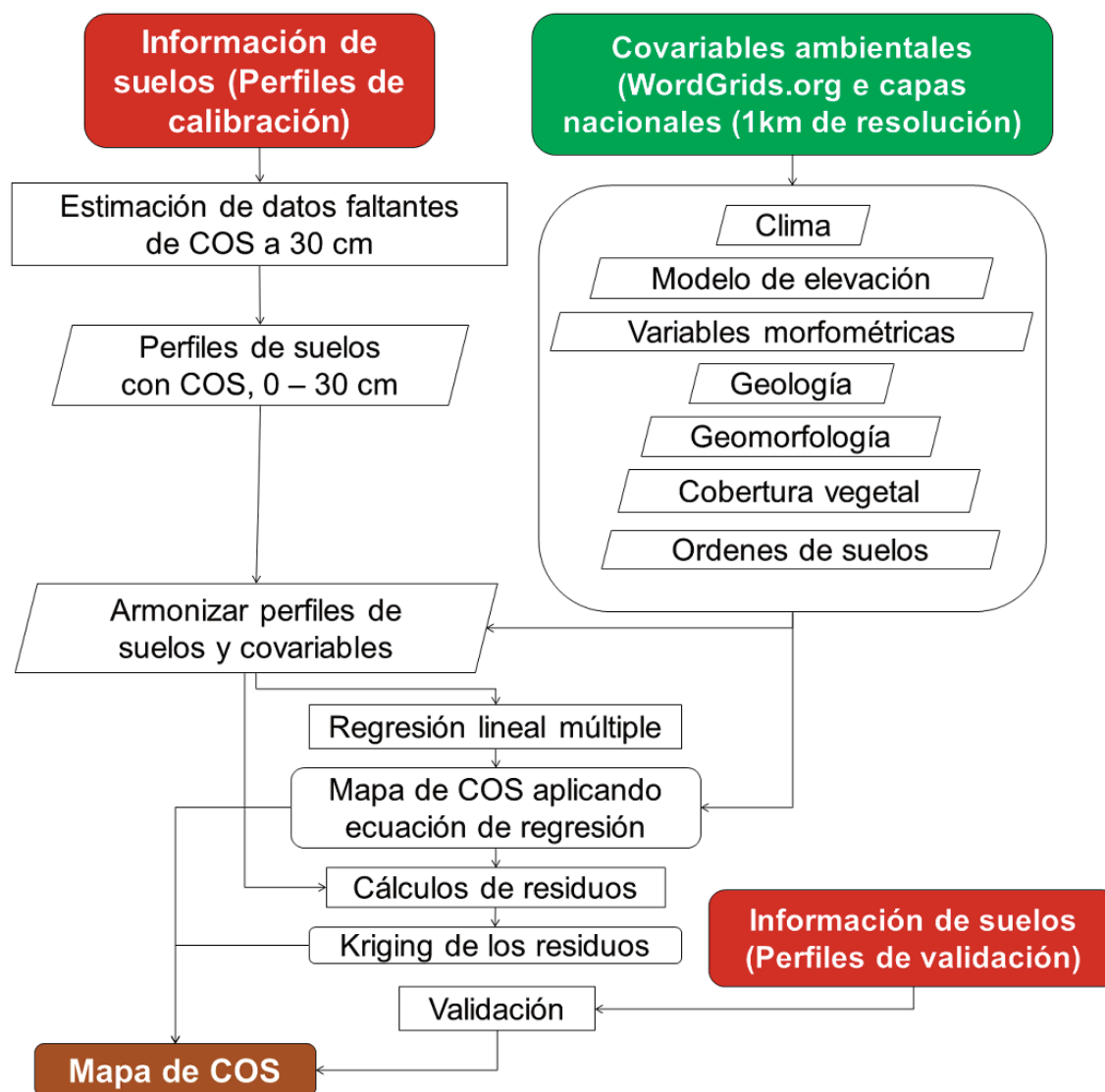


Figura 1. Diagrama del proceso metodológico
 Figure 1. Diagram of the methodological process

Región Andina.- región de las tierras altas o sierra, está formada por el oeste y la cordillera de los Andes orientales, dispuesta en dirección del meridiano, con pendientes exteriores muy pronunciadas que se caracterizan por una disminución general de la altitud y la masividad de norte a sur. Presenta elevaciones entre 2500 y 4500 m s.n.m. Aquí están presentes los volcanes y las cuencas interandinas rellenas de sedimentos volcánicos con alturas entre 1600 a 3000 m.s.n.m., En dirección sur, los andes van disminuyendo progresivamente su altura y cambian hasta llegar a un plano costero conocido como los altiplanos andinos, que alcanzan los 830 m s.n.m.

Región Costa.- La región del plano costero se extiende desde la costa (nivel del mar) a la vertiente occidental de los Andes alcanzando una altitud de 1200 m. Localizada hacia el occidente del país, presenta alturas que llegan a los 600 m.s.n.m., posee relieves tabulares, cerros disectados, colinas, llanuras onduladas. Las Llanuras de la costa occidental presentan un relieve ondulado con una altitud de 650 m s.n.m. originadas a partir de conos y llanuras antiguas ligeramente diseccionadas. Otra unidad ambiental presente que caracteriza los paisajes costaneros son las Llanuras aluviales bajas, susceptibles a inundaciones.

Región Amazónica.- La región amazónica, se extiende desde el pie de los Andes de la vertiente oriental, entre 500 y 1500

m.s.n.m., se abre una franja de 50 km de ancho que se asemeja a una tercera cordillera. Luego, a menos de 300 m, la llanura amazónica se materializa alcanzando el límite oriental con el Perú. Estas llanuras consisten en un paisaje monótono formado por pequeñas colinas de unos 50 m de altura.

La Región Amazónica se divide en tres tipos de relieve, caracterizado en primer lugar por un relieve subandino formado por montañas con alturas de 500 a 2500 m.s.n.m., en donde se presenta la sierra alta y un extenso piedemonte con una larga y sólida cúpula, con barrancos y cañones.

Un segundo releve caracterizado por los Piedemontes peri-andinos en el centro de la Amazonia, con áreas altas y mesetas a partir de 1500 hasta 3000 m s.n.m. con acantilados, colinas y picos estrechos. Y un tercer relieve, conformado por las zonas bajas cuyos relieves son escalonados, con evidencia de depósitos aluviales de la hidrografía amazónica, caracterizado por colinas y valles peri-andinos con alturas menores de 300 m s.n.m. formado por cerros de rocas sedimentarias terciarias y recubrimientos continuos a partir de pliegos cuaternarios y coberturas de bosques. Grandes llanuras aluviales se presentan entre los cerros.

Este relieve incluye pantanos y áreas inundadas que se forman como resultado del desbordamiento de los ríos que forman el sistema hidrográfico de la Amazonía.

Descripción de la base de datos de suelos

La base de datos edáficos utilizada, incluyó 12 924 perfiles patrimoniales georreferenciados tomados a 1m de profundidad, y colectados entre los periodos 1982-1985 y 2009-2016 (MAGAP 2015) (Fig. 2), con aproximadamente 38 772 horizontes superficiales pedogenéticos, que poseen información de varias variables, de las cuáles para fines del presente cálculo del COS en el suelo, fueron seleccionadas las siguientes variables: profundidad efectiva (cm), densidad aparente (DA, g.cm⁻³), carbono orgánico (CO, %), materia orgánica (MO, %), y fragmentos gruesos superficiales (FG, %). En el caso de ausencia de información de densidad aparente, se estimó mediante el método propuesto en la siguiente fórmula por Grigal et al. 1989:

$$DA = 0.669 + 0.941 \cdot e^{(-0.06 \cdot MO)}$$

Donde:

DA= densidad aparente en gm.cm⁻³

MO= la materia orgánica en %.

Posteriormente la base de datos se dividió aleatoriamente en dos subconjuntos: 11 924 perfiles para el entrenamiento del modelo y 1000 perfiles para las validaciones cruzada y externa.

Descripción de las covariables

Como factores predictivos del COS, se consideraron 140 covariables ambientales y edáficas disponibles a 1 km de resolución espacial, donde destacan principalmente el modelo digital de elevación a 30 m (MDE), las variables morfométricas y climáticas, los órdenes de suelos, tipo de geología, tipo de vegetación, cobertura y uso de la tierra, y múltiples capas ambientales, que se presentan en la [tabla 1 del apéndice](#).

De estas covariables se seleccionaron las más relevantes para incluirlas en la estimación del COS, mediante el análisis de correlación de Pearson, el cual es una medida lineal entre dos variables cuantitativas, continuas que mide su grado de relación y, cuya ecuación se describe a continuación:

$$\rho_{xy} = \frac{(\sigma_{xy})}{(\sigma_x \sigma_y)}$$

Dónde:

σ_{xy} : es la covarianza.

σ_x : es la desviación estándar de la variable x.

σ_y : es la desviación estándar de la variable y.

Posteriormente se filtraron las covariables correlacionadas empleando el método estadístico *stepwise* de construcción del modelo de regresión lineal múltiple, eliminando covariables en función de estadísticas de pruebas F, T, coeficiente de determinación R² o AIC (*Akaike's Information Criterion*). Este método se inicia con la prueba de todas las variables predictivas disponibles y se eliminan una a la vez a medida que avanza la regresión. En cada paso, la variable con la estadística más baja de "F, R² o AIC, se excluye del modelo, el cual se llevó a cabo mediante la función *step* de R (Venables y Ripley 2002).

Función de suavizado (*spline*)

El stock de COS fue calculado a partir de los perfiles de suelos patrimoniales del Ecuador, los mismos que presentan profundidades variables de horizontes genéticos, generalmente hasta un metro de profundidad, por cuanto, para fines de este estudio siguiendo la metodología del Soil Organic Carbon Mapping Cook Book (FAO, ITPS 2018), se requería que todos los perfiles a ser utilizados tuviesen una profundidad normalizada de 30 cm (es decir

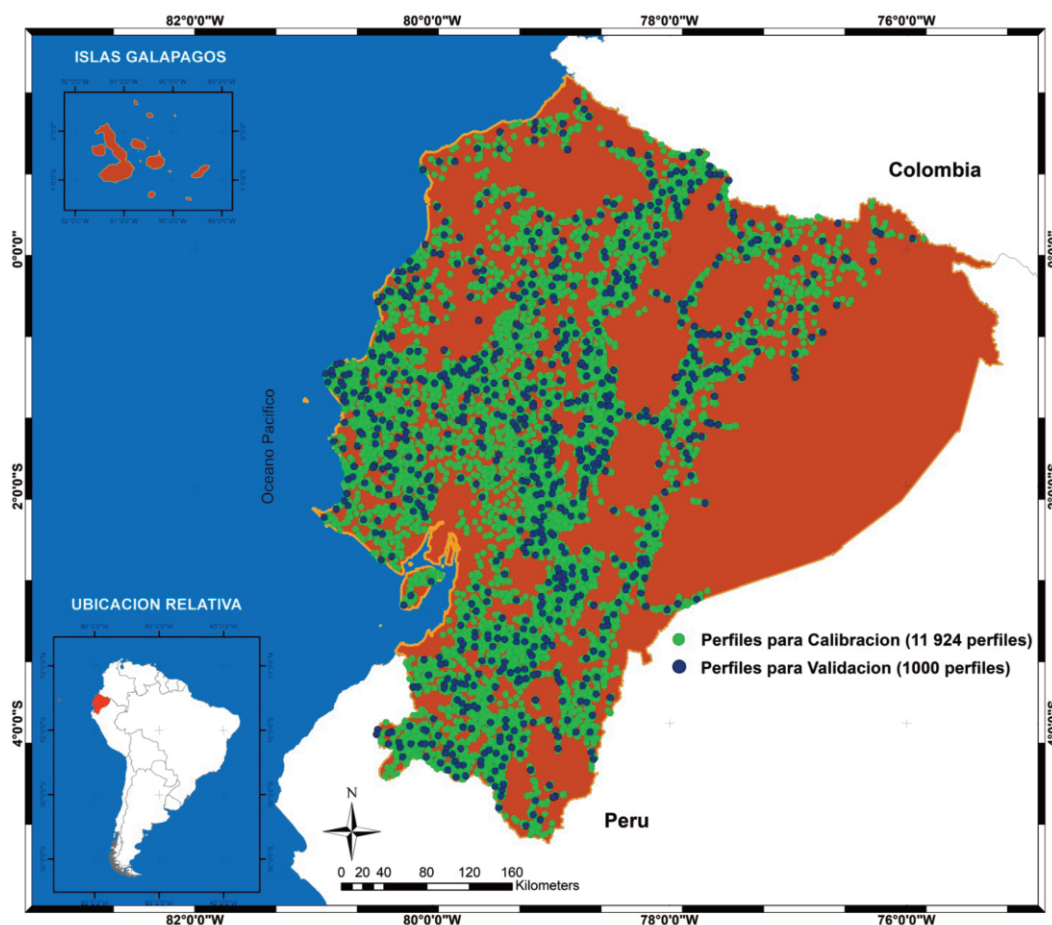


Figura 2. Ubicación del área de estudio y Perfiles de suelos (Calibración 11 924 perfiles y Validación 1000 perfiles).
Figure 2. Location of the study area and soil profiles (Calibration 11 924 profiles and Validation 1000 profiles).

de 0 a 30 cm de profundidad), por lo que se procedió a emplear la función spline GSIF::mpsplinedel del paquete R de GSIF (Malone et al. 2017) para normalizar esta profundidad. Dicha función consta del ajuste de funciones de profundidad continuas para modelar la variabilidad de la propiedad del suelo y, consiste en una serie de polinomios cuadráticos locales que se unen en los llamados nodos, ubicados en los límites del horizonte, por lo que el ajuste de la *spline* mantiene el valor medio de cada horizonte.

Fue así, que se estimaron los valores de las propiedades necesarias para calcular la reserva de COS en kg m⁻² entre 0 y 30 cm para cada perfil de suelo.

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

Donde:

CO: es el contenido de carbono orgánico de suelo (g kg⁻¹) determinado en laboratorio.

DA: es la densidad aparente (kg m⁻³)

E: es el espesor (m)

FG: es el contenido de fragmentos gruesos para cada perfil (%).

Método de predicción Regresión – Kriging

Con base a la metodología empleada por la AMS (Yigini et al. 2018). Se utilizó el método predictivo geoestadístico regresión – Kriging (Hengl et al. 2004).

Este es un modelo geoestadístico con un componente determinista y otro estocástico (Hengl et al. 2004). El cual combina una regresión lineal múltiple que genera una ecuación y el kriging ordinario de las diferencias entre el valor calculado por la ecuación y el valor real del punto o perfil de suelo en ese sitio (residuos). RK es comúnmente usada para mapear COS (Yigini et al. 2018).

Validación de incertidumbre

La modelización de la incertidumbre del COS, fue evaluada, empleando primero, una validación cruzada, la cual consiste en la división de los perfiles de suelos en conjuntos aproximadamente iguales, uno de estos conjuntos se reserva para la validación, luego el modelo de RK se calibra empleando los perfiles restantes y estos son usados para predecir el COS en los perfiles del conjunto de validación, a partir de esta predicción, se calcula el error de predicción, que no es más que la diferencia entre el valor real y el predicho por el modelo de RK.

Esto se repite por tantos conjuntos son creados para obtener un valor de estimación y error para la totalidad de perfiles. De esta manera todos los datos de suelos son usados tanto para la calibración del modelo como para su validación. Continuando con el proceso, en segundo lugar, se empleó una validación independiente de división de datos (FAO, ITPS 2018), dejando un conjunto de 1000 perfiles de suelos fuera de la calibración y estimación del COS por el modelo RK. Para ambas maneras se calculó las diferencias (errores o residuos) entre el valor real de COS del perfil de suelo y su valor estimado por RK utilizando diferentes índices de errores: medio (ME), medio absoluto (MAE), medio cuadrado (MSE) y la raíz cuadrada del error medio cuadrático (RSME).

La distribución espacial de la incertidumbre se estimó mediante el kriging ordinario de las diferencias entre los valores de COS estimado por la ecuación de regresión y los valores reales.

Con base a la metodología empleada por la AMS (Yigini et al. 2018), se utilizó el método predictivo geoestadístico Regresión – Kriging (Hengl et al. 2004). Una técnica de interpolación espacial que combina una regresión del COS (dependiente) y predictores (covariables ambientales independientes) con kriging de los residuos (errores o diferencias) de predicción, en otras palabras, RK es un método híbrido que combina un modelo de regresión múltiple lineal con kriging ordinario de los residuos de predicción.

Las ecuaciones podrían representarse de la siguiente forma:

Regresión lineal múltiple:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_n * X_n + \varepsilon$$

Dónde:

Y : es la variable dependiente COS.

β_n : los coeficientes.

X_n : los predictores o covariables.

ε : los errores.

Kriging de los residuos

Es un método de interpolación óptima basada en regresión en función de los valores en ubicaciones circundantes, ponderados de acuerdo con los valores de covarianza (o semivarianza) espacial. Todos los estimadores kriging son variantes de la siguiente ecuación (Goovaerts 1997):

$$z(x_0) - m(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda \{z(x_i) - m(x_i)\}$$

Dónde:

$z(x_0)$ y $z(x_i)$: son los valores en la ubicación objetivo y en las ubicaciones cercanas, respectivamente.

$m(x_0)$ y $m(x_i)$: son los valores esperados (medias) de $z(x_0)$ y $z(x_i)$.

n : es el número de observaciones en una vecindad local usada para estimar $z(x_0)$.

λ : son los pesos derivados de la función de semivariograma ajustado.

Luego de calcular la regresión lineal múltiple, predecir el mapa de COS preliminar (sin incertidumbre), obtener las diferencias entre el COS de los perfiles de suelos de calibración, interpolar los residuos mediante kriging y sumárselos, finalmente, se procedió a clasificar los resultados en las siguientes clases siguiendo los criterios de Vela (2009): valores bajos (< 40 t ha⁻¹), valores medios (40 - 80 t ha⁻¹), valores altos (80 - 120 t ha⁻¹) y muy altos (> 120 t ha⁻¹).

Resultados

Covariables ambientales

De este análisis, se determinó que las covariables ambientales que presentaron mayor correlación con el contenido de COS fueron: la temperatura, el tipo de suelos, la altura vertical a los drenajes, presencia de suelos volcánicos (Andisoles) y el índice topográfico de humedad (la **Tabla 1**, muestra de manera completa las 15 covariables que finalmente se emplearon en la ecuación de regresión). Las covariables ambientales que resultaron con mayor correlación con el contenido del COS, explicando su variabilidad espacial en los paisajes del Ecuador y apoyando al modelo de la estimación de esta propiedad en sitios no muestreados, para finalmente poder calcular el stock de COS total, fueron: la temperatura, los tipos de suelos como los Histosoles, la altura vertical a los drenajes, presencia de suelos volcánicos (Andisoles) y el índice topográfico de humedad.

Generalidades del COS

En promedio los datos obtenidos de los perfiles de suelos mostraron una densidad aparente de 1.32 g cm⁻³ con una desviación estándar de ± 1.17 g cm⁻³, un COS promedio de 5.48 kg m⁻² y una desviación estándar de ± 4.23 Kg m² y su coeficiente de variación fue de 77 % (**Tabla 2**).

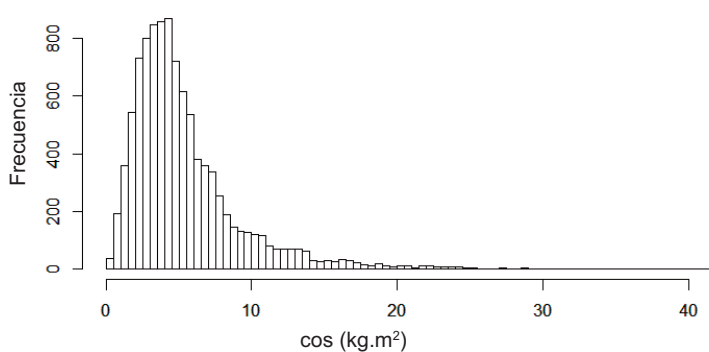
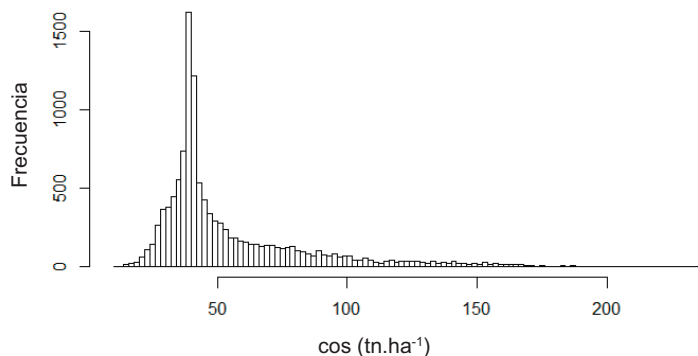
De acuerdo con la regresión-kriging Ecuador, reporto una distribución asimétrica positiva de los valores de COS (media > mediana > moda, **Fig. 3**) y valores de COS entre 10.44 a 297.8 t ha⁻¹, con un promedio de 55.69 t ha⁻¹ y una desviación de 32.95 t ha⁻¹. Con relación al stock o reserva total de COS almacenado de 0 a 30 cm de profundidad, se estimó en 1.63 Pg \pm 0.38 Pg.

Tabla 1. Covariables ambientales relevantes en la estimación del COS.**Table 1.** Relevant environmental covariates in the COS estimation.

N°	Covariable	Descripción	Detalle	Correlación de Pearson
1	tx2mod3a	Valor medio de la temperatura en la superficie terrestre por periodos	Feb/Mar	-0.41
2	tx1mod3a		Dic/Ene	-0.39
3	tx5mod3a		Ago/Sep	-0.37
4	tx3mod3a		Abr/May	-0.36
5	tx6mod3a		Oct/Nov	-0.36
6	tx4mod3a		Jun/Jul	-0.35
7	Suelosvs2	Ordenes de suelos (Soil Taxonomy)	Presencia de orden pixel	0.40
8	tdmmod3a	Temperatura en la superficie terrestre	Valor medio	-0.38
9	tdhmod3a		Valor máximo	-0.37
10	tdlmod3a		Valor mínimo	-0.25
11	thhmod3a		Valor máximo en la noche	-0.22
12	VerticalDistance ToChannelNetwork		Distancia vertical a la red de drenajes	En metros, derivada de la elevación del terreno
13	RelativeSlopePosition	Pendiente relativa	i.e., cimas, laderas, valles	0.36
14	twisre3a	Índice de humedad topográfico	Tendencia del agua a acumularse	-0.24
15	ganhws3a	Porcentaje de terreno con suelos Andisoles	Presencia por pixel	0.24

Tabla 2. Estadísticos de propiedades del suelo, proveniente tanto de los perfiles de suelos, como del producto de modelar el COS con Regresión - Kriging.**Table 2.** Statistics of soil properties, derived from both soil profiles and the product of modeling COS with Regression - Kriging.

Propiedad	Origen	Min	Q1	Mediana	Q3	Max	Prome	Desv	COV
DA (g cm ⁻³)	Perfiles de suelos	0.02	0.97	1.08	1.41	31.7	1.32	1.17	88.64
COS (%)	Perfiles de suelos	0.01	1.33	2.32	3.96	41.0	3.07	2.67	86.97
COS (kg m ⁻²)	Perfiles de suelos	0.16	2.90	4.39	6.63	45.0	5.48	4.23	77.18
COS (kg m ⁻²)	Modelado por RK	1.04	3.75	4.22	6.50	29.78	5.56	3.29	59.17
COS (t ha ⁻¹)	Modelado por RK	10.44	37.59	42.26	65.07	297.8	55.69	32.95	59.17

Panel a: Frecuencias de los valores de COS en los perfiles de suelos**Panel b:** Frecuencias de los valores de COS resultados del modelo de Regresión - Kriging**Figura 3.** Histograma de frecuencias de los valores de COS de perfiles de suelos (panel a), y resultados del método de predicción Regresión - kriging para todo el Ecuador (panel b).**Figure 3.** Histogram of frequencies of the COS values of soil profiles (panel a), and results of the regression-kriging prediction method for the whole of Ecuador (panel b).

Variabilidad espacial de COS

El modelado del COS por clases se muestra en la **Figura 4**. En ella se aprecia que los valores bajos ($< 40 \text{ t ha}^{-1}$) se localizan en la región semiárida de la costa, en los valles interandinos y en la región pluvial de la Amazonia. En condiciones ambientales que no permite el desarrollo de la vegetación, como es la baja humedad, los valores extremos de temperaturas, muy altas (costas) o bajas (páramos) y suelos de desarrollo incipiente como los Inceptisoles, suelos o muy ácidos productos del lavado de sus bases (Amazonia). Los niveles medios de COS ($40 - 80 \text{ t ha}^{-1}$) se ubican a ambos lados de la Cordillera Andina, al occidente en el piedemonte y al oriente en cuevas bajas. Estos niveles de COS se deben a sus condiciones subhúmedas, temperaturas medias y suelos de moderada ácidos y fertilidad, lo que favorece en cierta medida a las formaciones boscosas que acumulan residuos en el suelo.

Las áreas de alto COS ($80 - 120 \text{ t ha}^{-1}$) también bordean el paisaje andino formando una delgada franja montañosa proyectada de norte a sur, donde el clima frío y los suelos de origen volcánicos (Andisoles) han favorecido la formación de abundante vegetación que aporta residuos al suelo. Finalmente, las tierras con muy alto COS ($> 120 \text{ t ha}^{-1}$) están en la sierra Andina con temperaturas que oscilan entre -3 y $18 \text{ }^\circ\text{C}$, sobre suelos volcánicos y cobertura herbácea. Estos últimos escenarios es donde la humedad, las temperaturas y la fertilidad de los suelos benefician una cobertura vegetal considerable, y es también donde los microorganismos del suelo pueden eficientemente convertir la materia orgánica en COS.

Validación del método de predicción y distribución espacial del error

La validación cruzada arrojó errores bajos ($\text{ME} = 0.002 \text{ kg m}^{-2}$; $\text{MAE} = 0.39 \text{ kg m}^{-2}$; $\text{MSE} = 0.27 \text{ kg m}^{-2}$ y $\text{RSME} = 0.52 \text{ kg m}^{-2}$), todos ellos por debajo del valor medio de COS de los perfiles del país (5.48 kg m^{-2}) y muy cercanos al valor mínimo (0.16 kg m^{-2}). Por otro lado, se encontró una alta correlación entre los valores reales y predichos de 0.63.

En la validación independiente (**Fig. 5**) los errores resultaron un poco más altos que los de la validación cruzada, sin embargo, siguen siendo bajos, si se comparan con la media y el valor mínimo de los perfiles de suelos empleados para estimar el COS por RK ($\text{ME} = -0.51 \text{ kg m}^{-2}$; $\text{MAE} = 1.89 \text{ kg m}^{-2}$; $\text{MSE} = 8.98 \text{ kg m}^{-2}$ y $\text{RMSE} = 2.99 \text{ kg m}^{-2}$). También se obtuvo una moderada correlación positiva entre los valores de validación reales y predichos (0.41), además de varianza explicada cercana a 0.40.

La **Figura 6** muestra la distribución espacial y magnitud de las diferencias entre el valor real de COS de los perfiles empleados para la validación y el estimado por RK. Donde se observó que el valor COS fue sobreestimado en 53% de los perfiles y subestimados en 47% de los casos. Estos valores cercanos evidencian un equilibrio en la estimación por RK.

Por su parte **Figura 7**, permite observar las zonas donde el método de predicción resultó menos preciso, con diferencias o errores entre ± 12.8 y $\pm 13.56 \text{ t ha}^{-1}$, las cuales se ubicaron en la región de Amazonia, Islas Galápagos y la provincia de Esmeraldas. El rango máximo de incertidumbres es entre ± 11.40 y $\pm 13.56 \text{ t ha}^{-1}$.

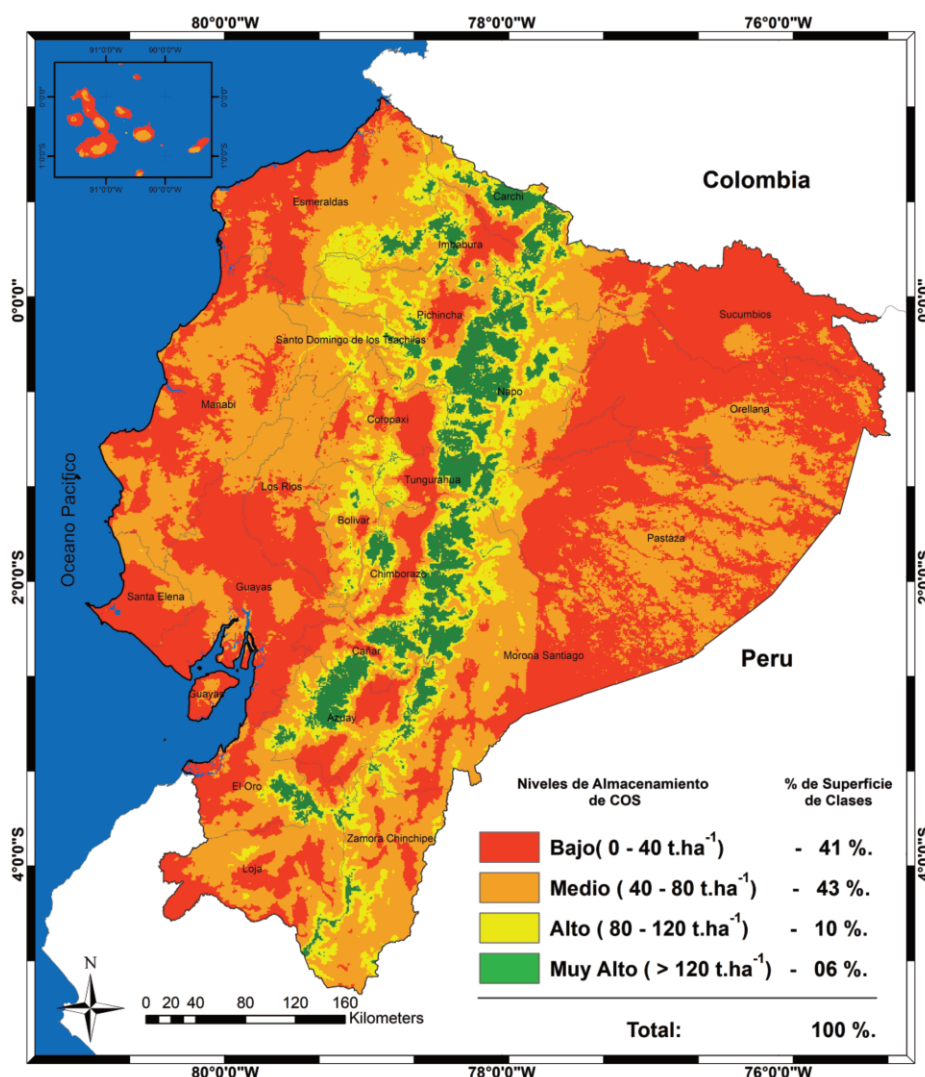


Figura 4. Mapa de Niveles de Almacenamiento de carbono orgánico en los suelos del Ecuador.

Figure 4. Map of Storage Levels of organic carbon in the soils of Ecuador.

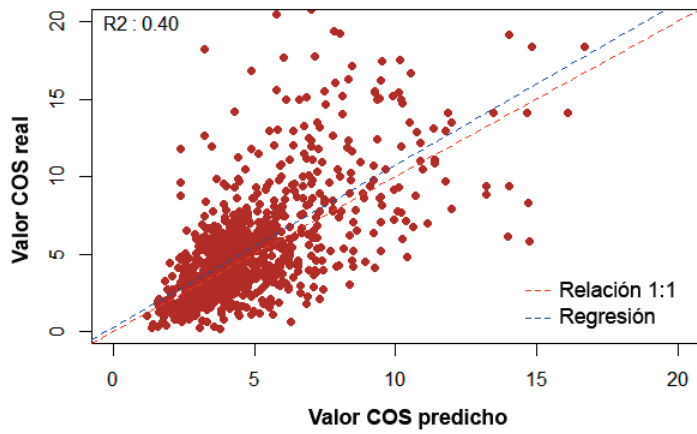


Figura 5. Gráfico de dispersión entre valores predichos por el método de Regresión - kriging y los valores observados, durante la validación externa.
Figure 5. Graph of dispersion between values predicted by the Regression-kriging method and the observed values, during external validation.

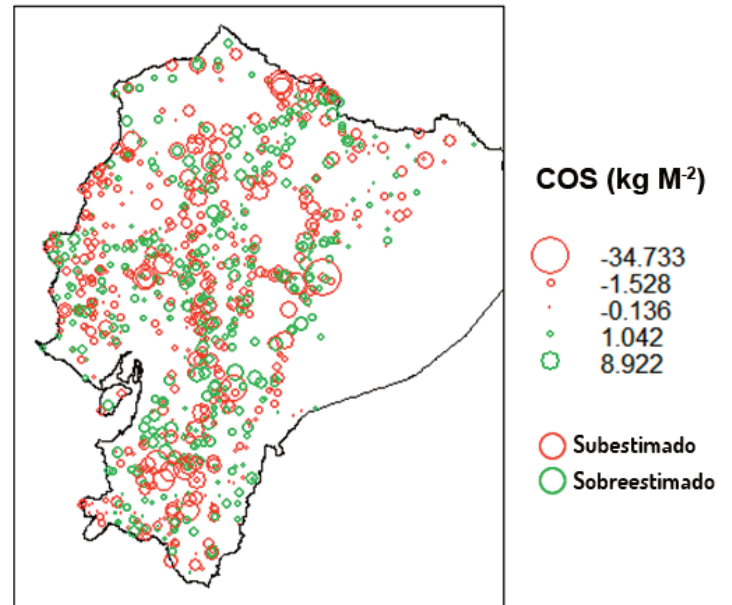


Figura 6. Precisión espacial del modelo de COS por RK.
Figure 6. Spatial precision of the COS model by RK.

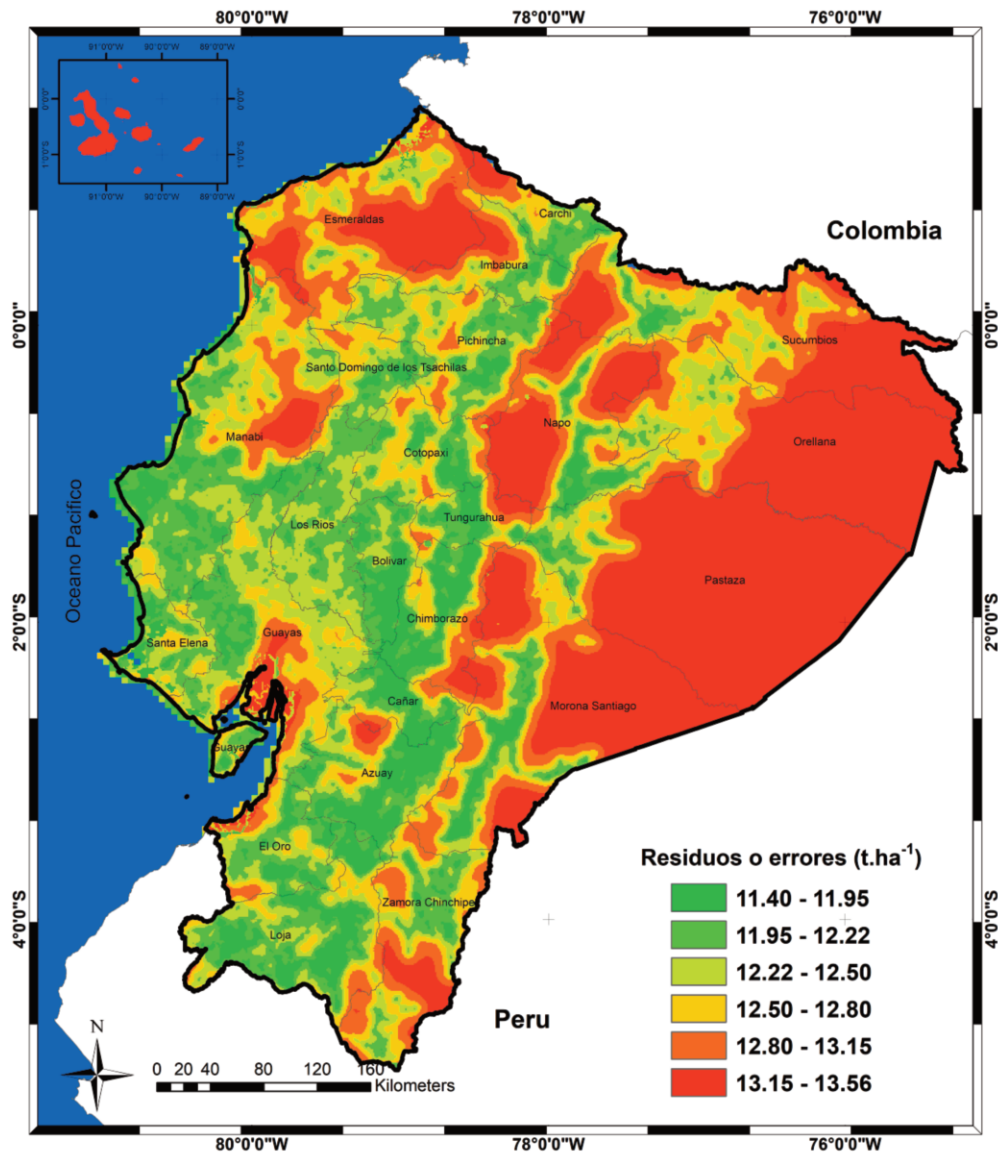


Figura 7. Mapa de Incertidumbre mediante Kriging de los residuos o errores de estimación
Figure 7. Kriging Uncertainty Map of residuals or estimation errors

Discusión

Las zonas del país, que se encuentran en paisajes caracterizados por suelos de origen volcánico, de régimen isofrío, con temperaturas bajas que oscilan entre los 0 a 10 °C, y presentan humedad relativa alta y acumulación de humedad propia de los suelos mal drenados, poseen mayor carbono orgánico en sus suelos, debido a que la actividad de los microorganismos de esos suelos condicionada por dichos factores, no permite una mayor mineralización de la materia orgánica, por cuanto, esta se acumula. Este resultado fue corroborado por los resultados reportados por [Guevara et al. 2018](#), a través de los cuáles se formuló una hipótesis de trabajo sobre las principales causas o motivadores de la variabilidad espacial del COS en Ecuador. Lo cual se refleja en la siguiente ecuación:

$$\text{COS} = f(\text{tx2mod3a} + \text{tx1mod3a} + \text{tx5mod3a} + \text{tx3mod3a} + \text{tx6mod3a} + \text{tx4mod3a} + \text{Suelosvs2} + \text{tdmmod3a} + \text{tdhmod3a} + \text{tdlmod3a} + \text{thhmod3a} + \text{VerticalDistanceToChannelNetwork} + \text{RelativeSlopePosition} + \text{twisre3a} + \text{ganhws3a})$$

Los elementos que constituyen la anterior ecuación son las covariables ambientales consideradas más relevantes para explicar el comportamiento del COS almacenado en el Ecuador, y su descripción se presenta como se ha mencionado en la [Tabla 1](#).

La distribución de los valores de COS estimados por Regresión-Kriging, resultado asimétrica positiva, indicando que la mayoría de los suelos del Ecuador poseían valores de esta propiedad por debajo de la media nacional de 5.56 kg m⁻², valor este que se ubica dentro del rango previamente reportados por [Guevara et al. 2018](#), de un mínimo de 0.99 kg m⁻² a un máximo de 24.36 kg m⁻² con una media de 5.15 kg m⁻². En cuanto al COS almacenado este arrojó como dato 1.63 Pg ± 0.38 Pg, este es un resultado conservador comparado con otros modelos empíricos como los 4.04 Pg., de [Hengl \(2017\)](#) y los 2.63 Pg del mapa global [Köchy et al. \(2015\)](#). Muy similares al de FAO, ITPS (2018) de 5.15 Pg, pero ligeramente superiores a los 1.3 Pg de COS estimado por [Guevara et al. 2018](#), a 5 kilómetros de resolución espacial. Lo cual sugiere que la resolución espacial de los estimados podría ser un factor diferencial entre los reservorios de COS que se han reportado, principalmente porque a menor resolución espacial, es más difícil representar relaciones entre el COS y la topografía, y por tanto, la identificación precisa de áreas de potencial acumulación y áreas de pérdida de COS ([Shanguan et al. 2017](#)).

Los niveles de pentagramo (Pg) de COS almacenado en los suelos de Ecuador se consideran entre medios a bajos, si son comparados con los de otros países de la región como Brasil 42.79 Pg, Argentina 18 Pg y México 9.04 Pg entre otros [FAO \(2017\)](#) y [Tífa et al. 2018](#).

El COS mostró gran variabilidad espacial debido a la heterogeneidad de los ecosistemas del Ecuador, encontrándose valores bajos en las zonas semiáridas de los suelos tipo Inceptisoles, incapaces de soportar abundante vegetación, y en otras áreas más lluviosas con suelos como los Ultisoles y los Oxisoles, muy lavados por las precipitaciones, ácidas y de baja fertilidad. Los valores medios de COS se relacionan al tipo de relieve piedemonte bajo de bosques con clima tropical húmedo (precipitación anual entre 1000 y 2000 mm), donde las temperaturas superan los 22°C y de régimen de temperatura del suelo isohipertérmico, con una humedad relativa entre 70 y 90%. Los niveles altos de COS son favorecidos por un clima tropical frío con abundante precipitación, nubosidad perenne y baja evaporación, además de suelos del tipo Andisoles que sustentan una abundante vegetación.

Al validar los resultados del mapa de COS, la validación cruzada y externa mostraron que el modelo explicó el 40 % de la varianza espacial del COS. Estos resultados podrían ser consecuencia de la alta heterogeneidad del ecosistema, la baja densidad de perfiles de suelos en algunas zonas (Amazonia y los valles interandinos), a la falta de una ecuación de pedotransferencia local para estimar la densidad aparente y la escala general em-

pleada que asigna un valor de COS a un área de un km². Los errores de estimación resultaron bajos inclusive negativos, lo que indica la posibilidad de que el método RK subestime los valores de COS. Las zonas con menor precisión y de mayor incertidumbre corresponden a la Amazonia y Galápagos, debido a baja densidad de información de perfiles de suelos, especialmente en Galápagos por ser Parque Nacional. Las grandes incertidumbres en modelos de carbono están asociadas al uso de información limitada ([Crowther et al. 2016](#)). Comparando con resultados de trabajos previos al nivel global ([Hengl 2017](#)), nacional o regional, se evidencia que nuestro modelo basado en mayor cantidad de datos, captura mejor la variabilidad del COS en Ecuador, por tanto, nuestro modelo presenta una mejor capacidad predictiva.

Conclusiones

El COS en los suelos del Ecuador, a una profundidad superficial de 0 - 30 cm, fue de 1.63 Pg ± 0.38 Pg, en estos rangos se encuentran aquellos suelos que presentaron niveles bajos (41 %) y medios de COS (43 %).

Los suelos que presentaron mayor contenido de COS fueron aquellos localizados en tierras con mayores altitudes, climas de bajas temperaturas y zonas húmedas de la Sierra; en tanto que los suelos que presentaron valores medios de COS se ubicaron en las vertientes occidentales y en una parte de la región Amazónica. Los suelos de la región de la Costa y resto de la Amazonia fueron los suelos que menor contenido de COS presentaron, esto a causa de que las condiciones del medio natural dado por temperaturas mayores a los 22 °C y al uso indiscriminado de la agricultura, que ha aportado al lavado y compactación de los suelos. En el caso de la Amazonia a causa de la deforestación, suelos desnudos y acidificación de sus suelos.

El modelo RK generó una estimación con bajos errores medios absolutos: MAE (0.39 a 1.89 kg m⁻²) y RMSE (0.52 a 2.99 kg m⁻²). Sin embargo, subestimó ligeramente los valores de COS, lo que se observó en el error medio de -0.51 kg m⁻² y en las diferencias entre valores de este modelo con respecto a los datos originales de perfiles de suelos (mediana -0.17 kg m⁻², cuartil 3 -0.13 kg m⁻² y máximos -15.22 kg m⁻²).

Las zonas con menor información de perfiles suelos, poseen una menor precisión, entre ellas está: la Amazonia, las Islas Galápagos y la provincia de Esmeraldas.

Las principales limitaciones encontradas durante esta investigación fueron la baja disponibilidad de covariables ambientales propias del Ecuador a una escala detallada, la baja densidad de perfiles de suelos en las islas Galápagos, la provincia de Esmeraldas, Amazonia y Valles interandinos, algunos vacíos de información relacionados con la densidad aparente y el fragmento grueso, para lo que se hace necesario mediciones de estas propiedades usando métodos analíticos estandarizados. Sólo de esta manera se podrán evaluar las reservas del COS con mayor precisión.

La temperatura (-0.41), los órdenes de suelos (0.40), altura vertical a la red de drenaje (0.37), el porcentaje de suelos volcánicos (0.24) y el índice topográfico de humedad (-0.24) resultaron las covariables más importantes para estimar COS.

El mapeo digital con RK demostró ser una metodología eficiente para la cartografía del COS sin embargo la precisión de los valores puede ser mejorada a medida que nuevos datos o covariables estén disponibles.

Los resultados de este mapa de COS almacenado en los suelos de Ecuador (1.63 Pg), se aproximan a los resultados del mapa original de COS generado en el año 2017 (1.37 Pg). Ahora con el aporte del conocimiento de su incertidumbre de ± 0.38 Pg de COS, además de mostrar espacialmente el contenido de COS, este análisis permite identificar las áreas con mayor incertidumbre y menor precisión, para fortalecer estudios futuros e impulsar el monitoreo del COS en los suelos.

Es necesario constantemente mejorar la calidad de los modelos de COS especialmente en países con alta heterogeneidad en sus ecosistemas, como Ecuador. Incrementar la resolución espacial de las predicciones de COS es otro aspecto importante con el objetivo final de alcanzar escalas relevantes para el manejo de ecosistemas. Para el caso de Ecuador, en este trabajo proveemos una línea base útil para habilitar un monitoreo constante del COS y una contribución al ciclo global del carbono.

Conocer el contenido de COS en los suelos del Ecuador y su incertidumbre, permitirán además incentivar al monitoreo de este recurso para su gestión sostenible a través de herramientas de política pública que amparen la conservación de los sumideros de carbono y restauren a su vez aquellos suelos que se encuentran degradados. Con ello, además de contribuir al indicador 15.3.1 de los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS), esta iniciativa coadyuva a la toma de decisiones y acciones dentro de los objetivos nacionales frente a la lucha contra el cambio climático y la desertificación, como además aporta información a los informes e inventario nacional de gases de efecto invernadero (INGEI) para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC).

Datos disponibles

Los datos de suelos y las covariables ambientales estarán disponibles a través del Sistema Latinoamericano de Información de Suelos de la AMS <https://github.com/FAO-GSP>. Códigos y archivos de trabajo también están disponibles en: <https://github.com/DSM-LAC>.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Alianza Mundial por el Suelo (The United Nations Global Soil Partnership) por facilitar el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- Crowther, T.W., Todd-Brown, K.E.O., Rowe, C.W., Wieder, W.R., Carey, J.C., Machmuller, M.B., Bradford, M.A. 2016. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature* 540 (7631), 104. <https://doi.org/10.1038/nature20150>
- FAO 2002. *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la Tierra*. World Soil Resources Reports 96. Roma, Italia. 61 pp. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-bl001s.pdf>
- FAO 2017. *Fifth Meeting of the Global Soil Partnership Plenary Assembly*. GSPPA-V/17/Report. Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-bs973e.pdf>
- FAO, ITPS. 2018. *Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap)*. Technical Report. Roma, Italia. 162 pp. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i8891EN/i8891en.pdf>
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, Nueva York, Estados Unidos.
- Grigal, D.F., Brovold, S.L., Nord, W.S., Ohmann, L.F. 1989. Bulk density of surface soils and peat in the north central United States. *Canadian Journal of Soil Science* 90: 895-900
- Guevara, M., Olmedo, G.F., Stell, E., Yigini, Y., Aguilar Duarte, Y., Arellano Hernández, C., 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>
- Hengl, T., Heuvelink, G., Stein, A. 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma* 120, 75–93. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.08.018>
- Hengl, T. 2017. *GSIF: Global Soil Information Facilities*. Disponible en: <https://CRAN.R-project.org/package=GSIF>
- Köchy, M., Hiederer, R., Freibauer, A. 2015. Global distribution of 85 soil organic carbon – Part 1: Masses and frequency distributions of SOC stocks for the tropics, permafrost regions, wetlands, and the world. *SOIL* 1,351–365. <https://doi.org/10.5194/soil-1-3512015>
- MAGAP, IEE. 2015. *Gestión del Territorio a Nivel Nacional a escala 1:25 000 y Proyecto de "Levantamiento de Cartografía Temática escala 1:25 000, lote 1 y 2"*. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, Instituto Espacial Ecuatoriano. Quito, Ecuador.
- Malone, B. P., Minasny, B., McBratney, A. 2017. *Using R for Digital Soil Mapping*. Springer International Publishing Switzerland, Basilea, Suiza, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44327-0>
- Shangguan, W., Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Yuan, H., Dai, Y. 2017. Mapping the global depth to bedrock for land surface modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 9: 65–88. <https://doi.org/10.1002/2016ms000686>
- Vela, G., Blanco, J., Rodríguez, M. 2009. Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, No 77. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000100003
- Venables, W.N., Ripley, B.D. 2002. *Modern Applied Statistics with S*, (4th ed). Springer Nueva York, Estados Unidos.
- Winckell, A., Zebrowski, C., Sourdat, M. 1997. *Los Paisajes Naturales del Ecuador: Las regiones y paisajes del Ecuador*. Geografía Básica del Ecuador, Tomo 2: Geografía Física. Instituto Geográfico Militar, Quito, Ecuador. 417 pp.
- Yigini, Y., Olmedo, G., Reiter, S., Baritz, R., Viatkin, K., Vargas, R. 2018. *Soil Organic Carbon Mapping Cookbook*, 2nd ed. FAO, Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/i8895EN>

Apéndice

Tabla A1. Covariables ambientales empleadas.

Table A1. Environmental covariates used.

N°	Covariables	Descripción
1	tdmmod3	Valor medio de la serie de tiempo LST diurno MODIS de 8 días
2	tdsmod3	Desviación estándar de la serie de tiempo LST diurno MODIS de 8 días
3	tdlmod3	Valor mínimo de la serie de tiempo LST diurno MODIS de 8 días
4	tdhmod3	Valor máximo de la serie de tiempo LST diurno MODIS de 8 días
5	tnmmod3	Valor medio de la serie LST nocturna de MODIS de 8 días
6	tnsmod3	Desviación estándar de la serie LST nocturna de MODIS de 8 días
7	tnlmod3	Valor mínimo de la serie LST nocturna de MODIS de 8 días
8	tnhmod3	Valor máximo de la serie LST nocturna de MODIS de 8 días
9	tx1mod3	Valor medio de la serie de tiempo LST diurno MODIS de 8 días para diciembre / enero
10	tx2mod3	Valor promedio de la serie de tiempo LST diurno MODIS de 8 días para febrero / marzo
11	tx3mod3	Valor promedio de la serie de tiempo LST de MODIS de 8 días de MODIS para abril / mayo
12	tx4mod3	Valor promedio de la serie de tiempo LST de MODIS de 8 días de MODIS para junio / julio
13	tx5mod3	Valor medio de la serie de tiempo LST diurno MODIS de 8 días para agosto / septiembre
14	tx6mod3	Valor promedio de la serie de tiempo LST diurno MODIS de 8 días para octubre / noviembre
15	px1wcl3	Precipitación para el período noviembre / diciembre / enero según los datos de WorldClim.org
16	px2wcl3	Precipitación para el período febrero / marzo / abril según los datos de WorldClim.org
17	px3wcl3	Precipitación para el período mayo / junio / julio basado en datos de WorldClim.org
18	px4wcl3	Precipitación para el período agosto / septiembre / octubre según los datos de WorldClim.org
19	demsre3	Modelo global de relieve basado en SRTM 30+ y ETOPO DEM a 1/120 arcos de grados
20	slpsrt3	Mapa de pendiente en porcentaje derivado utilizando DEMSRE3
21	l3pobi3	Unidades fisiográficas de accidentes geográficos (proyecto SCALA)
22	twisre3	Índice de humedad topográfico SAGA derivado del DEMSRE3
23	Opisre3	Índice de apertura topográfica SAGA derivado utilizando DEMSRE3
24	inmsre3	Media de radiación solar entrante potencial derivada en SAGA GIS
25	inssre3	Desviación estándar de la potencial radiación solar entrante derivada en SAGA GIS
26	Evmmmod3	Valor medio de los datos mensuales de la serie evaporación MODIS EVI.
27	evsmod3	Desviación estándar de los datos mensuales de la serie evaporación MODIS EVI
28	lammod3	Valor medio de la serie de tiempo MODIS LAI de 8 días
29	lasmod3	Desviación estándar de la serie MODIS LAI de 8 días
30	etmnts3	Evapotranspiración estimada por MODIS a largo plazo (MOD16)
31	I01igb3	Bosque de hoja delgada siempreverde basado en el producto MOD12Q1
32	I02igb3	Bosque de hoja ancha siempreverde basado en el producto MOD12Q1
33	I03igb3	Bosque caducifolio de hoja delgada basado en el producto MOD12Q1
34	I04igb3	Bosque caducifolio de hoja ancha basado en el producto MOD12Q1
35	I05igb3	I05igb3 Bosques mixtos basados en el producto MOD12Q1
36	I06igb3	Arbustos cerrados basados en el producto MOD12Q1
37	I07igb3	Arbustos abiertos basados en el producto MOD12Q1
38	I08igb3	Bosque de sabanas leñosas basado en el producto MOD12Q1
39	I09igb3	Sabanas basadas en el producto MOD12Q1
40	I10igb3	Pastizales basados en el producto MOD12Q1

Continuación Tabla A1. Covariables ambientales empleadas.

Continuation of Table A1. Environmental covariates used.

N°	Covariables	Descripción
41	l11igb3	Humedales permanentes basados en el producto MOD12Q1
42	l12igb3	Cultivos basados en el producto MOD12Q1
43	l13igb3	Area urbana y construcción basada en el producto MOD12Q1
44	l14igb3	Mosaico de vegetación natural / cultivo basado en el producto MOD12Q1
45	l15igb3	Nieve y hielo basado en el producto MOD12Q1
46	l16igb3	Tierras estéril o escasamente vegetado basado en el producto MOD12Q1
47	g01igb3	Tipos de cobertura terrestre para 2001 basados en las clases IGBP de MODIS
48	g02igb3	Tipos de cobertura terrestre para 2002 basados en las clases IGBP de MODIS
49	g04igb3	Tipos de cobertura terrestre para 2004 basados en las clases IGBP de MODIS
50	g10igb3	Tipos de cobertura terrestre para 2010 basados en las clases MODIS IGBP
51	g11igb3	Tipos de cobertura terrestre para 2011 según las clases MODIS IGBP
52	g12igb3	Tipos de cobertura terrestre para 2012 basados en las clases MODIS IGBP
53	glcesa3	Clases de cobertura terrestre de basadas en las imágenes MERIS FR
54	g01esa3	Tierras de cultivo después de la inundación o irrigadas (o acuáticas)
55	g02esa3	Tierras de cultivo de secano
56	g03esa3	Tierras de cultivo de mosaico (50-70%) / vegetación (pastizales / matorrales / bosque) (20-50%)
57	g04esa3	Vegetación mosaica (pastizales / matorrales / bosques) (50-70%) / tierras de cultivo (20-50%)
58	g05esa3	Bosque perenne o semideciduo de hoja perenne (> 15%) de hoja ancha (> 15%)
59	g06esa3	Bosque caducifolio de hoja ancha cerrado (> 40%) (> 5m)
60	g07esa3	Bosque abierto (15-40%) bosque caducifolio de hoja ancha / bosques (> 5 m)
61	g08esa3	Bosque siempre verde cerrado (> 40%) acanalado (> 5m)
62	g09esa3	Bosques caducifolios o siempre verde abiertos (15-40%) de hoja caduca (> 5m)
63	g10esa3	Bosques de hoja ancha y hojas de hoja mixta (> 15%) (> 5m)
64	g11esa3	Bosque de mosaicos o matorrales (50-70%) / pastizal (20-50%)
65	g12esa3	Pastizales de mosaico (50-70%) / bosque o matorrales (20-50%)
66	g13esa3	Vegetación herbácea cerrada (> 15%) (pastizales, sabanas o líquenes / musgos)
67	g14esa3	Arbustos cerrados (> 15%) (de hoja ancha o de hojas sueltas, de hoja perenne o de hoja caduca) (<5m)
68	g15esa3	Vegetación escasa (<15%)
69	g16esa3	Bosque de hoja ancha cerrado a abierto (> 15%) regularmente inundado (semipermanente o temporalmente) - Agua dulce o salobre
70	g17esa3	Bosque cerrado o arbustivo de hoja ancha (> 40%) inundado permanentemente - Agua salina o salobre
71	g18esa3	Vegetación de pastizales o leñosos de cerrado a abierto (> 15%) en suelo inundado regularmente o inundado - Agua dulce, salobre o salina
72	g19esa3	Superficies artificiales y áreas asociadas (Áreas urbanas > 50%)
73	g20esa3	Áreas desnudas
74	g21esa3	Cuerpos de agua
75	g22esa3	Nieve y hielo permanente
76	Glcjrc3	Mapa Global de Cobertura Terrestre para el año 2000 (GLC2000)
77	geaisg3	Edades geológicas basadas en la geología superficial.
78	gachws3	Porcentaje de cobertura Acrisols
79	gabhws3	Porcentaje de cobertura Albeluvisols
80	ganhws3	Porcentaje de cobertura de andosoles

Continuación Tabla A1. Covariables ambientales empleadas.

Continuation of Table A1. Environmental covariates used.

N°	Covariables	Descripción
81	Garhws3	Porcentaje de cobertura Arenosoles
82	gclhws3	Porcentaje de cobertura de calcisoles
83	gcmhws3	Porcentaje de cobertura Cambisols
84	gchhws3	Porcentaje de cobertura de Chernozems
85	gcrhws3	Porcentaje de cobertura Crisoles
86	gfrhws3	Porcentaje de cobertura Ferralsoles
87	gflhws3	Porcentaje de cobertura Fluvisols
88	gglhws3	Porcentaje de cobertura Gleysols
89	ggyhws3	Porcentaje de cobertura Gypsisols
90	ghshws3	Porcentaje de cobertura Histosoles
91	gkshws3	Porcentaje de cobertura Kastanozems
92	glphws3	Porcentaje de cobertura de leptosoles
93	glxhws3	Porcentaje de cobertura de lxisoles
94	Glvhws3	Porcentaje de cobertura Luvisols
95	gnthws3	Porcentaje de cobertura Nitisols
96	gphhws3	Porcentaje de cobertura de Phaeozems
97	gplhws3	Porcentaje de cobertura Planosoles
98	gpthws3	Porcentaje de cobertura Plinthosols
99	gpzhws3	Porcentaje de cobertura Podzols
100	grghws3	Porcentaje de cobertura Regosols
101	gschws3	Porcentaje de cobertura Solonchaks
102	gsnhws3	Porcentaje de cobertura Solonetz
103	gumhws3	Porcentaje de cobertura Umbrisols
104	gvrhws3	Porcentaje de cobertura de Vertisoles
105	galhws3	Porcentaje de cobertura Alisoles
106	gathws3	Porcentaje de cobertura Anthrosols
107	gsthws3	Porcentaje de cobertura de Stagnosols
108	In1dms	Primer componente principal de las luces a largo plazo en las imágenes nocturnas
109	In2dms	Segundo componente principal de las luces a largo plazo en las imágenes nocturnas
110	Inmdms	Valor medio de las luces a largo plazo en las imágenes nocturnas
111	gacgem	Mapa de accesibilidad global
112	iflgre	Paisajes forestales intactos basados en Greenpeace
113	lmtgsh	Máscara de tierra basada en GSHHS
114	lmbgsh	Máscara continental (0-1) basada en GSHHS
115	Glwwwf	Base de datos mundial de aguas terrestres
116	wmkmod	Máscara de agua global basada en producto MOD44W
117	cntgad	Mapas de países basados en GADM versión 2
118	smkisir	Máscara de suelo derivada de vegetación, cobertura del suelo y máscaras de agua
119	Bioclivs	Ambientes bioclimáticos
120	Climavs	Tipos de climas
121	Cobervs	Cobertura vegetal y uso actual de las tierras
122	Pisosvs	Pisos bioclimáticos
123	Suelosvs	Ordenes taxonómicos de suelos