



Fecha de recibido: 14-07-2023
Fecha de aceptado: 30-11-2023
DOI: 10.22490/21456453.7003

ESTIMACIÓN DE ANALITOS DEL SUELO EN LA ALTILLANURA, CON TELEDETECCIÓN SENTINEL-2 Y MODELOS DE REGRESIÓN

ESTIMATION OF SOIL ANALYTES IN THE PLATEAU, WITH SENTINEL-2 REMOTE SENSING AND REGRESSION MODELS

Andrés Felipe Gómez Chávez¹
Jeimy Katherin Feo Mahecha²
Sergio David Parra González³

¹Ingeniero Agrónomo. andres.gomez.chavez@unillanos.edu.co

²Magíster en Sistemas de Información Geográfica. jeimy.feo-mahecha@stud.sbg.ac.at

³Magíster en Ciencia en Suelo, Universidad de los Llanos, Grupo de Investigación

Innovación en Sistemas Agrícolas y Forestales ISAF, Villavicencio, Colombia.

sdparra@unillanos.edu.co

Citación: Gómez, A., Feo, J. y Parra, S. (2024). Estimación de analitos del suelo en la altillanura, con teledetección Sentinel-2 y modelos de regresión. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 269-289. <https://doi.org/10.22490/21456453.7003>

RESUMEN

Contextualización: la incorporación de nuevas técnicas y tecnologías para conocer la composición y las características de los suelos usados en la producción agrícola está en auge. Los productos de licencia libre como las imágenes satelitales Sentinel-2, permiten correlacionar las propiedades edáficas con índices espectrales.

Vacío de conocimiento: en el sector agrícola, los índices calculados a partir de imágenes satelitales se han centrado en la caracterización de la vegetación. En menor proporción, se han realizado estudios en los que se evalúa la correlación de aquellos aplicados a la prospección mineralógica para correlacionarlos con las características químicas del suelo.

Propósito: este estudio se desarrolló con el objetivo de evaluar la correlación de los índices de óxidos férricos (B11/B8), silicatos ferrosos (B12/B11), hierro ferroso (B12/B8 + B3/B4) y alteración (B11/B12), con el contenido de elementos químicos de importancia en la producción de cultivos.

Metodología: se seleccionó un campo de cultivo de 282 hectáreas en el municipio de Puerto López en el departamento de Meta. Usando una imagen Sentinel-2 se calcularon los índices evaluados. Después de obtener los índices, se seleccio-

naron 40 sitios para realizar un muestreo compuesto de suelos para determinar las siguientes características: pH en agua (1:1 potenciométrico), Materia Orgánica (Walkey and Black), P (Bray II), Al (KCl 1N), Ca, Mg, K y Na (Acetato de Amonio), Fe (DTPA). Con la información obtenida, se realizó un análisis de regresión múltiple usando el método el "Stepwise"; como variables independientes, se usaron las capas ráster con los índices calculados y como variable a predecir los valores de las propiedades determinadas en el laboratorio.

Resultados y conclusiones: los índices evaluados presentaron una correlación mayor a 0.60 con el contenido de Mg y Ca. Una correlación entre 0.40 y 0.60 fue hallada entre los índices y el contenido de carbono orgánico y Fe. Los modelos de regresión calculados arrojaron ajustes de 0.54, 0.47, y 0.33 para Mg, Ca, y Fe, respectivamente. Los hallazgos de esta investigación permiten concluir que a partir de imágenes Sentinel-2 es posible estimar la concentración de elementos disponibles para las plantas en las condiciones edafoclimáticas de la altillanura colombiana.

Palabras clave: agrimensura, agronomía, altiplano, análisis de datos, mapa del suelo

ABSTRACT

Contextualization: The incorporation of new techniques and technologies to learn about the composition and characteristics of soils used in agricultural production is booming. Free license products such as Sentinel-2 satellite images allow the correlation of soil properties with spectral indices.

Knowledge gap: In the agricultural sector, indices calculated from satellite images have focused on vegetation characterization. To a lesser extent, studies have been conducted to evaluate the correlation of those applied to mineralogical prospecting to correlate them with the chemical characteristics of the soil.

Purpose: This study was developed with to evaluate the correlation of the indexes of ferric oxides (B11/B8), iron silicates (B12/B11), ferrous iron (B12/8 + B3/4), and alteration (B11/B12), with the content of chemical elements of importance in crop production.

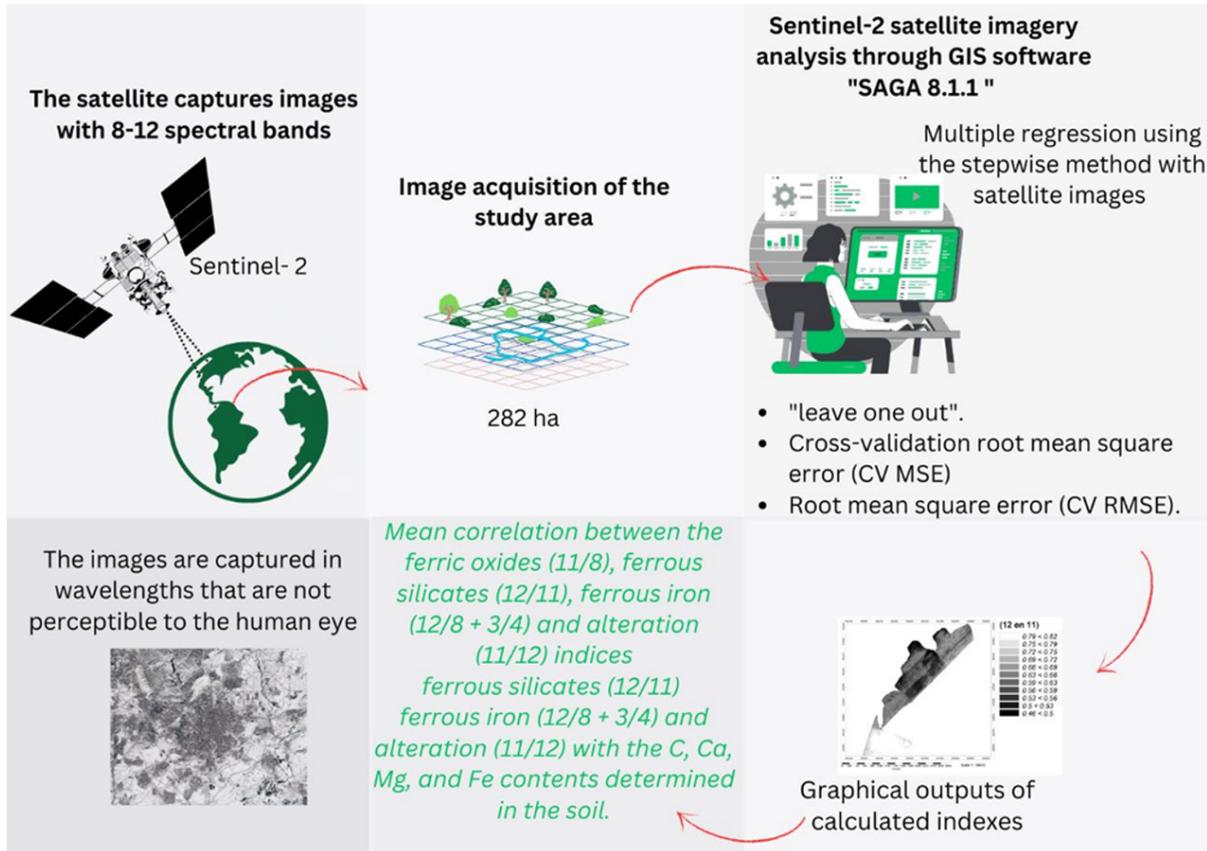
Methodology: A crop of 282 hectares was selected in the municipality of Puerto López in the Meta department. Using a Sentinel-2 image, the evaluated indices were calculated. After obtaining the indices, 40 sites were selected for a composi-

te sampling of soils to determine the following characteristics: pH in water (1:1 potentiometric), organic matter (Walkley and Black), P (Bray II), Al (KCl 1N), Ca, Mg, K, and Na (Ammonium Acetate), Fe (DTPA). With the information obtained, a multiple regression analysis was carried out using the "Stepwise" method. The raster layers with the calculated indices were used as independent variables, and the values of the properties determined in the laboratory were used as the variables to predict.

Results and conclusions: The evaluated indexes showed a correlation greater than 0.60 with Mg and Ca content. A correlation between 0.40 and 0.60 was found between the indices and organic carbon and Fe content. The calculated regression models revealed fits of 0.54, 0.47, and 0.33 to Mg, Ca, and Fe, respectively. The findings of this research lead to the conclusion that it is possible from Sentinel-2 images to estimate the concentration of elements available to plants in the edaphoclimatic conditions of the Colombian Altillanura.

Keywords: agronomy, data analysis, plateaus, soil maps, surveying

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores

1 INTRODUCCIÓN

La era digital ha permeado diferentes aspectos de la vida cotidiana, convirtiéndose en una gran fuerza transformadora de comportamientos y costumbres, la agricultura no es ajena a esta realidad. Un ejemplo de esto, es la utilización de sensores de diferente tipo, drones, técnicas de

minería de datos, el uso de la big data, el aprendizaje de máquinas, que han abierto el camino a la agricultura 4.0 o “agricultura inteligente” (Klerkx, *et al.*, 2019). Desde la década del 60 del siglo XX se reconoce el potencial de la información obtenida por los sensores remotos y la aplicación de los

índices espectrales, como una herramienta para la discriminación de áreas a partir de parámetros de interés agronómico (Jackson 1983). La posibilidad de segmentar áreas heterogéneas en subáreas homogéneas usando sensores e índices, depende en gran medida de las características de las plataformas y de dichos sensores, esto se resume en la resolución espectral, espacial y temporal (Xue y Su 2017).

Los índices espectrales son operaciones matemáticas que realizan la transformación espectral de un conjunto de bandas capturadas con un sensor remoto, permiten identificar las características específicas de una superficie para que sean representadas en tonos de colores (Bouhennache *et al.* 2019). Los índices espectrales más usados son aquellos que corresponden a divisiones entre bandas, estos relacionan las longitudes de onda en la que los cuerpos objeto de estudio presentan mayor reflectancia y absorbanza, teniendo como resultado que el píxel o grupo de píxeles en el que estos se encuentran sea resaltados en una imagen digital (Sekandari *et al.*, 2020). Gran variedad de índices han sido propuestos para la clasificación de áreas; en Kaur y Pandey (2022); Xue y Su (2017) se hace una revisión detallada de los principales. Los sensores satelitales se utilizan para asistir diferentes tipos de actividades científicas, predicción de tiempo, exploración mineral, cartografía de tierras baldías, gestión de recursos hídricos, cobertura de la tierra, monitoreo de cultivos entre otros (Pei *et al.*, 2021).

Las imágenes hiperespectrales ha desempeñado un papel clave en el estudio de las relaciones entre los procesos fisiológicos de la planta y sus características espectrales, permitiendo la creación de indicadores relevantes para la productividad de los cultivos (Berger *et al.*, 2022). El satélite Sentinel-2 toma imágenes multiespectrales a resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 m, cuenta con 13 bandas y está incluido dentro del programa Copernicus de monitoreo de la tierra (Houborg *et al.*, 2015). Los índices de óxidos férricos, silicatos ferrosos, hierro ferroso y alteración son las operaciones entre bandas usadas ampliamente en el estudio geológico con la finalidad de discriminar zonas de acumulación de minerales, que pueden ser calculados con las bandas del satélite Sentinel-2 (Van der Meer, *et al.*, 2014).

La altillanura es un paisaje representativo y de importancia agrícola en el departamento del Meta, esta se origina por los procesos tectónicos ocurridos al final del pleistoceno que originan su solevantamiento con respecto a las planicies de aluviales de los ríos Meta y Guayabero (IGAC y CIAF, 2018). Lo anterior tiene como consecuencia el efecto pedogenético de aislamiento, ayudando de forma marcada a los procesos de alteración y pérdida de minerales, favoreciendo el desarrollo de suelos de alto grado de evolución como son los Oxisoles y Ultisoles (Castro 2003). Los estudios de la mineralogía de la fracción arcilla de estos suelos indican la presencia de Caolinita y trazas de Gibsita, que son minerales de alto grado de alteración (IGAC 2004; IGAC y CIAF, 2018). Partiendo de lo

expresado anteriormente se plantea este trabajo con la finalidad de responder la siguiente pregunta: ¿Los índices de silicatos ferrosos y óxidos ferrosos, calculados de

las bandas del satélite Sentinel-2 se pueden correlacionar con el contenido de elementos disponibles en el suelo en un campo de cultivo, en la altillanura colombiana?

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se realizó en la finca Santa Helena en el municipio de Puerto López, Meta (latitud 4.181283, longitud -71.989966; WGS-84 EPSG 4326), en un lote de 282.15 hectáreas, que se dedica a la producción de cultivos semestrales. Los suelos de esta finca se clasifican como Typic Hapludox (IGAC 2004); al momento de realizar el estudio el suelo se encontraba sin cobertura vegetal. Inicialmente se realizó un recorrido a pie con la finalidad de hacer la medición del área de estudio usando un GPS Garmin 64SX. La precisión de las coordenadas al momento de realizar la mediciones fue de 3 metros.

Obtención de Imágenes Sentinel-2

La imagen con la que se desarrolló este trabajo se descargó de la página web de la Agencia Espacial Europea (ESA), Copernicus Open Access Hub ([Open Access Hub \(copernicus.eu\)](https://openaccesshub.copernicus.eu)) (ESA, 2014). Después de realizar el registro en el sitio de internet se descargó la imagen: S2B_MSIL1C_20190406T151709_N0207_R125_

T18NZK_20190406T200611. Según los metadatos, la imagen fue tomada en horas de la tarde (15:17 horas). Toda el área de estudio fue captada por una sola imagen. El porcentaje de nubosidad en el área de estudio fue de cero.

Obtención de índices espectrales

Al conjunto de bandas (B) descargadas se les realizó la corrección atmosférica usando el método de la sustracción del objeto oscuro, proceso que se realizó usando el complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) versión 5.42. (Congedo, 2021). Además, se realizó el remuestreo de las bandas para una resolución espacial de 10m. Posteriormente, se calcularon los siguientes índices: óxidos férricos (Ecuación 1), silicatos ferrosos (Ecuación 2), hierro ferroso (Ecuación 3) y alteración (Ecuación 4) (Van der Meer, Van der Werff y Van Ruitenbeek 2014). Las bandas usadas en el cálculo de los índices presentaban las siguientes resoluciones espectrales, banda 3 (35 nm), banda 4 (30

nm), banda 8 (105 nm), banda 11 (90 nm) y banda 12 (180 nm). A partir de los índices obtenidos, se procedió a seleccionar 40 puntos en los que los valores de los índices fueran contrastantes. La selección se

realizó de forma manual. Los puntos seleccionados se cargaron a un GPS Garmin (GPS Garmin 64SX) y fueron los lugares seleccionados para el posterior muestreo de suelo.

$$\text{Óxidos Férricos} = \frac{\text{Banda 11 (1610 nm)}}{\text{Banda 8 (842 nm)}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$\text{Silicatos Ferrosos} = \frac{\text{Banda 12 (2190 nm)}}{\text{Banda 11 (1610 nm)}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\text{Hierro Ferroso} = \frac{\text{Banda 12 (2190 nm)}}{\text{Banda 8 (842 nm)}} + \frac{\text{Banda 3 (560 nm)}}{\text{Banda 4 (665 nm)}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\text{Alteración} = \frac{\text{Banda 11 (1640 nm)}}{\text{Banda 12 (1610 nm)}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Muestreo de suelos

En cada uno de los 40 puntos seleccionados se tomó una muestra de suelo compuesta de 6 submuestras. Las muestras se tomaron con barreno Edelman hasta los 20 cm de profundidad. A cada una de las muestras se les determinó las siguientes características: pH en agua (1:1 potenciométrico), Materia Orgánica (Walkey and Black), P (Bray II), Al (KCl 1N), Ca, Mg, K y Na (Acetato de Amonio), Fe (DTPA) (IGAC 2006).

Análisis de la información obtenida

Con los valores de los analitos determinados en cada punto y los índices es-

pectrales respectivos, se creó una base de datos que se usó en el cálculo de la correlación de Pearson. Después de identificar las variables que presentaron mayor correlación con los índices calculados, en el programa SAGA GIS versión 8.1.1 (Conrad *et al.* 2015), en el módulo "Spatial and Geostatistics" se realizó un análisis de regresión múltiple, usando el método el "Stepwise"; como variables independientes se usaron las capas ráster del índice de óxidos férricos, silicatos ferrosos, hierro ferroso y alteración, así como variable a predecir la capa de puntos con los valores de las propiedades de los suelos determinadas en el laboratorio (Nipper 2017). A cada uno de los modelos de regresión obtenidos se le realizó la validación cruzada usando el método "Leave one out".

Además, se determinó el error cuadrático medio de la validación cruzada (CV MSE) y la raíz cuadrada del error medio

(CV RMSE), el proceso de obtención y validación de los resultados se detalla en la Figura 1.

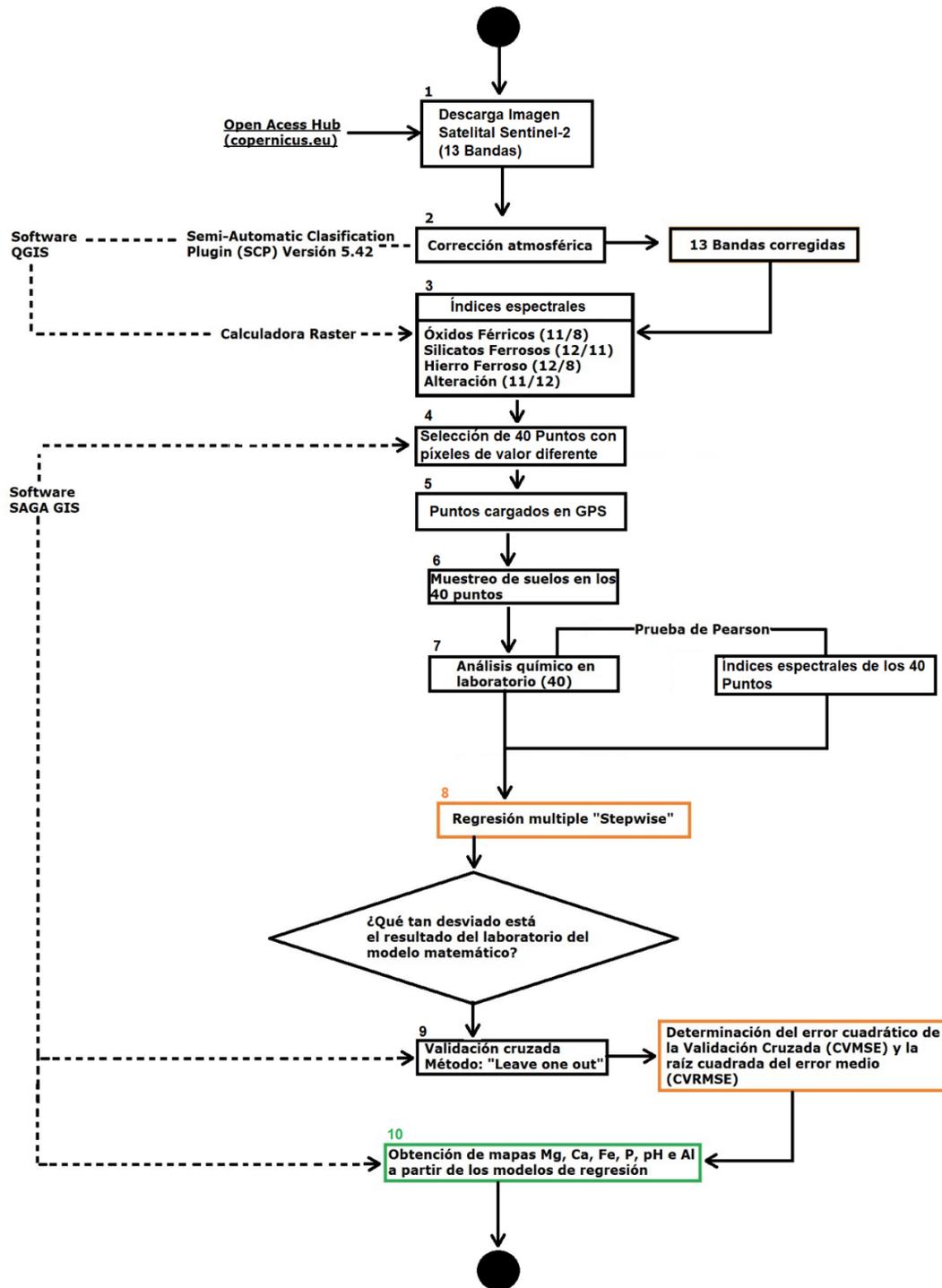


Figura 1. Flujograma de obtención y validación de los resultados.

Fuente: autores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN **3**

De forma general se observó que el contenido de materia orgánica fue de medio a bajo, el pH varió entre 4.5 y 5.6, valores que pueden ser considerados como extremadamente ácido y fuertemente ácido, respectivamente (IGAC, 2004). De las variables determinadas en el suelo, el fósforo y el sodio intercambiable presentaron los coeficientes de variación más altos (por encima del 80%). El promedio del contenido de aluminio intercambiable en el área de estudio fue de 0.51 Cmolc Kg⁻¹, presentado como valor máximo 1.2 Cmolc Kg⁻¹. Llama la atención que los contenidos de Fe presentaron la mayor varianza, la

cual, puede ser atribuida a la aplicación de carbonato de calcio, que tiene efecto en el pH del suelo y en la disponibilidad de los elementos menores, entre ellos el hierro (Bityutskii *et al.*, 2019; Rengel, 2015). Los cationes de reacción alcalina K, Ca y Mg variaron su disponibilidad entre (0.11 – 0.5 Cmolc Kg⁻¹), (0.8–3.2 Cmolc Kg⁻¹) y (0.1-1.2 Cmolc Kg⁻¹) respectivamente. Todos los índices calculados presentaron valores positivos, siendo los más altos para el índice de hierro ferroso y los menores para el de alteración (Tabla 1 y Figura 2). El coeficiente de variación de las operaciones entre bandas se situó de 12 a 17%.

■ **Tabla 1.** Resumen de las variables determinadas en el área de estudio

Analito	n	media	D.E	Var	CV	Min	Max
M.O. (%)	40	2.47	0.47	0.22	18.99	1.4	3.2
C%	40	1.39	0.34	0.11	24.18	0.15	1.86
P (mg Kg⁻¹)	40	9.99	8.26	68.22	82.68	0.3	42.6
pH (1:1)	40	4.99	0.24	0.06	4.86	4.5	5.6
Al (Cmolc Kg⁻¹)	40	0.51	0.31	0.09	60.82	0	1.2
Ca (Cmolc Kg⁻¹)	40	1.67	0.54	0.29	32.34	0.8	3.2
Mg (Cmolc Kg⁻¹)	40	0.55	0.27	0.07	48.49	0.1	1.2
K (Cmolc Kg⁻¹)	40	0.32	0.1	0.01	31.09	0.11	0.5
Na (Cmolc Kg⁻¹)	40	0.04	0.03	0.0012	85.71	0.01	0.17
Fe (mg Kg⁻¹)	40	73.38	34.07	1160.48	46.43	28.13	140.64

CIC (Cmolc Kg⁻¹)	40	13.56	2.58	6.68	19.06	5.5	18.5
11/8	40	1.65	0.29	0.08	17.52	1.06	2.12
11/12	40	0.66	0.09	0.01	13.53	0.52	0.81
(12/8 + 3/4)	40	2.09	0.26	0.07	12.60	1.73	2.63
11/12	40	1.55	0.20	0.04	13.13	1.24	1.92

n: número de registros, D.E.: desviación estándar, Var: Varianza, CV: Coeficiente de Variación, Max: Máximo, Min: Mínimo.

Fuente: autores.

El valor promedio de los contenidos de P, K, Ca, Mg, y Al hallado en los suelos es calificado como: Bajo, Alto, Bajo, Bajo y No limitante para el desarrollo de los cultivos, respectivamente (Tabla 1) (ICA, 1992; IGAC, 2004). A pesar de que el contenido de la mayoría de los elementos se calificó como bajo, los valores se encuentran por encima de los reportados para los perfiles modales de la zona de estudio y Oxisoles en condiciones naturales (IGAC, 2004; IGAC y CIAF, 2018). Es de resaltar que los valores de CIC (Tabla 1) se encuentran en la franja reportada de esta característica para Oxisoles en campos de cultivo de Costa Rica (Camacho *et al.*, 2021). La variación observada en el contenido de elementos intercambiables en el suelo se explica por las prácticas de manejo usadas en los predios estudiados. Las cuales se fundamentan en la utilización de enmiendas como la cal dolomita, fertilizantes de síntesis química (Urea, DAP y KCL) y la adición de los residuos de las cosechas (Campuzano *et al.* 2014; Pérez y Afanador 2017). Esto tiene como resultado una reducción en el contenido de aluminio intercambiable y un incremento en

el contenido de elementos de importancia en la nutrición vegetal, por encima de niveles que son típicamente reportados en los suelos de la altillanura colombiana (Castro, 2003; IGAC y CIAF, 2018).

En la Tabla 2 sólo se presentan las variables del suelo y los índices espectrales que presentaron correlación significativa o altamente significativa (P-valor por debajo de 0.05). Todos los índices evaluados presentaron una correlación mayor del 60% con el contenido de Ca y Mg; en el caso del índice de alteración (B11/B12), la correlación fue negativa. Una correlación entre 40 y 60 % se presentó para todos los índices con el contenido de carbono orgánico y Fe. El contenido de P se correlacionó de forma positiva con los índices evaluados, excepto para el índice de alteración. El pH y el Aluminio intercambiable presentaron la mejor correlación con el índice de hierro ferroso (B12/B8 + B3/B4), siendo inversa la relación en el caso del Aluminio. Ninguna de las operaciones entre bandas usadas en este trabajo presentaron correlación con el contenido de K intercambiable.

■ **Tabla 2.** Correlación de Pearson de los índices calculados y las variables del suelo evaluadas

Índice	Propiedad del suelo	n	P	P-Valor
11/8	C%	40	0.52	0.0005
11/8	P (mg Kg ⁻¹)	40	-0.34	0.034
11/8	pH (1:1)	40	0.32	0.0448
11/8	Ca (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.61	<0.0001
11/8	Mg (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.53	0.0005
11/8	Na (Cmolc Kg ⁻¹)	40	-0.35	0.0256
11/8	Fe (mg Kg ⁻¹)	40	0.58	0.0001
12/11	C%	40	0.41	0.0092
12/11	P (mg Kg ⁻¹)	40	-0.33	0.0382
12/11	pH (1:1)	40	0.30	0.0563
12/11	Al (Cmolc Kg ⁻¹)	40	-0.34	0.033
12/11	Ca (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.65	<0.0001
12/11	Mg (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.68	<0.0001
12/11	Fe (mg Kg ⁻¹)	40	0.51	0.0008
(12/8 + 3/4)	C%	40	0.43	0.0051
(12/8 + 3/4)	P (mg Kg ⁻¹)	40	-0.37	0.0193
(12/8 + 3/4)	pH (1:1)	40	0.35	0.0256
(12/8 + 3/4)	Al (Cmolc Kg ⁻¹)	40	-0.36	0.0226
(12/8 + 3/4)	Ca (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.69	<0.0001
(12/8 + 3/4)	Mg (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.69	<0.0001
(12/8 + 3/4)	Na (Cmolc Kg ⁻¹)	40	-0.32	0.045
(12/8 + 3/4)	Fe (mg Kg ⁻¹)	40	0.58	0.0001
11/12	C%	40	-0.44	0.004

11/12	P (mg Kg ⁻¹)	40	0.30	0.057
11/12	pH(1:1)	40	-0.30	0.063
11/12	Al (Cmolc Kg ⁻¹)	40	0.31	0.049
11/12	Ca (Cmolc Kg ⁻¹)	40	-0.63	<0.0001
11/12	Mg (Cmolc Kg ⁻¹)	40	-0.64	<0.0001
11/12	Fe (mg Kg ⁻¹)	40	-0.50	0.001

n: número de registros, **P:** valor de la correlación de Pearson, **P-Valor:** Significancia.

Fuente: autores.

La correlación entre el contenido de carbono orgánico del suelo y los índices obtenidos en este trabajo puede ser explicado al uso de las bandas 11 y 12 en los cálculos. Se ha encontrado que dichas bandas tienen una alta correlación con los contenidos de carbono orgánico en el suelo (Gholizadeh *et al.*, 2018). Lo cual se explica en tanto las longitudes de onda entre 1000 nm y 2100 nm se hallan diferentes compuestos del suelo como el agua, diversos minerales de la fracción arcilla y materia orgánica (Viscarra *et al.*, 2011).

La relación entre el contenido de carbono orgánico del suelo y las bandas de Sentinel-2, especialmente aquellas del segmento de infrarrojo de onda corta (SWIR), en campos agrícolas fue comprobada en el trabajo de Castaldi *et al.*, (2019). La causa de este comportamiento se debe a que varios de los compuestos de la materia orgánica del suelo como la lignina, la celulosa y los almidones tienen reflectancia en longitudes de onda entre los 2100 y 2300 nm (Ben-Dor, 1997).

A su vez, la correlación observada entre el índice de óxidos férricos (B11/B8) y el contenido de Fe del suelo (Tabla 2 y Tabla 3), se puede explicar en la detección del proceso de ferralitización que ocurre en suelos con condiciones de buen drenaje, que tiene como resultado la acumulación de óxidos de hierro y aluminio en la fracción arcilla del suelo (Silva *et al.*, 2022). Se ha reportado que los óxidos de hierro tienen una alta capacidad de absorción de longitudes de onda que se encuentran en el rango de 800 a 900 nm (Soydan *et al.*, 2021). Este rango de longitud de onda está contenido en las bandas 8 y 8a de Sentinel-2 (van der Meer *et al.*, 2014).

De los índices calculados el de hierro ferroso (B12/B8 + B3/B4) presentó los valores más altos, en contraposición al de silicatos ferrosos (B12/B11), que arrojó los menores (Figura 2) a, b, c y d). En las salidas gráficas se observa que los óxidos férricos (B11/B8), silicatos ferrosos (B12/B11) y hierro ferroso (B12/B8 + B3/B4) concentran sus valores más altos en

la zona sur y los valores más bajos en la zona central. El índice de alteración tiene un comportamiento inverso en su distri-

bución comparados con los otros índices obtenidos (Figura 2).

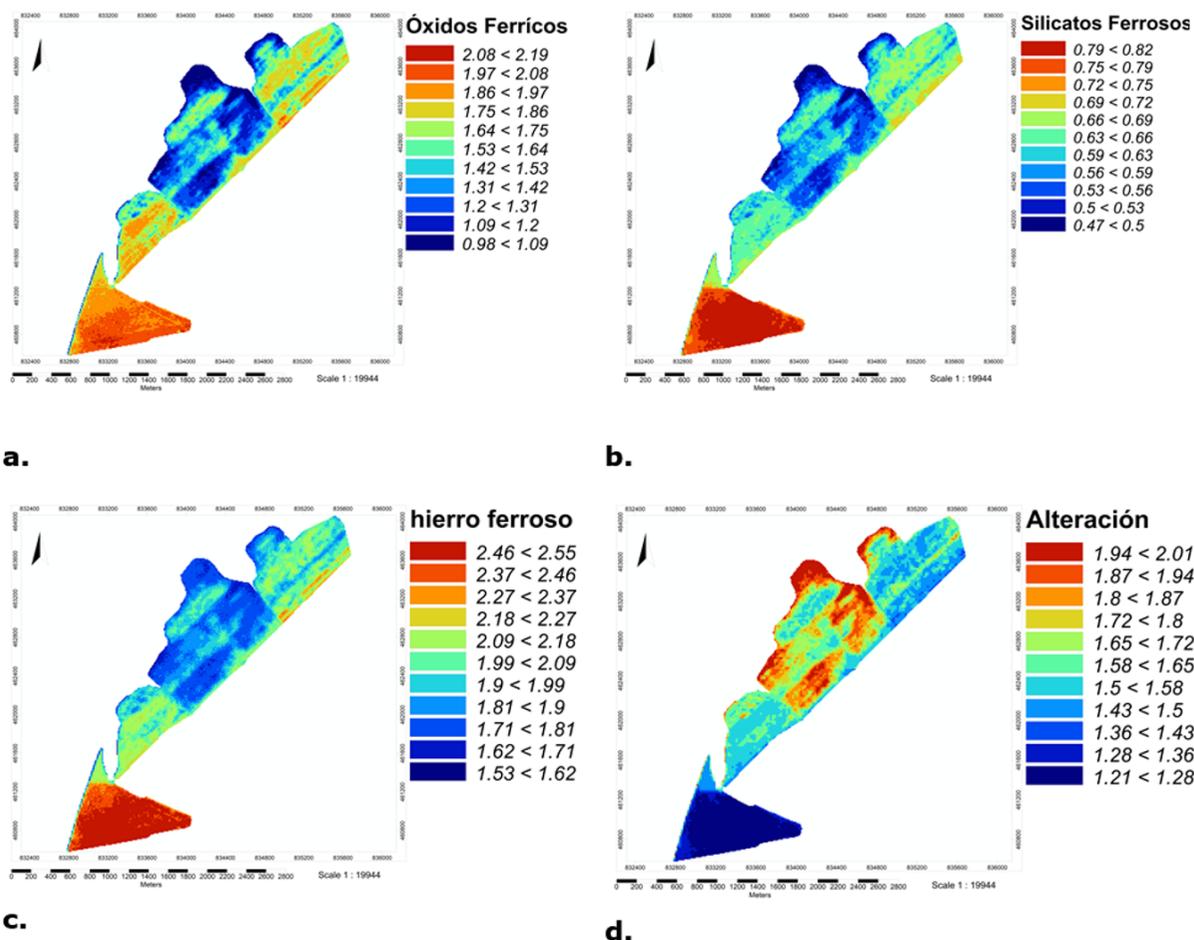


Figura 2. Salidas gráficas de los Índices calculados: **a.** óxidos férricos (11/8), **b.** silicatos ferrosos (12/11), **c.** hierro ferroso (12/8 + 3/4), **d.** alteración (11/12)

Fuente: autores.

Como resultado del análisis de regresión en el que se relacionaron los índices calculados como variables independientes y los valores de los analitos del suelo como dependientes, se obtuvieron siete modelos

con significancia estadística (Tabla 3). Las operaciones entre bandas que más se presentaron en los modelos fueron el índice de óxidos férricos (B11/B8) y el de hierro ferroso (B12/B8 + B3/B4). Los modelos

planteados con los otros índices no arrojaron significancia estadística. Los mayores ajustes (R²) se obtuvieron para la determinación de los contenidos de Mg, Ca y Fe, respectivamente. Los menores ajustes para las variables del suelo P, pH y Al. El error

cuadrático medio y la raíz cuadrada del error cuadrático medio de la validación cruzada fueron inferiores para los modelos 1, 6 y 7. El modelo de regresión que presentó mayor error (CV MSE y CV RMSE) fue el obtenido para hierro (Tabla 3).

■ **Tabla 3.** Modelos de regresión múltiple calculados

ID	Modelo	R ²	R ² VC	CV MSE	CV RMSE
1	Mg ^{**} = (12/8 + 3/4)*1.3065-(11/8)*0.5980-1.1896	0.54	0.52	0.0378	0.1945
2	Ca ^{**} = (12/8 + 3/4)*1.4059 -1.2739	0.47	0.45	0.1666	0.4081
3	Fe ^{**} = (11/8)*68.0380-39.1382	0.33	0.33	815.7026	28.5605
4	C ^{**} = (11/8)*0.6088+0.3871	0.27	0.25	0.0916	0.3028
5	P* = (12/8 + 3/4)*-11.5578+34.1496	0.13	0.13	62.9502	7.9341
6	pH* = (12/8 + 3/4)*0.3250+4.3105	0.12	0.11	0.05465	0.2337
7	Al* = (12/8 + 3/4) + 1.3822	0.12	0.12	0.0874	0.2464

ID: identificación del modelo, R²: ajuste del modelo, R²VC: Ajuste de la Validación cruzada, CV MSE: error cuadrático medio de la validación cruzada, CV RMSE: raíz cuadrada del error cuadrático medio. **: P-valor > 0.01* : P-valor > 0.05

Fuente: autores.

En la salida gráfica de la concentración de los analitos calculados por los modelos de regresión construidos (Figura 3), se observa que los valores más altos de Mg, Ca, Fe y pH se ubican en la zona sur del área de estudio. Inversamente, los contenidos de P y Al más bajos fueron calculados en el lugar mencionado. En la zona que se calcularon los menores contenidos de P fue la de mayores contenidos de Fe,

según el modelo de regresión. De forma general se observa una variación en la gama de colores en la zona norte y central del área de estudio, en comparación con la zona sur. Esto sugiere una mayor variación de los contenidos de elementos determinados en estas áreas o una mayor sensibilidad de los resultados de la regresión a los datos de entrada.

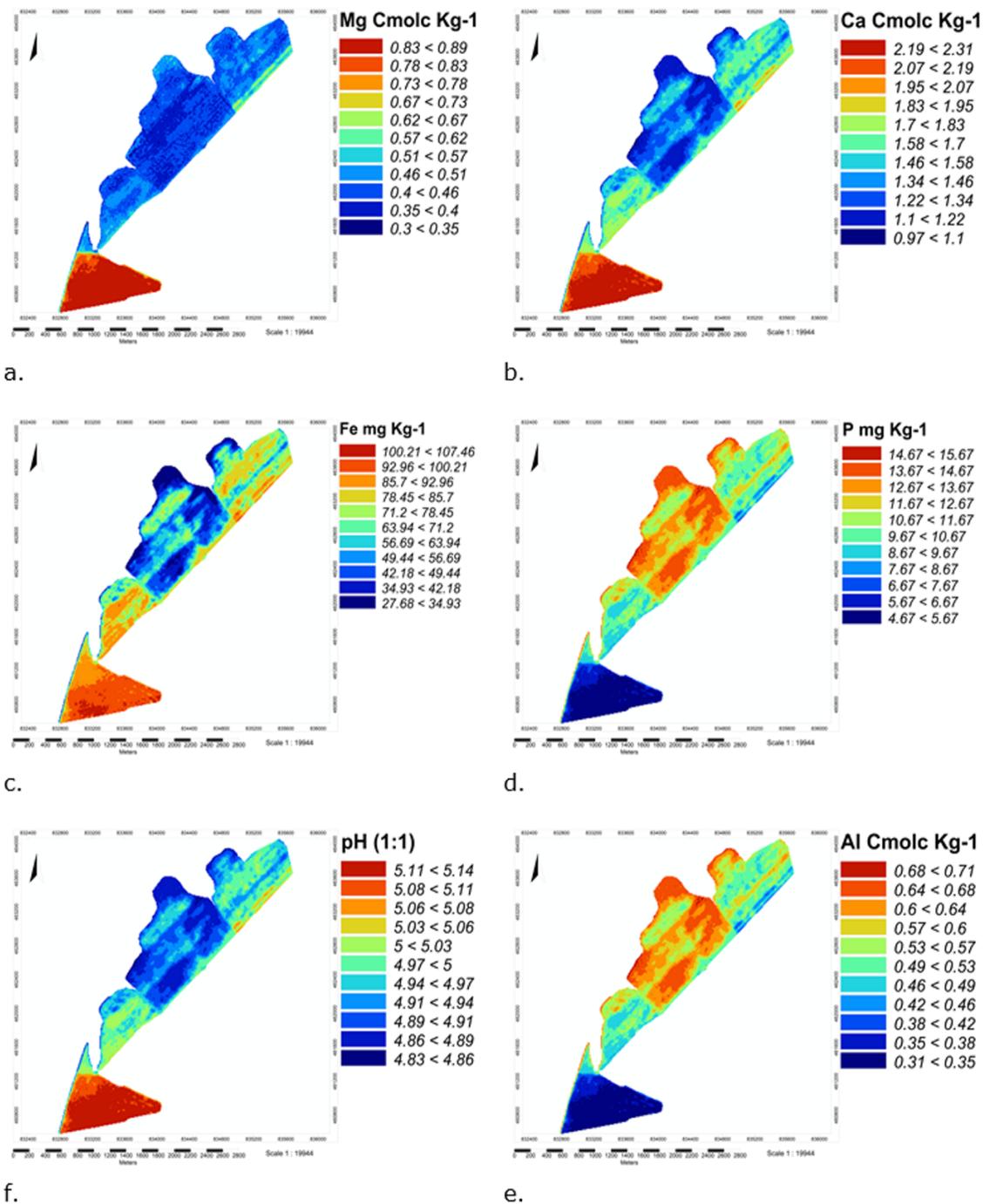


Figura 3. Salidas gráficas de los modelos de regresión calculados:
a. Mg, b. Ca, c. Fe, d. P, f. pH, e. Al

Fuente: autores.

El ajuste de los modelos de regresión usados para determinar los contenidos de Ca y Mg a partir de los índices (B11/B8) y (B12/B8 + B3/B4) llama la atención, especialmente para las condiciones en las que se realiza el estudio y el tipo de índice empleado. Es posible pensar que esta relación se puede estar presentando debido a que una práctica de manejo agronómico en la zona es la aplicación de hasta 5 MG de carbonato de calcio y de magnesio por hectárea (Campuzano *et al.* 2014; Pérez y Afanador 2017). Sin embargo, se ha indicado que las bandas de Sentinel-2 no tienen buena capacidad para discriminar la presencia de carbonatos en el suelo (Van der Meer *et al.*, 2014; Castaldi, 2021), ya que los carbonatos son detectados específicamente a la longitud de onda de 2330 nm, que no es captada por el sensor usado (Vaudour *et al.*, 2019). En este mismo sentido, se ha indicado que la relación de bandas (B11/B12) del sensor Sentinel-2, no es adecuada para el mapeo de carbonatos (Sekandari *et al.*, 2020). Lo que sugiere que puede estar ocurriendo una interacción entre la aplicación de los carbonatos y el contenido de óxidos de Fe en

el suelo (Al-Tarbouli, 2022). Sin embargo, en los diferentes índices usados en este trabajo se usaron bandas de infrarrojo de onda corta (bandas 11 y 12) que, según algunos autores, han sido usadas efectivamente en la detección de alcalinidad en suelos agrícolas (Shahrayini & Noroozi, 2022) y en la detección de algunas rocas carbonatadas (Van der Meer *et al.*, 2014). Adicionalmente, hay que tener en cuenta que el efecto de superposición de bandas puede estar incidiendo en los resultados obtenidos.

En las imágenes Sentinel-2 usadas en este trabajo la resolución espacial fue remuestreada a 10 metros, además la resolución espectral fue de: 35 nm para la banda 3, 30 nm para la banda 4, 105 nm para la banda 8, 90 nm para la banda 11 y 180 nm para la banda 12. Por lo anterior, se puede inferir que la resolución no es tan fina como la de imágenes obtenidas por los sensores de Aster, Modis y Worldview 3, lo que incide en la capacidad de discriminar minerales de una forma más eficiente (Van der Meer *et al.*, 2014; Sekandari *et al.*, 2020).

4 CONCLUSIONES

Se encontró una correlación positiva entre los índices de óxidos férricos (B11/B8), silicatos ferrosos (B12/B11), hierro ferroso (B12/B8 + B3/B4) y alteración (B11/

B12) obtenidos de imágenes Sentinel-2 y el contenido de Ca, Mg y Fe disponible en el suelo (correlación de Pearson entre 0.51 y 0.69). Además, usando los índices

de hierro ferroso (B12/B8 + B3/B4) y alteración (B11/B12) como variables independientes, fue posible construir modelos matemáticos con significancia estadística para determinar el contenido de: Mg, Ca, Fe, C, P, pH y Al en el suelo. La validación cruzada muestra un mejor desempeño de los modelos de regresión que determinan el Mg y Ca disponible (validación cruza-

da de 0.52 y 0.45, respectivamente), los modelos de regresión para determinar P, pH y Al no presentaron una validación cruzada superior a 0.13. Finalmente, en próximos estudios es necesario explorar otros índices, otros modelos de regresión como los no lineales y otras condiciones de manejo que se puedan presentar en la región de la altillanura colombiana.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Andrés Felipe Gómez Chávez: logística, investigación y conceptualización. **Jeimy Katherin Feo Mahecha:** revisión y edición. **Sergio David Parra**

González: investigación, conceptualización, metodología, análisis de datos, escritura, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

El equipo de trabajo expresa el más sincero agradecimiento a la empresa CMG Agro SAS, por la financiación de los análisis especializados requeridos para el desarrollo del trabajo.

LITERATURA CITADA

Al-Tarbouli, N. H. Y. (2022). Adsorption and physicochemical release of iron ions in soils with different content of Calcium Carbonate and Calcium

Sulfate. *Tikrit journal for agricultural sciences*, 22(3), 137-147. <https://doi.org/10.25130/tjas.22.3.16>

- Ben-Dor, E. (1997). The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short-wave infrared region (400–2500 nm) during a controlled decomposition process. *Remote Sensing of Environment*, 61(1), 1-15. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00120-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00120-4)
- Berger, K., Machwitz, M., Kycko, M., Kefauver, S. C., Van Wittenberghe, S., Gerhards, M., Verrelst, J., Atzberger, C., Van Der Tol, C., Damm, A., Rascher, U., Herrmann, I., Paz, V. S., Fahrner, S., Pieruschka, R., Prikaziuk, E., Buchaillet, Ma. L., Halabuk, A., Celesti, M., ... and Schlerf, M. (2022). Multi-sensor spectral synergies for crop stress detection and monitoring in the optical domain: A review. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113198. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113198>
- Bityutskii, N. P., Yakkonen, K. L., Petrova, A. I., Lukina, K. A., and Shavarda, A. L. (2019). Calcium Carbonate Reduces the Effectiveness of Soil-Added Monosilicic Acid in Cucumber Plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(3), 660–670. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00066-3>
- Bouhennache, R., Bouden, T., Taleb-Ahmed, A., and Cheddad, A. (2019). A new spectral index for the extraction of built-up land features from Landsat 8 satellite imagery. *Geocarto International*, 34(14), 1531-1551. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1497094>
- Camacho, M. E., Mata, R., Barantes-Viquez, M., and Alvarado, A. (2021). Morphology and characteristics of eight Oxisols in contrasting landscapes of Costa Rica. *CATENA*, 197, 104992. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104992>
- Campuzano, D. L. F., Caicedo, G. S., Narro, L., and Alfonso, H. (2014). *Corpoica H5: Primer híbrido de maíz amarillo de alta calidad de proteína (QPM) para la altillanura plana colombiana*. Ciencia y Tecnología Agropecuaria.
- Castaldi, F. (2021). Sentinel-2 and Landsat-8 Multi-Temporal Series to Estimate Topsoil Properties on Croplands. *Remote Sensing*, 13(17), 3345. <https://doi.org/10.3390/rs13173345>
- Castaldi, F., Hueni, A., Chabrillat, S., Ward, K., Buttafuoco, G., Bomans, B., Vreys, K., Brell, M., and Van Wesemael, B. (2019). Evaluating the capability of the Sentinel 2 data for soil organic carbon prediction in croplands. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 147, 267-282. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.11.026>
- Castro, D. M. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos-Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 27(104), 319-341.
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool

- for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open-Source Software*, 6(64), 3172. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., and Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991-2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- ESA. (2014). *Copernicus Open Access Hub*. Copernicus Open Access Hub. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- Gholizadeh, A., Žižala, D., Saberioon, M., and Borůvka, L. (2018). Soil organic carbon and texture retrieving and mapping using proximal, airborne and Sentinel-2 spectral imaging. *Remote Sensing of Environment*, 218, 89-103. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.015>
- Houborg, R., Fisher, J. B., and Skidmore, A. K. (2015). Advances in remote sensing of vegetation function and traits. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 43, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.06.001>
- Instituto Colombiano Agropecuario. (ICA). (1992). *Fertilización en diversos cultivos: Quinta aproximación*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/14124>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC). (2004). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras: Departamento del Meta*. (2da ed.). Imprenta Nacional de Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC). (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos* (6ta ed.). Imprenta Nacional de Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC) y CIAF. (2018). *La altillanura colombiana: Aspectos biofísicos*. Imprenta Nacional de Colombia.
- Jackson, R. D. (1983). Spectral indices in N-Space. *Remote Sensing of Environment*, 13(5), 409-421. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(83\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(83)90010-X)
- Kaur, R., and Pandey, P. (2022). A review on spectral indices for built-up area extraction using remote sensing technology. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5), 391. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09688-x>
- Klerkx, L., Jakku, E., and Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming, and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90-91, 100315. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>
- Nipper, H. : G. B. E. G. N. M. J. (Ed.). (2017). *Statistische Methoden in der Geographie*. Schweizerbart Science Publishers. <http://www.schweizerbart.de//publications/detail/isbn/9783443071547/Bahrenberg\Giese\Mevenkamp\Nipper\S>

- Pei, T., Xu, J., Liu, Y., Huang, X., Zhang, L., Dong, W., Qin, C., Song, C., Gong, J., and Zhou, C. (2021). GIScience and remote sensing in natural resource and environmental research: Status quo and future perspectives. *Geography and Sustainability*, 2(3), 207-215. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.08.004>
- Pérez, O. y Afanador, G. (2017). Comportamiento agronómico y nutricional de genotipos de *Brachiaria* SPP. Manejados con fertilización nitrogenada, solos y asociados con *Pueraria phaseoloides*, en condiciones de la altillanura colombiana. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 64(3), 52-77. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v64n3.68694>
- QGIS Development Team. (2016). *QGIS 2.18.17—Las Palmas*. (2.18.17).
- Rengel, Z. (2015). Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2), 397-409. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162015005000036>
- Sekandari, M., Masoumi, I., Beiranvand Pour, A., M Muslim, A., Rahmani, O., Hashim, M., Zoheir, B., Pradhan, B., Misra, A., and Aminpour, S. M. (2020). Application of Landsat-8, Sentinel-2, ASTER, and WorldView-3 Spectral Imagery for Exploration of Carbonate-Hosted Pb-Zn Deposits in the Central Iranian Terrane (CIT). *Remote Sensing*, 12(8), 1239. <https://doi.org/10.3390/rs12081239>
- Shahrayini, E., and Noroozi, A. A. (2022). Modeling and Mapping of Soil Salinity and Alkalinity Using Remote Sensing Data and Topographic Factors: A Case Study in Iran. *Environmental Modeling & Assessment*, 27(5), 901-913. <https://doi.org/10.1007/s10666-022-09823-8>
- Silva, F. M., Silva, S. H. G., Teixeira, A. F. D. S., Inda, A. V., Fruett, T., Weindorf, D. C., Guilherme, L. R. G., and Curi, N. (2022). Using proximal sensors to assess pedogenetic development of Inceptisols and Oxisols in Brazil. *Geoderma Regional*, 28, e00465. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00465>
- Soydan, H., Koz, A., and Düzgün, H. Ş. (2021). Secondary Iron Mineral Detection via Hyperspectral Unmixing Analysis with Sentinel-2 Imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 101, 102343. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102343>
- Van der Meer, F. D., Van der Werff, H. M. A., and Van Ruitenbeek, F. J. A. (2014). Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote Sensing of Environment*, 148, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.022>
- Vaudour, E., Gomez, C., Fouad, Y., and Lagacherie, P. (2019). Sentinel-2 image capacities to predict common topsoil properties of temperate and Mediterranean agroecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 223, 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.006>

Viscarra Rossel, R. A., Chappell, A., De Caritat, P., and McKenzie, N. J. (2011). On the soil information content of visible-near infrared reflectance spectra. *European Journal of Soil Science*, 62(3), 442-453. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01372.x>

Xue, J., and Su, B. (2017). Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1353691. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

