



# Efecto del orden de suelo en la correlación entre sus propiedades y los metales pesados en el Valle del Cauca, Colombia

## Effect of soil order on the correlation between its properties and heavy metals in the Valle del Cauca, Colombia

Gilberto Eduardo Marín-Pimentel<sup>1</sup>✉, Germán Rueda-Saa<sup>1</sup>, Juan Carlos Menjívar-Flores<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia sede Palmira.



Vol. 54 (1 y 2) de 2024 | pp: 57 - 67 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 16/03/2026 - ACEP.: 28/03/2026

### RESUMEN

La investigación fue desarrollada realizando un muestreo aleatorio simple (MAS) en suelos agrícolas de la zona plana y de piedemonte del Valle del Cauca. Evidencia el efecto que tienen los órdenes de suelo molisol, inceptisol y vertisol sobre la correlación de algunas propiedades físicas y químicas con los metales pesados (MP). El ajuste del muestreo individual de los indicadores a una forma grupal fue a través del índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett, efectuando correlación de spearman y análisis de componentes principales (APC). El vertisol fue el orden de mayor cantidad de indicadores asociados (pH, MO, CE, CICA, n, CC, PMP, Ks, Da, Cd, Cr, Ni y Co), seguido del molisol (pH, MO, CE, CICA, n, Ks, Da, Cd, Cr, Ni, Pb y Co) y al final el inceptisol (pH, MO, CE, CICA, Ks, Da, Hg, Cr, Ni y Co). El molisol relacionó fenómenos ligados a la fertilidad y el movimiento de agua en el suelo con los MP. En el inceptisol incluye situaciones relacionadas en el suelo con la fertilidad, contenido de sales, velocidad del agua y la compactación. La fertilidad, humedad, velocidad del agua y compactación estuvo enlazado al orden de suelo vertisol. Admitiendo la importancia del manejo del suelo en función de su heterogeneidad en la región. En los órdenes la concentración total de Cr, Ni y Co tiene conexión con alguna propiedad del suelo. Evidenciando que la heterogeneidad de los suelos no juega un papel importante en el control o manejo de estos elementos.

**Palabras claves:** Correlación, Metales pesados, Muestreo, Orden de suelo, Propiedades del suelo.

### ABSTRACT

The research was conducted using simple random sampling (SRS) in agricultural soils of the flat and piedmont areas of the Valle del Cauca. It demonstrates the effect of the soil orders Mollisols, Inceptisols, and Vertisols on the correlation of certain physical and chemical properties with heavy metals (HM). The Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) index and Bartlett's test of sphericity were used to adjust the individual sampling of the indicators to a grouped form, performing Spearman correlation and principal component analysis (PCA). Vertisols had the highest number of associated indicators (pH, OM, EC, CICA, n, CC, PMP, Ks, Da, Cd, Cr, Ni, and Co), followed by Mollisols (pH, OM, EC, CICA, n, Ks, Da, Cd, Cr, Ni, Pb, and Co), and finally Inceptisols (pH, OM, EC, CICA, Ks, Da, Hg, Cr, Ni, and Co). Mollisols were associated with phenomena related to soil fertility and water movement. Inceptisols included soil conditions related to fertility, salt content, water velocity, and compaction. Fertility, moisture, water velocity, and compaction were linked to the Vertisols soil order, highlighting the importance of soil management in light of its heterogeneity in the region. In each soil order, the total concentration of Cr, Ni, and Co was associated with certain soil properties. Demonstrating that soil heterogeneity does not play an important role in the control or management of these elements.

**Keywords:** Correlation, Heavy metals, Sampling, Soil order, Soil properties.

## INTRODUCCIÓN

La superficie ocupada en la agricultura es aproximadamente es una tercera parte de la superficie terrestre (Burbano, 2016). En América Latina y el Caribe se valora en aproximadamente 800 millones de hectáreas de tierra con potencial agrícola (FAO, 2016). En Colombia existen 22 millones de hectáreas con aptitud agrícola, de las cuales solamente 5 millones se utilizan para la agricultura (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2016). El Valle del Cauca, una región que ha sido tradicionalmente agrícola, reflejado en las cifras del plan frutícola del Valle del Cauca (Tafur et al., 2006), las cuales marcan que la zona cuenta con más de 2 millones de hectáreas, de las cuales el 17.5 % de la zona se asocia a labores productivas principalmente con cultivos comerciales como la caña de azúcar y los frutales. El incremento de las actividades agrícolas, el pastoreo, la silvicultura y la urbanización genera una progresiva presión sobre los suelos (Olivera & Avellaneda, 2018).

El recurso suelo es primordial para la vida en la tierra, ya que una administración diligente simboliza un elemento fundamental para la agricultura sostenible (FAO, 2015). Para gestión minuciosa del medio edáfico por actividades agrícolas será necesario considerar su variabilidad espacial en la zona de interés. La interpretación y el entendimiento espacial de la variabilidad del suelo, ayudará a optimizar la eficiencia del uso del suelo, incrementar su calidad además de favorecer la protección del ambiente ecológico (Yan et al., 2019). Para sostenibilidad de los agroecosistemas es indispensable desarrollar estrategias de uso del suelo particulares por sitio, en adaptación a la heterogeneidad de las propiedades del suelo (Bogunovic et al., 2017). Al no considerar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo a nivel regional, es decir manejarlo de forma uniforme, puede

apresurar su deterioro (Francirlei de Oliveira et al., 2019).

La heterogeneidad de los suelos en el Valle del Cauca es evidenciada en los órdenes de suelo molisol, inceptisol y vertisol. Los suelos molisoles se destacan por tener altos contenidos de materia orgánica, oscuros, ricos en bases de las estepas, generalmente con un epipedón mólico, también muchos de ellos poseen un horizonte nátrico, argílico o cálcico y algunos un horizonte álbico, duripan o petrocálcico (Buol et al., 2014). Los suelos inceptisoles son suelos evolutivamente muy jóvenes y muestran ciertas evidencias de desarrollo de sus horizontes (Ibáñez et al., 2011). Tienen un horizonte cámbico y un epipedón ótrico de regiones húmedas y subhúmedas y frías a muy cálidas (Yang et al., 2019). Los suelos vertisoles tienen una textura arcillosa con grandes y profundas grietas en algún momento del año y con aparición de micro relieve de gilgai (Gisbert et al., 2011) y con altos contenidos de arcillas expansivas (Kabata-Pendias, 2011).

A nivel regional existe un estudio semidetallado de suelos, que determinó las características de los suelos y su vocación (CVC, 2014). Más no existe un estudio que evalué la correlación espacial de la propiedades físico-químicas y los metales pesados en los suelos por orden de suelo utilizando un análisis multivariado. Existen estudios regionales que evidencian la importancia de este tipo de análisis, como el realizado por Francirlei de Oliveira et al. (2019), cuyo propósito fue definir zonas homogéneas de manejo, a través de estadística multivariada, además de evaluar el resultado de manejo uniforme sobre las propiedades físicas y químicas de la zona de estudio, validando el supuesto que un tipo de manejo indiferenciado acelera el potencial erosivo y el deterioro del suelo. Algo semejante ocurre cuando se involucra geoestadística, es así como Salgado et al. (2019), encontraron

propiedades del suelo con alta, mediana y baja dependencia espacial, reconocimiento de zonas parciales de diferente variabilidad y como estas varían con la distancia, para realizar recomendaciones de manejo. Montanari et al. (2008), evaluaron en un suelo de Brasil, la variabilidad de las propiedades físicas en sistema de manejo siembra directa, encontrando la mutabilidad en función de un coeficiente estadístico y otro geoestadístico. La presente investigación representa un avance en la gestión de los suelos de la región y para ello se plantea el objetivo de evaluar el efecto del orden de suelo en la correlación propiedades físicas y químicas de los suelos y metales pesados y/o metaloides, que sirva de línea base para otros estudios y soporte para el manejo del suelo en función de su clasificación taxonómica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio corresponde a la zona plana y de piedemonte del Valle del Cauca, que presenta un comportamiento climático característico de las zonas tropicales del mundo. En la cual se muestrearon 489 correspondientes a lugares que desarrollan actividades agrícolas. A través de un muestreo aleatorio simple (MAS) (Corral & Franco Corral, 2015), con 271 sitios que corresponde al orden de suelo Molisol, 128 a orden Vertisol y los restantes a orden Inceptisol (Marín-Pimentel et al., 2023).

Las propiedades físicas y químicas con su respectiva abreviatura y unidad analizadas fueron Arcilla (%), Arena (%), Limo (%), Densidad Aparente (Da) ( $\text{g.cm}^{-3}$ ), Conductividad Hidráulica Saturada (Ks) ( $\text{cm.h}^{-1}$ ), Porosidad ( $\eta$ ) (%), Retención hidráulica a 1 bar (CC) (% p.v<sup>-1</sup>), Retención Hidráulica a 15 bares (PMP) (% p.v<sup>-1</sup>), Lámina de agua aprovechable (mm) (LAA), pH (Adimensional), Materia Orgánica (MO) (%), Capacidad de Intercambio Catiónico (CICA)

(Cmol (+)  $\text{Kg}^{-1}$ ), Conductividad Eléctrica (CE) ( $\text{dS.m}^{-1}$ ). Cuantificadas en laboratorios especializados (Marín-Pimentel et al., 2023). Las concentraciones totales de los metales pesados (MP): Mercurio (Hg), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Plomo (Pb) y Cobalto (Co) y el metaloide Arsénico (As) dadas en  $\text{mg. kg}^{-1}$ . Encontrándose variación por orden de suelo (Rueda-Saa et al., 2025).

Los valores medios por propiedad del suelo fueron determinados para el muestreo completo (489) (Marín-Pimentel et al., 2023). El ajuste del muestreo individual de los indicadores a una forma grupal fue a través del índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), el cual calcula el ajuste de la muestra a través de valores que deben fluctuar entre 0.50 y 1.00 y para lo cual es apropiado aplicar el análisis factorial, y la prueba de esfericidad de Bartlett permite probar la hipótesis nula que muestra que las variables no están correlacionadas en una población, por consiguiente si su valor es menor a 0.05 se rechaza dicha hipótesis y se continua con el respectivo análisis (Montoya, 2007). La correlación entre los indicadores cuyos datos que no siguen una distribución normal fue a través coeficiente de correlación de "Spearman" (Martínez Ortega et al., 2009). El análisis de componentes principales (ACP) fue realizado para aquellas variables que tienen correlación. Fueron utilizados los programas estadísticos SAS University Studio (Cody, 2015) y RStudio versión 4.1.3 (Venables & Smith, 2022).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Orden de suelo Molisol

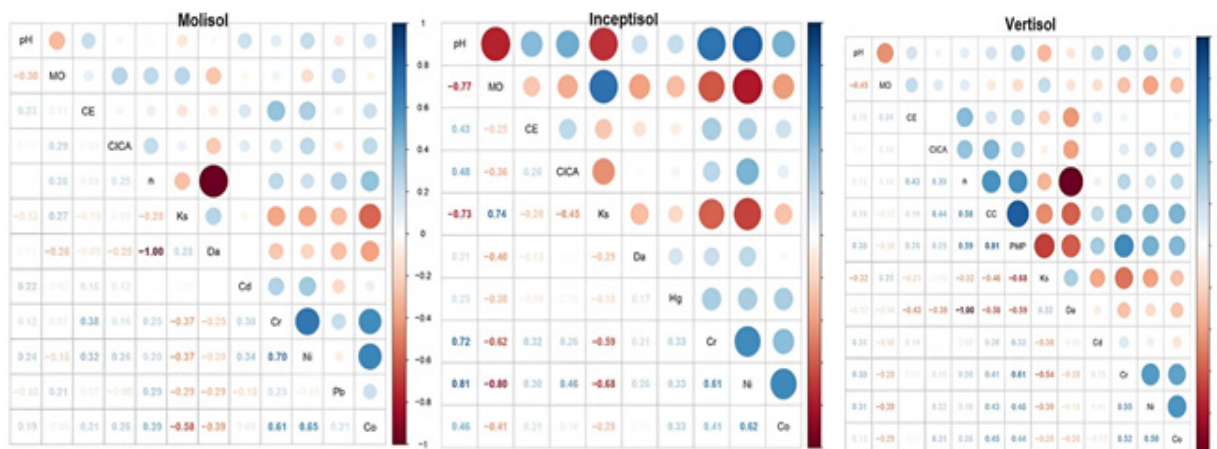
El análisis de las relaciones entre las propiedades físicoquímicas en el orden de suelo molisol ( $n=271$ ), el índice Kaiser-Meyer-Olkin y la prueba de esfericidad de Bartlett (Garmendia, 2010), evidencian que los indicadores físicos, químicos y metales pesados y/o metaloides tuvieron correlación (Tabla 1).

**Tabla 1.** Índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett las propiedades del suelo y los metales pesados en los órdenes de suelo molisol, inceptisol y vertisol.

Molisol													
Indicador	pH	MO	CE	CICA	$\eta$	Ks	Da	Cd	Cr	Ni	Pb	Co	
Índice Kaiser-Meyer-Olkin	0.61	0.68	0.67	0.69	0.58	0.76	0.58	0.64	0.70	0.71	0.56	0.76	
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi cuadrado								11271				
	Grados de libertad								11				
	Nivel de significancia								p –value < 2.2 x 10 <sup>-16</sup>				
Inceptisol													
Indicador	pH	MO	CE	CICA	Ks	Da	Hg	Cr	Ni	Co			
Índice Kaiser-Meyer-Olkin	0.83	0.81	0.60	0.77	0.81	0.65	0.81	0.87	0.80	0.83			
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi cuadrado						3932.9						
	Grados de libertad						9						
	Nivel de significancia						p –value < 2.2 x 10 <sup>-16</sup>						
Vertisol													
Indicador	pH	MO	CE	CICA	n	CC	PMP	Ks	Da	Cd	Cr	Ni	Co
Índice Kaiser-Meyer-Olkin	0.68	0.80	0.71	0.70	0.68	0.72	0.71	0.83	0.68	0.68	0.77	0.81	0.74
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi cuadrado							5332					
	Grados de libertad							12					
	Nivel de significancia							p –value < 2.2 x 10 <sup>-16</sup>					

El análisis multivariado el coeficiente de correlación de Spearman para las variables correlacionadas resalta en el orden de suelo molisol que la n y la Da presentaron

una relación entre fuerte y perfecta, entre moderada y fuerte el Cr y Ni, al igual que entre el Pb y Ni y el Cr y Co, de la misma forma que la Ks y el Co (Martínez et al., 2009) (Figura 1).



**Figura 1.** Correlación de Spearman las propiedades del suelo y los metales pesados los órdenes de suelo molisol, inceptisol y vertisol.

El análisis de componentes principales (APC) entre las propiedades fisicoquímicas del suelo en el orden molisol y las concentraciones totales de MP expuso que los cuatro primeros componentes presentaron un valor propio mayor que 1 y explican el 64.62% de varianza total (Tabla 2). En ese sentido, el primer componente explica el 26.50% de la varianza total y las variables de mayor contribución fueron de forma positiva la porosidad, el Cr, el Ni y el Co, mientras que de forma negativa la densidad aparente. El Cr es elemento que se hereda de la roca madre y un contenido total mayor al 80.00% en suelos se encuentra en forma residual inmóvil y los contenidos más altos son originarios de sedimentos arcillosos, rocas máficas y también en suelos formados a partir de serpentinas sus contenidos son altos ( $>100000 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) (Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007). Normalmente las mayores concentraciones de Cr se localizan en suelos arcillosos pesados (Cambisoles) y en ocasiones en suelos orgánicos (Histosoles) (Kabata-Pendias, 2011).

El Ni está localizado en las rocas ígneas y está involucrado en las etapas geoquímicas de los ciclos mineralógicos, entonces está presente en rocas sedimentarias, metamórficas, suelos y sedimentos (Alloway, 2012). Para ilustrar la relación entre las fracciones del suelo y los MP, Alamgir (2016) refiere que para la movilidad de estos elementos en el suelo son importantes la textura y los tipos de minerales, específicamente la fracción arcillosa que engloba minerales arcillosos y tiene una robusta capacidad de enlazar metales debido a su gran capacidad de sorción, alta capacidad específica, CIC, estabilidad química y mecánica, asimismo como estructura en capas. En el caso del segundo componente la mayor contribución a la varianza fue de forma negativa de la materia orgánica. La MO en el medio edáfico incrementa o reduce la biodisponibilidad de MP por procesos de movilización e

inmovilización cuando se forman ciertos complejos orgánicos de MP, además, tiene un papel de depósito adsorbente reactivo con esos elementos gracias a alta área superficial y gran reactividad en función a sus grupos funcionales de S, O y N (Alamgir, 2016).

En el tercer componente las variables de mayor contribución fueron la capacidad de intercambio catiónico, la conductividad hidráulica saturada y el Cd de forma positiva, mientras el Pb contribuye de forma negativa. La textura juega un papel importante sobre el control de la concentración de Cd en los suelos (Kabata-Pendias, 2011). La movilidad de Cd en los suelos está ligada a la formación de complejos y las reacciones de óxido-reducción, además la sorción por parte del material húmico es consecuente con un incremento del pH (Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007). Con el Pb Alloway (2012) expone que en suelos con labores agrícolas las propiedades pH, CIC, MO, porcentaje de arcilla y los  $\text{CaCO}_3$  fueron correlacionados con la absorción de este elemento.

En el cuarto componente la mayor contribución positiva fue de la conductividad eléctrica y negativa del pH. Normalmente un incremento del pH aumenta la sorción de metales y cuando disminuye por debajo de 5.00 el aumento de la concentración de protones beneficia la movilidad. En este sentido, es posible hallar más metales en la solución del suelo cuando menor es el valor del pH y a su vez se movilizan más los MP (Alamgir, 2016). Un incremento de la salinidad en el suelo, es decir un aumento de la conductividad eléctrica, incrementa la movilidad o retención de metales, cuando los cationes K y Na en los sitios de cambio reemplazan a los metales, seguido de la formación de compuestos estables entre los aniones de sulfato y cloruro y los metales como el Pb, Zn, Cu, Cd o Hg (Galán Huertos & Romero Baena, 2008).

**Tabla 2.** Componentes principales para las propiedades del suelo y los MP correlacionados en los ordenes de suelo molisol, inceptisol y vertisol.

<b>Molisol</b>				
<b>Indicador</b>	<b>Componentes principales</b>			
	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
pH	0.0405911	0.29362196	0.19113988	<b>-0.51892332</b>
MO	0.1434991	<b>-0.50085470</b>	0.11322784	0.20649853
CE	0.1139654	-0.21013007	0.15265623	<b>0.54916467</b>
CICA	0.1682578	-0.18168110	<b>0.41185903</b>	-0.24604054
$\eta$	<b>0.4169096</b>	-0.35761587	-0.08815125	-0.25687551
Ks	-0.2464381	-0.26338064	<b>0.32597921</b>	0.03649964
Da	<b>-0.4169096</b>	0.35761586	0.08815113	0.25687535
Cd	0.1580782	0.13031142	<b>0.57867032</b>	-0.13313668
Cr	<b>0.4054849</b>	0.24638586	0.09045187	0.34462204
Ni	<b>0.3667351</b>	0.34724210	0.16033583	0.20363680
Pb	0.1701114	-0.02435422	<b>-0.49711993</b>	-0.11227808
Co	<b>0.4186447</b>	0.24852206	-0.14153736	0.04574844
Valor propio	3.179762	2.127693	1.289628	1.157330
Proporción de la varianza	26.50%	17.30%	10.75%	9.64%
Varianza acumulada	26.50%	44.23%	54.98%	64.62%

<b>Inceptisol</b>			
<b>Indicador</b>	<b>Componentes principales</b>		
	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
pH	<b>-0.4213491</b>	0.1608494	-0.0002260
MO	<b>0.4126560</b>	-0.1487840	-0.2474486
CE	-0.1007413	<b>0.5237177</b>	-0.3742850
CICA	-0.2284232	<b>0.4413334</b>	0.0655960
Ks	<b>0.3543654</b>	-0.2283986	-0.2806217
Da	-0.1426318	-0.3435636	<b>0.6305472</b>
Hg	-0.1744314	-0.3762165	<b>-0.3786102</b>
Cr	<b>-0.3885553</b>	-0.1335574	-0.2006156
Ni	<b>-0.4121102</b>	-0.2662333	-0.0327295
Co	-0.3044651	-0.2871878	<b>-0.3652057</b>
Valor propio	4.2296665	1.5299674	1.1958885
Proporción de la varianza	42.30%	15.30%	11.96%
Varianza acumulada	42.30%	57.60%	69.56%

<b>Vertisol</b>				
<b>Indicador</b>	<b>Componentes principales</b>			
	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
pH	0.19378119	-0.24851654	<b>-0.402033256</b>	0.02539183
MO	-0.11356970	<b>0.49701389</b>	0.093964876	0.07272599
CE	0.04396863	0.29924662	-0.307667128	<b>-0.53521809</b>
CICA	0.17397566	0.23678756	0.200562583	<b>0.64561346</b>
$\eta$	0.34876932	<b>0.39138377</b>	0.009110681	-0.04215321
CC	<b>0.40272272</b>	0.06235565	0.035008493	0.06046151
PMP	<b>0.42937047</b>	-0.01816291	-0.120426544	-0.08871572
Ks	-0.33275041	0.08609062	0.198367630	0.09412851
Da	-0.34876917	<b>-0.39138384</b>	-0.009110258	0.04215308
Cd	0.06687914	-0.11209782	<b>-0.599715424</b>	0.49728911
Cr	<b>0.30822247</b>	-0.23478429	0.120939363	-0.07341079
Ni	0.22364721	<b>-0.33512852</b>	0.195482827	-0.11763446
Co	0.25944291	-0.21818992	<b>0.476353998</b>	0.01809810
Valor propio	4.484900	2.234963	1.138018	0.9939560
Proporción de la varianza	34.50%	17.19%	8.75%	7.64%
Varianza acumulada	34.50%	51.69%	60.44%	68.09%

### Orden de suelo inceptisol

En orden de suelo inceptisol fue realizado un procedimiento diferente para analizar las correlaciones entre las propiedades físicas y químicas del suelo utilizando Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett (Marín-Pimentel et al., 2023; Montoya Suárez, 2007). Esto debido a que al calcular los índices de correlación utilizando las 13 variables existió el error que la matriz no es invertible y la imagen no se encuentra (Cody, 2015). Posiblemente se deba a que existan columnas dependientes linealmente, es decir, hay variables fuertemente correlacionadas y la forma de solucionar es eliminar esas variables (Stack Exchange, 2013). Los resultados finales de correlación se presentan en la tabla 1.

El coeficiente de correlación de Spearman para las propiedades fisicoquímicas y los metales pesados correlacionados en el orden de suelo inceptisol y en función de la clasificación enunciada por Martínez et al. (2009) los indicadores que tuvieron entre fuerte y perfecta correlación son el pH con la MO, la MO y el Ni y finalmente el pH y el Ni (Figura 1). Entre tanto la correlación fue moderada y fuerte para (pH y Ks), (MO y Ks), (pH y Cr), (MO y Cr), (Ks y Cr), (Ks y Ni) y finalmente (Ni y Co). Las restantes correlaciones fueron débiles para el rango entre 0.26-0.50 y escasa o nula (0.00 – 0.25) (Figura 1). En el primer componente los indicadores que mayor contribución de forma positiva fueron la materia orgánica y conductividad hidráulica saturada, entre tanto el aporte de forma negativo fue del indicador químico pH y los MP Cr y Ni.

(Hooda, 2010) indica que tanto para el Ni, Co y otros oligoelementos la solubilidad decrece al aumentar el pH, mencionando también que en alto porcentaje el Cr (III) se encuentra en el suelo en forma inmóvil sin posibilidad de ingresar a la cadena alimentaria a diferencia del Cr (IV) que en un pH alcalino es altamente móvil, siendo de gran preocupación esta última situación porque normalmente en la agricultura se utiliza el encalado para elevar el pH del suelo y disminuir la absorción excesiva de oligoelementos.

Una disminución en la movilidad de los metales se da normalmente en condiciones reductoras, en específico la partición de metales traza activos como el Cr y molibdeno es afectada por las reacciones de oxidación reducción al igual que los elementos Zn, Cu y Ni considerados como elementos redox estables (Alamgir, 2016). La reducción de  $Cr^{+6}$  a  $Cr^{+3}$  está sometida por la materia orgánica que a su vez controla la fitodisponibilidad o comportamiento del Ni junto a otras propiedades del suelo (Kabata-Pendias, 2011). En el segundo componente principal la mayor contribución por parte de la conductividad eléctrica y la capacidad de intercambio catiónico. Corte-D et al. (2013) encontraron una relación espacial directa entre la conductividad eléctrica y los cationes calcio, sodio y magnesio en suelo de orden Andisol. El tercer componente agrupo a la variable densidad aparente y el elemento mercurio. El Hg en suelos presenta gran afinidad por aquellos ricos en materia orgánica o turba, así también como en bosques y suelos cultivados con arroz (Hooda, 2010).

### Orden de suelo vertisol

En el orden vertisol el índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett reveló correlación entre las propiedades fisicoquímicas presentada (Tabla 1). El coeficiente de correlación de Spearman muestra que las parejas de indicadores

entregan una correlación entre fuerte y perfecta fueron la  $\eta$  y Da, la CC y el PMP, mientras tanto, entre moderada y fuerte los duetos de variables fueron  $\eta$  y CC,  $\eta$  y PMP, Ks y PMP, CC y Da, PMP y Da, PMP y Cr, Ks y Cr, Ni y Cr, Co y Cr y Ni y Co, las restantes relaciones estuvieron entre débil y escasa o nula (Martínez et al., 2009) (Figura 1).

En el primer componente principal las propiedades físicas CC y PMP, junto con el metal pesado Cr fueron las variables de mayor contribución al componente en forma positiva. Normalmente en condiciones aeróbicas, pH alto, MO baja aparece el Cr (VI) en los suelos y como producto de la oxidación del Cr (III) bajo contenidos de óxidos de Mn y Fe, mientras que en suelos ácidos y anóxicos con gran contenido orgánico se da la transformación del Cr (VI) a Cr (III) (Hooda, 2010). En el segundo componente las variables de mayor aporte la varianza total, de forma positiva, fueron la MO y la  $\eta$ , mientras que de forma negativa correspondió a la Da y al metal pesado Ni. En los perfiles del suelo y de acuerdo a los tipos de suelo, la materia orgánica, las fracciones de arcilla y los óxidos amorfos están relacionados con la distribución del Ni, a su vez de forma muy general hay una fina relación entre la CIC y el %arcilla con el metal pesado Ni (Kabata-Pendias, 2011). Comparando los suelos arcillosos con los arenosos, estos últimos tienen una capacidad de sorción de metales pesados menor que los primeros, al poseer tamaños de poros más grandes que implica el movimiento de estos elementos hacia aguas subterráneas o superficiales y a su vez las cantidades de elementos traza como constituyentes de los minerales arcillosos es insignificante, su importancia estriba en su capacidad de sorción (Alamgir, 2016).

En el tercer componente las variables de mayor contribución fueron el pH y Cd de forma negativa, el Co de forma positiva. En efecto Kabata-Pendias y Murkherjee (2007) aluden

la estrecha relación entre la MO y la adsorción de Cd y Pb, no obstante, no se puede separar del pH porque es una variable que condiciona la constitución de complejos de materia orgánica. Por lo que se refiere al cobalto, el pH en el suelo conduce a sorción y oxidación de la forma química  $\text{Co}^{+2}$  y a la reducción del  $\text{Co}^{+3}$  (Alloway, 2012). En el cuarto componente los indicadores de mayor contribución fue la CE (forma negativa) y la CICA (forma positiva). La capacidad de intercambio catiónico tiene un poder dominante sobre la retención de MP, siendo mayor en suelos arcillosos que en arenosos, más alta en arcillas 2:1 que entre arcillas 1:1 y a su vez en orden decreciente de CIC se manifiestan montmorillonita, imogolita > vermiculita > illita, clorita > haloisita > caolinita (Alamgir, 2016). La presencia de  $\text{CaCO}_3$  disminuye la solubilidad de los oligoelementos al aumentar el pH así también la formación de carbonatos metálicos por comparecencia de contenidos de carbonato o bicarbonatos en el suelo precipita estos elementos o los hace poco solubles (Hooda, 2010).

## CONCLUSIONES

La correlación entre propiedades físicas y químicas del suelo con los metales pesados estuvo diferenciada por orden de suelo. El orden de suelo vertisol fue el de mayor cantidad de indicadores asociados, seguido del molisol y por último del vertisol. El orden molisol relacionó variables ligadas a la fertilidad del suelo el movimiento de agua con los metales pesados. En orden inceptisol la correlación los metales pesados incluye fenómenos en el suelo de fertilidad, contenido de sales, velocidad del agua y posiblemente ligado a la compactación. La fertilidad, contenido de humedad, velocidad del agua y compactación del suelo estuvo enlazado al orden vertisol. Validando la importancia del manejo del suelo en la zona plana y de piedemonte del Valle del Cauca en función de su heterogeneidad. La correlación de los metales pesados Cr, Ni

y Co con las propiedades del suelo no son afectadas por la clasificación taxonómica del suelo. Es decir, en los diferentes ordenes analizados la concentración total de estos elementos tiene conexión con alguna propiedad del suelo. A su vez estos elementos tuvieron una contribución apreciable a la varianza del muestreo por orden, siendo el más destacable el Cr en conjunto evidenciando que la heterogeneidad de los suelos no juega un papel importante en el control o manejo de estos elementos. Mas bien pueden estar asociados al manejo de entrada al suelo por distintas vías, especialmente la relacionada con actividades agrícolas.

## AGRADECIMIENTOS

La financiación de la investigación fue con el apoyo de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira a través del convenio interadministrativo número 150 de 2017.

## REFERENCIAS

- Alamgir, M. (2016). Effects of Soil Properties to the Extent of Soil Contamination with Metals. In *Environmental Remediation Technologies for Metal-Contaminated Soils* (pp. 1–19).
- Alloway, B. (2012). Heavy Metals in Soil. In *Handbook on the Toxicology of Metals: Fifth Edition*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822946-0.00032-5>
- Bogunovic, I., Trevisani, S., Seput, M., Juzbasic, D., & Durdevic, B. (2017). Short-range and regional spatial variability of soil chemical properties in an agro-ecosystem in eastern Croatia. *Catena*, 154, 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.02.018>

- Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C., & McDaniel, P. A. (2014). U.S. Soil Taxonomy. In *Soil Genesis and Classification* (pp. 207–232). <https://doi.org/10.1002/9780470960622.ch7>
- Burbano Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117–124. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Cody, R. (2015). An Introduction to SAS University Edition. *Zoological Research*, 9(2), 192. <http://www.zoores.ac.cn/EN/abstract/abstract1192.shtml%5Cnhttp://www.zoores.ac.cn/CN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=1192>
- Corral, Y., & Franco Corral, A. (2015). Procedimientos de muestreo. *Revista Ciencias de La Educación*, 26(46), 151–167. <http://servicio.bc.uc.edu.ve/educacion/revista/46/art13.pdf>
- Cortés-D, D., Pérez-B, J., & Camacho-Tamayo, J. (2013). Relación espacial entre la conductividad eléctrica y algunas propiedades químicas del suelo. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(2), 401–408. <https://doi.org/10.31910/rudca.v16.n2.2013.912>
- CVC. (2014). *Levantamiento semidetallado de suelos*. <https://ecopedia.cvc.gov.co/suelo/caracteristicas-del-suelo/levantamiento-semidetallado-de-suelos-escala-125000-de-las-cuencas>
- FAO. (2015). Estado mundial del recurso del suelo (EMRS) - Resumen Técnico. In *Fao*. [www.fao.org/publications](http://www.fao.org/publications)
- FAO. (2016). *Estado mundial del recurso suelo*. <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- Francirlei de Oliveira, J., Mayi, S., Marchão, R. L., Corazza, E. J., Hurtado, S. C., Malaquias, J. V., Tavares Filho, J., Brossard, M., & Guimarães, M. de F. (2019). Spatial variability of the physical quality of soil from management zones. *Precision Agriculture*, 20(6), 1251–1273. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09639-9>
- Galán Huertos, E., & Romero Baena, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla: Revista de La Sociedad Española de Mineralogía*, 10, 48–60. [http://www.ehu.eus/sem/macla\\_pdf/macla10/Macla10\\_48.pdf](http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf)
- Garmendia, M. L. (2010). Análisis factorial: una aplicación en el cuestionario de salud general de Goldberg, versión de 12 preguntas. *Revista Chilena de Salud Pública*, 11(2), 57–65. <https://doi.org/10.5354/0717-3652.2007.3095>
- Gisbert Blanquer, J. M., Ibáñez Asensio, S., & Moreno Ramón, H. (2011). Vertisoles. *Universidad Politecnica de Valencia*, 6. <https://riunet.upv.es/500>
- Hooda, P. S. 2010. Trace Elements in soil. <https://www.researchgate.net/file.312659449188353@1451555230198>
- Ibáñez, S., Gisbert, J. M., & Moreno, H. (2011). Inceptisoles. *Editorial Universidad Politecnica de Valencia*, 8. <https://riunet.upv.es/500>
- Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soils and plants: Fourth edition. In *Trace Elements in Soils and Plants, Fourth Edition*. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A. (2007). Trace elements from soil to human. In *The Behavior of Chemical Elements in Stars*. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511661488.022>

- Marín-Pimentel, G.-E., Rueda-Saa, G., & Menjivar-Flores, J. C. (2023). Evaluation of physicochemical properties in agricultural soils on the flat and piedmont areas of Valle del Cauca, Colombia with emphasis on degradation. *Environmental Earth Sciences*, 82(157), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10813-6>
- Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L. C., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A., & Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2), 19. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1729-519X2009000200017](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2009000200017)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2016). Gestión Sostenible del Suelo. In *Política para la Gestión Sostenible del Suelo*. [http://www.andi.com.co/Uploads/Política\\_para\\_la\\_gestión\\_sostenible\\_del\\_suelo\\_FINAL.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/Política_para_la_gestión_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf)
- Montanari, R., Passos e carvalho, M., Alves, M. C., Dafonte Dafonte, J., Paz González, A., & Machado SIQUEIRA, G. (2008). Variabilidad Espacial De Propiedades Físicas De Un Ferralsol En Selvíria ( Ms , Brasil ). *Revista Científica Agropecuaria*, 12 (March 2008), 15–23.
- Montoya Suárez, O. (2007). Aplicación del análisis factorial a la investigación de mercados. Caso de estudio. *Scientia et Technica*, 3(35), 281–286. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/>
- Olivera Sánchez, C., & Avellaneda Torres, L. M. (2018). *Guía de buenas prácticas para la Gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales* (p. 144). <http://www.fao.org/3/i8864es/i8864ES.pdf>
- Rueda-Saa, G., Marín-Pimentel, G. E., & Menjivar-Flores, J. C. (2025). Baseline concentration of heavy metals in agricultural soils.pdf. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 42(2), 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.22267/rcia.20254202.259>
- Salgado Velásquez, S., Salgado García, S., Rodrigues, F. A., Palma López, D., Córdova Sánchez, S., Rincon Ramírez, J., & López Castañeda, A. (2019). VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE UN SUELO ACRISOL CULTIVADO CON CAÑA DE AZÚCAR. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Stack Exchange. (2013). Error “system is computationally singular” when running a glm. Cross Validated.
- Tafur Reyes, C., Toro Mesa, J. C., Reyes, C. E., García Negrette, R., & Muñoz, C. A. (2006). *Plan Frutícola Nacional: Valle del Cauca, tierra de frutas*. Talleres gráficos de Impresora Feriva S.A. [http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca\\_117\\_PFNValledelCauca.pdf](http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca_117_PFNValledelCauca.pdf)
- Venables, W. ., & Smith, D. . (2022). An Introduction to R. *Practical Graph Mining with R*, 3, 27–52. <https://doi.org/10.1201/b15352-7>
- Yan, P., Peng, H., Yan, L., & Lin, K. (2019). Spatial variability of soil physical properties based on GIS and geo-statistical methods in the red beds of the Nanxiong Basin, China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(4), 2961–2972. <https://doi.org/10.15244/pjoes/92245>
- Yang, C., Liu, N., & Zhang, Y. (2019). Soil aggregates regulate the impact of soil bacterial and fungal communities on soil respiration. *Geoderma*, 337(October 2018), 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.002>