

DIAGNÓSTICO DE LA ACIDEZ DEL SUELO EN LA ZONA CAFETERA DE COLOMBIA

Siavosh Sadeghian Khalajabadi *, Luz Adriana Lince Salazar *

Sadeghian, S., & Lince-Salazar, L.A. (2024). Diagnóstico de la acidez del suelo en la zona cafetera de Colombia. *Revista Cenicafé*, 75(2), e75204. <https://doi.org/10.38141/10778/75204>



Check for updates

La acidez del suelo afecta el crecimiento del café, *Coffea arabica* L., en todas las etapas del cultivo. La información regional de la acidez del suelo puede ayudar a identificar áreas con limitaciones para el crecimiento de las plantas y planear acciones correctivas. Este estudio tuvo como objetivo caracterizar y mapear la acidez del suelo en la zona cafetera de Colombia. Se consolidó una base de datos con resultados de 344.652 análisis de suelos, correspondientes a 460 municipios de 22 departamentos de Colombia. Se realizó estadística descriptiva de pH a nivel de departamento y se calculó la frecuencia porcentual de muestras en cinco rangos: $\text{pH} \leq 4,5$; $4,5 < \text{pH} \leq 5,0$; $5,0 < \text{pH} \leq 5,5$; $5,5 < \text{pH} \leq 6,0$ y $\text{pH} > 6,0$. Para cada municipio se calcularon las frecuencias de registros en los rangos críticos de acidez ($\text{pH} \leq 5,0$, $\text{Al}^{3+} > 1,0 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1}$ y saturación de $\text{Al}^{3+}\text{-SAI}^{3+} > 40\%$), valores que se clasificaron en cinco categorías: muy baja ($< 20\%$), baja ($20\% - 40\%$), media ($40\% - 60\%$), alta ($60\% - 80\%$) y muy alta ($> 80\%$). Para todos los departamentos, la distribución del pH fue simétrica, pero no cuando se analizaron todos los datos en su conjunto. De los 460 municipios, 58 presentaron promedios de $\text{pH} \leq 4,5$; 217 de $4,5 \leq \text{pH} < 5,0$; 169 de $5,0 \leq \text{pH} < 5,5$ y 16 de $5,5 \leq \text{pH} < 6,1$. Los departamentos con mayor frecuencia de acidez fueron Bolívar, Meta, Caquetá, Casanare y Putumayo, mientras que en el Valle del Cauca, La Guajira, Risaralda, Nariño y Caldas se detectaron las frecuencias más bajas. Se halló una relación negativa de pH con Al^{3+} y SAI^{3+} , y una relación positiva de pH con $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$. Se elaboraron mapas de pH, Al^{3+} y SAI^{3+} a escala municipal.

Palabras clave: Aluminio intercambiable, calcio, magnesio, mapeo digital del suelo, pH, predicción espacial, saturación de aluminio.

SOIL ACIDITY DIAGNOSIS IN THE COFFEE-GROWING REGION OF COLOMBIA

Soil acidity affects the growth of coffee (*Coffea arabica* L.) at all stages of cultivation. Regional information on soil acidity can help identify areas with limitations for plant growth and plan corrective actions. This study aimed to characterize and map soil acidity in the coffee-growing region of Colombia. A database was consolidated with results from 344,652 soil analyses, corresponding to 460 municipalities in 22 departments of Colombia. Descriptive statistics of pH were conducted at the departmental level, and the percentage frequency of samples was calculated within five ranges: $\text{pH} \leq 4,5$; $4,5 < \text{pH} \leq 5,0$; $5,0 < \text{pH} \leq 5,5$; $5,5 < \text{pH} \leq 6,0$; and $\text{pH} > 6,0$. For each municipality, frequencies of records in critical acidity ranges ($\text{pH} \leq 5,0$, $\text{Al}^{3+} > 1,0 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1}$, and Al^{3+} saturation $> 40\%$) were calculated and classified into five categories: very low ($< 20\%$), low ($20\% - 40\%$), medium ($40\% - 60\%$), high ($60\% - 80\%$), and very high ($> 80\%$). For all departments, the pH distribution was symmetrical, unlike when all the data was analyzed together. Out of the 460 municipalities, 58 reported average pH values below 4.5; 217 fell between 4.5 and 5.0; 169 ranged from 5.0 to 5.5; and 16 were between 5.5 and 6.1. The departments with the highest frequency of acidity were Bolívar, Meta, Caquetá, Casanare, and Putumayo, while the lowest frequencies were detected in Valle del Cauca, La Guajira, Risaralda, Nariño, and Caldas. A negative relationship was found between pH and Al^{3+} and Al^{3+} saturation, and a positive relationship between pH and $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$. Finally, maps of pH, Al^{3+} , and Al^{3+} saturation were created at the municipal level.

Keywords: Exchangeable aluminum, calcium and magnesium, digital soil mapping, pH, spatial prediction, aluminum saturation.

* Investigador Científico III e Investigador Científico I. Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-1266-0885> y <https://orcid.org/0000-0003-4263-5357>, respectivamente.



Las propiedades del suelo determinan el crecimiento de las raíces y la absorción del agua y los nutrientes, condicionando así la producción de los cultivos. Entre estas propiedades están las que se relacionan con la acidez (Havlin et al., 2014; Sparks, 2003). El proceso de la acidificación del suelo ocurre de manera espontánea durante la pedogénesis y se intensifica por la actividad antropogénica. Entre las principales causas están: la lixiviación de las bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} y Na^{+}) por la lluvia e incremento concomitante de cationes metálicos (Al^{3+} , Fe^{3+} y Mn^{4+}) que pueden sufrir hidrólisis ácida; además de la erosión, la meteorización de los minerales primarios, la descomposición de la materia orgánica (MO), la oxidación del azufre, la nitrificación de NH_4^{+} y la liberación de H^{+} por las raíces cuando absorben Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} . Adicionalmente, los aniones NO_3^{-} , SO_4^{-2} y Cl^{-} que proceden de los fertilizantes se unen a las bases intercambiables de la solución del suelo y los arrastran, utilizando como vehículo el agua (Foth & Ellis, 1997; Weil & Brady, 2017; Zapata, 2022).

La acidez del suelo afecta el crecimiento del café en todas las etapas del cultivo; condición que generalmente se remedia mediante el uso de enmiendas calcáreas (Barbosa et al., 2020; Corrêa et al., 2007; Chaves et al., 1984; Parecido et al., 2021; Parecido et al., 2021; Pavan et al., 1982; Rodrigues et al., 2001; Rodrigues et al., 2006; Sadeghian & Díaz, 2020a), sin descartar otras soluciones como el establecimiento de genotipos resistentes (Acuña & Sadeghian 2020; Braccini et al., 1998).

La propiedad por excelencia para medir la acidez del suelo es el pH. Este ejerce una influencia enorme en los procesos biogeoquímicos del suelo y, en razón de

ello, se considera la “variable maestra” que influye en innumerables propiedades y procesos biológicos, químicos y físicos del suelo que afectan el crecimiento de las plantas y el rendimiento de los cultivos (Neina, 2019). En general, se considera que un suelo es ácido cuando presenta un valor de pH menor que 5,5 durante la mayor parte del año (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2024).

La principal limitante para el crecimiento de las plantas en los suelos ácidos tiene que ver con la alta presencia de Al^{3+} soluble, elemento que resulta tóxico cuando es absorbido por las raíces (Havlin et al., 2014). En café, se han corroborado sus efectos en el retraso del crecimiento radicular y las malformaciones de raíces y hojas (Pavan & Bingham, 1982).

Existe una relación estrecha entre Al^{3+} y pH; al respecto, puede decirse que la solubilidad y las formas químicas del Al en agua están determinadas por una secuencia de etapas de hidrólisis que finalizan en la precipitación del $\text{Al}(\text{OH})_3$, hecho que sucede a pH 5,5 (Sparks, 2003; Zapata, 2022). Esto ha sido corroborado tanto para suelos de la zona cafetera de Colombia (Sadeghian, 2003; Sadeghian, 2022; Sadeghian & Díaz, 2020b; Sadeghian & Zapata, 2014), como para otros países productores del grano, especialmente Brasil (Pavan & Bingham, 1982).

Los resultados de investigaciones desarrolladas en Colombia indican que los rendimientos de café se reducen cuando el pH es menor que 5,0; situación en la que el contenido de Al^{3+} es generalmente mayor que $1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ o, en su defecto, el porcentaje de saturación de Al^{3+} (SAI^{3+}) está por encima del 30% (Sadeghian, 2022). Cabe aclarar que, en los suelos derivados de cenizas volcánicas

de Colombia, caracterizados por ser ricos en materia orgánica, los altos contenidos de Al^{3+} en la fase intercambiable no se ven reflejados en la solución del suelo (Ortiz et al., 2004), fenómeno que explica la poca probabilidad de encontrar patologías de su toxicidad. Pese a ello, el crecimiento y desarrollo de las plantas de café pueden verse más afectados por otras variables relacionadas con la acidez.

Dada la importancia que tiene la acidez del suelo en la productividad de los cultivos, sumado al creciente aumento de las áreas afectadas, se han realizado estudios para diagnosticar su situación en diferentes regiones y países, generando mapas para identificar áreas con limitaciones por acidez. Son ejemplos de lo anterior, los trabajos dirigidos por Reuter et al. (2008), Geng et al. (2024) y Yüzügüllü et al. (2024) para Europa, la investigación conducida por Behera & Shukla (2015) en cuatro series de suelos de la India, las investigaciones desarrolladas por Chen et al. (2019) y Guo et al. (2022) para la China, la información generada para Suroeste y Noroeste de Etiopía por Sori et al. (2021) y Belay et al. (2023), respectivamente, y el estudio ejecutado Roudier et al. (2020) para Nueva Zelanda.

Reportes recientes ponen al descubierto que, en una proporción importante del área cafetera de Colombia ocurren condiciones de acidez del suelo (Sadeghian, 2016; Sadeghian, 2022), las cuales pueden afectar el crecimiento de las plantas si no se toman las medidas del caso. Estos resultados se presentan a escala departamental y no reflejan lo que sucede, por ejemplo, a nivel de municipio. El presente estudio, de tipo exploratorio, tuvo como objetivo caracterizar y mapear la acidez del suelo en la zona cafetera de Colombia a escala municipal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Base de datos

En una base de datos, en el formato Excel, se reunió la información de los análisis de suelos realizados desde el año 1989, en 460 municipios de 22 departamentos de Colombia. Los resultados correspondían a muestras tomadas de 0 a 20 cm de profundidad y analizadas en los diferentes laboratorios del país, para evaluar la fertilidad del suelo en lotes cultivados en café, con fines de generar las recomendaciones de fertilizantes y enmiendas.

Las propiedades analizadas incluyeron pH (método potenciométrico, relación suelo:agua desionizada 1:1 p/p), materia orgánica (Walkley & Black y determinación por colorimetría), fósforo disponible (extracción con Bray II y determinación por Bray-Kurtz colorimétrica), Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} (extracción con acetato de amonio 1,0 N apH 7,0 y determinación por espectrofotómetro de absorción atómica), Al^{3+} (extracción con KCl 1,0 N y determinación por espectrofotómetro de absorción atómica o titulación) y SAI³⁺ (calculada, de acuerdo con la Ecuación <1>).

$$\text{Saturación de } Al^{3+} = \frac{Al^{3+} * 100}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Al^{3+}} <1>$$

Se consolidó una base de datos que contenía para cada registro los valores de las anteriores propiedades del suelo y la correspondiente información de la localización (municipio y departamento). Seguidamente, se llevó a cabo la depuración de la base de datos, considerando como valores atípicos o extremos aquellos que no cumplieran con los siguientes criterios: $3,0 < pH < 7,5$, $Ca^{2+} \leq 30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, $Mg^{2+} \leq 10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, $K^{+} \leq 5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y $Al^{3+} \leq 10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Por último, se retiraron de la base de datos aquellos municipios que contaban con menos

de 25 registros; quedando de esta manera un total de 344.652 registros, correspondientes a 460 municipios.

Análisis de datos

Se utilizó el diagrama de cajas y bigotes para describir las variaciones del pH a nivel departamental y se calculó la frecuencia porcentual de muestras en los siguientes rangos de la acidez activa: 1) $\text{pH} \leq 4,5$, 2) $4,5 < \text{pH} \leq 5,0$, 3) $5,0 < \text{pH} \leq 5,5$, 4) $5,5 < \text{pH} \leq 6,0$ y 5) $\text{pH} > 6,0$. Para cada municipio se calculó la frecuencia de los datos de pH, Al^{3+} y SAI^{3+} en los rangos considerados de baja fertilidad para café en Colombia: $\text{pH} \leq 5,0$, $\text{Al}^{3+} > 1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y $\text{SAI}^{3+} > 40\%$ (adaptado de Sadeghian, 2018). Cabe aclarar que, para el caso de SAI^{3+} se tomó un rango crítico más alto que el de referencia (30%); buscando así identificar niveles de saturación de aluminio que pudieran llegar a generar toxicidad en plantas de café. Los anteriores valores de frecuencias porcentuales se clasificaron en las siguientes categorías: muy baja (menor que 20%), baja (20% a 40%), media (40% a 60%), alta (60% a 80%) y muy alta (mayor que 80%). Basados en las anteriores categorías, se elaboraron mapas de pH, Al^{3+} y SAI^{3+} a escala municipal.

Mediante la regresión simple se determinó la relación entre el pH y Al^{3+} , SAI^{3+} y la suma de Ca^{2+} y Mg^{2+} ; así mismo, se empleó la regresión múltiple para explicar la variabilidad del pH en función de las demás propiedades analizadas de manera conjunta. Para el procesamiento de los datos se utilizó el software Rbio (Bhering, 2017).

Mapas de fertilidad

Soportado en las categorías de las frecuencias de muestras en el rango de baja fertilidad de

los municipios, se elaboraron mapas digitales para pH, Al^{3+} y SAI^{3+} con el software ArcGis (V.10.3.1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estadística descriptiva para pH

La significancia de la prueba de Shapiro-Wilk ($p=0,001174$) indica que la distribución de los datos de pH no fue normal. Esta presentó una distribución tendiente a ser plana (mesocúrtica), con poca ocurrencia de datos extremos y colas cortas (Figura 1), resultados que se reflejaron en el valor de la curtosis (-0,199). La asimetría positiva (0,272) revela que la distribución se sesgó hacia la izquierda.

Para todos los departamentos, la distribución de los datos fue simétrica, con valores extremos que pueden inducir alargamiento de las colas en algunos casos (Figura 2). Por lo general, la mayor parte de los datos atípicos ocurrieron para valores altos, resultado que puede tener su explicación en el incremento del pH, ocasionado por el sobre-encalamiento. Los coeficientes de variación fueron bajos (7,44% a 14,16%), resultado que coincide con los reportes de Patiño et al. (2006) para la zona cafetera del departamento del Valle del Cauca y lo comunicado por Jaramillo et al. (2013) y Lince & Sadeghian (2012) a nivel del lote cafetero en Colombia.

De los 460 municipios estudiados, 58 presentaron valores promedio de pH menor que 4,5; 217 entre 4,5 y 5,0; 169 entre 5,0 y 5,5; y 16 entre 5,5 y 6,1. Lo anterior pone al descubierto que el 60% de los municipios cafeteros presentan condiciones de acidez del suelo que puede afectar el crecimiento del café; siendo más crítica la situación para el 13%, donde los valores del pH son menores que 4,5.

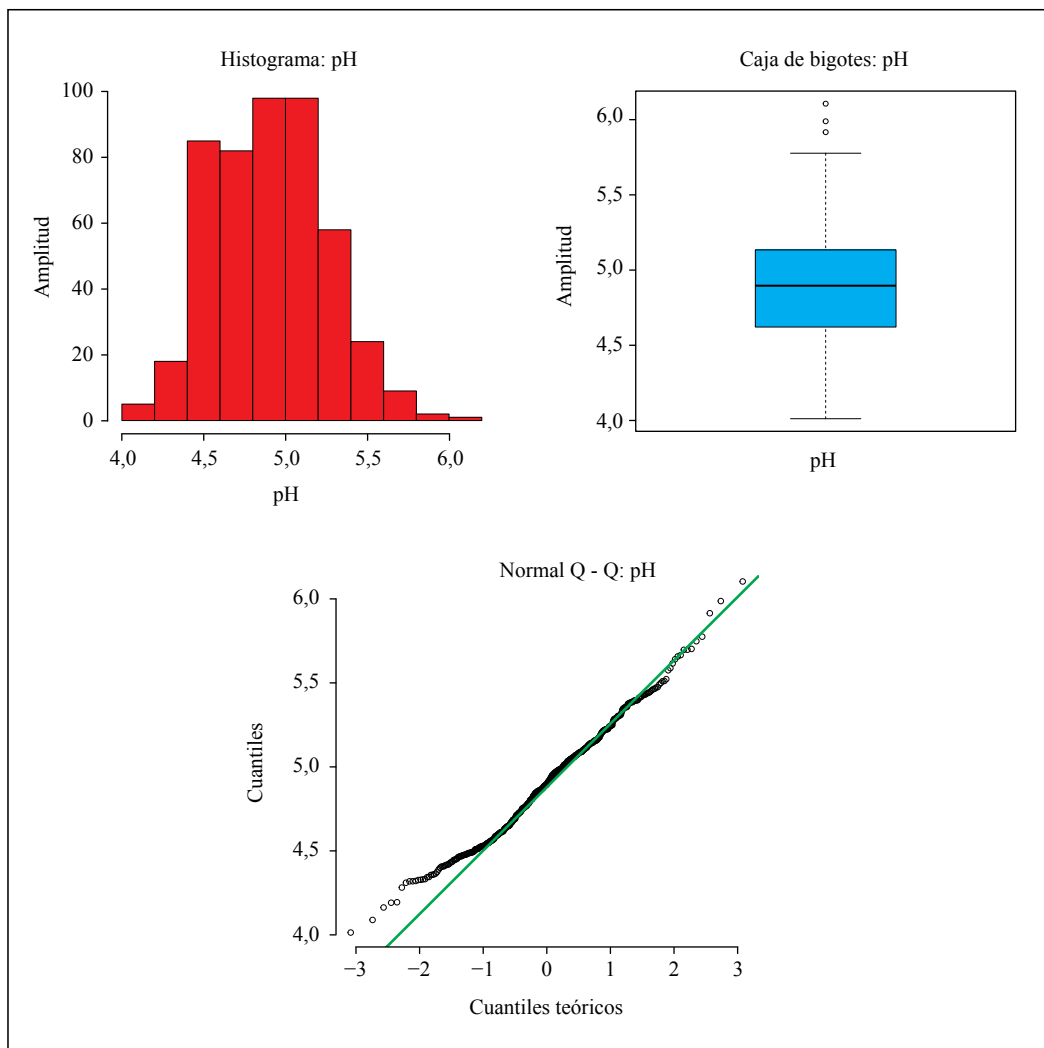


Figura 1. Histograma, diagrama de caja y bigotes, y gráfico Q-Q (cuantil-cuantil) para pH (n=460, municipios).

Los promedios más bajos de pH (<4,5) se detectaron en Bolívar, Meta, Caquetá, Casanare y Putumayo, departamentos en los cuales la mayor parte de los datos estuvieron por debajo de 5,0. Los promedios más altos (>5,0) se encontraron en el Valle del Cauca, La Guajira, Risaralda, Nariño y Caldas.

En algunos municipios, el promedio del pH estuvo cercano a 4,0, mientras que en otros llegó hasta 6,0. El contenido de Al^{3+} fluctuó entre 0,1 y 4,7 $cmol_c\ kg^{-1}$ y SAI^{3+} entre 0,2% y 91,1%. El nivel más bajo de Ca^{2+} fue 0,2 $cmol_c\ kg^{-1}$ y el más alto 17,9 $cmol_c\ kg^{-1}$; a su vez, el rango de Mg^{2+} estuvo entre 0,12 y 5,7 $cmol_c\ kg^{-1}$.

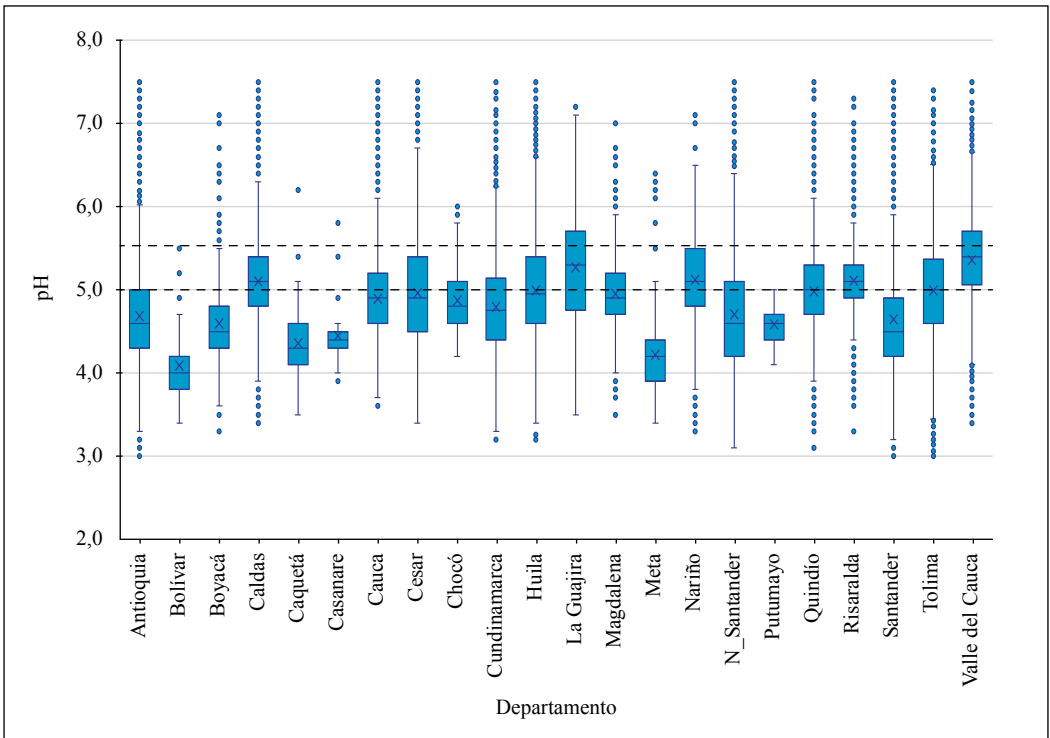


Figura 2. Diagramas de cajas y bigotes de la distribución del pH del suelo (1:1 H₂O) para 22 departamentos de la zona cafetera de Colombia. La letra X denota la media, las líneas continuas dentro de las cajas la mediana y las líneas negras horizontales denotan el rango del pH adecuado para café.

Relación entre el pH y demás propiedades del suelo

Se halló una relación fuerte y negativa tanto entre el pH y el contenido de Al³⁺, como entre pH y SAl³⁺ (Figura 3), siendo más ajustada esta última relación, posiblemente por incluir a Ca²⁺ y Mg²⁺ en la ecuación de la acidez.

Como era de esperarse, el Al³⁺ disminuyó con el aumento del pH, llegando a valores cercanos a cero para pH=5,5, sin alcanzar este límite. Como se mencionó, el aluminio trivalente (Al³⁺) se reduce conforme se incrementa el pH y, deja de existir como especie química con el pH>5,5, dando su lugar a la forma neutralizada Al(OH)₃ (Bleam, 2017; Zapata, 2022), razón

por la cual los laboratorios no lo analizan. Por lo tanto, valores de Al³⁺ y SAl³⁺ mayores que cero para pH>5,5 se deben al efecto de las desviaciones que pueden presentarse alrededor del promedio de los municipios.

Las variaciones de Al³⁺ para un mismo valor de pH fueron altas, especialmente para condiciones de mayor acidez; por ejemplo, para pH=4,5 se detectaron valores de Al³⁺ entre 1,5 y 4,5 cmol_c kg⁻¹, resultado que puede relacionarse con la diversidad de las propiedades de los suelos de la zona cafetera del país en consecuencia de los factores y procesos de su formación. Una tendencia similar se observó para la SAl³⁺. Con base en las ecuaciones de estos dos indicadores de

la acidez, pueden estimarse para pH=5,0 los valores de Al^{3+} y SAI^{3+} de $1,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y 23%, respectivamente.

La relación del pH y la suma de Ca^{2+} y Mg^{2+} tuvo una menor significancia que Al^{3+} y SAI^{3+} (Figura 3); sin embargo, la

tendencia general muestra que los contenidos de estos dos elementos se incrementan conforme al aumento del pH. La ecuación sugiere que, en promedio, el $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ alcanzan $6,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ con el pH=5,0; esto, con extremos de 3,0 y $12,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ aproximadamente.

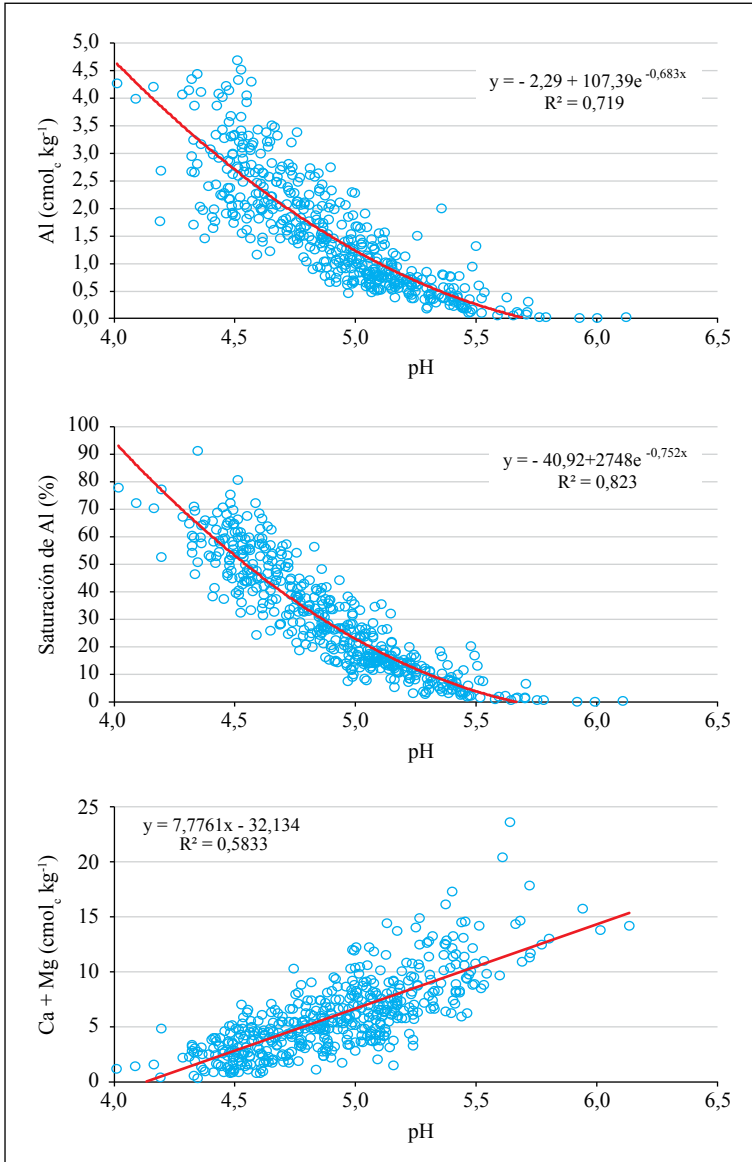


Figura 3. Relación entre pH y Al^{3+} , SAI^{3+} y la suma de Ca^{2+} y Mg^{2+} (n=460). Cada punto corresponde al promedio de un municipio de la zona cafetera de Colombia.

En la Figura 4 se representan, mediante mapa de calor y dendograma, las relaciones entre las propiedades del suelo, generadas a partir de valores promedio de cada municipio. Pueden distinguirse los siguientes grupos: i) Ca^{2+} y Mg^{2+} , ii) pH y Al^{3+} , y iii) K. La regresión múltiple reveló que las variaciones del pH pueden explicarse mediante la Ecuación <2>, en la cual no está presente el Mg^{2+} , debido a su alta correlación con Ca^{2+} :

$$\text{pH} = 4,8893 + 0,2703 * \text{K} + 0,0538 * \text{Ca} - 0,1936 * \text{Al} \quad <2>$$

En esta expresión matemática, con $R^2 = 0,84$ y una alta significancia de todos los parámetros de las variables ($p < 0,001$), los signos de estos parámetros indican una relación directa de pH con respecto al Ca^{2+} y K^+ , y una relación inversa entre pH y Al^{3+} , resultados que son coherentes con lo discutido hasta el momento.

Frecuencia de los rangos del pH por departamento

En la Tabla 1 se muestra el porcentaje de muestras en cada rango de pH para cada departamento. Más del 70% de las muestras procedentes de Bolívar, Meta, Casanare y Caquetá presentaron valores de $\text{pH} \leq 4,5$. En los mismos departamentos y Putumayo, más del 95% de los resultados exhibían acidez para café ($\text{pH} \leq 5,0$). Una situación similar, pero de menor magnitud, se detectó en Boyacá, Santander y Antioquia. La condición detectada sugiere la implementación de estrategias para corregir la acidez del suelo en las diferentes etapas del cultivo de café, entre las cuales se destaca el encalado como práctica determinante en el crecimiento y producción de café en Colombia (Sadeghian, 2022).

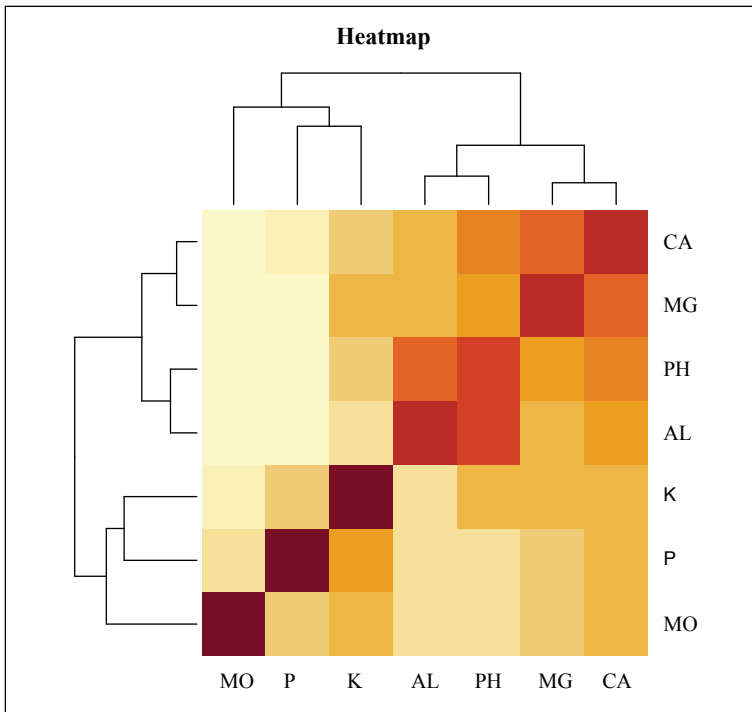


Figura 4. Mapa de calor (heatmap) de las propiedades del suelo.

Para el Valle del Cauca se detectó una condición diferente, pues solo el 4,4% de los resultados tenían valores de $pH \leq 4,5$ y 24,5% $pH \leq 5,0$. Una tendencia similar, pero de menor magnitud, se registró para La Guajira, Risaralda, Caldas y Nariño (entre 40% y 50% de muestras con $pH \leq 5,0$). Tuvieron una baja representación porcentual las muestras de suelo con valores de $pH > 6,0$,

los cuales se consideran altos para café y, en cuyo caso, ameritan tratamientos correctivos (Sadeghian, 2008). Solo en La Guajira y Valle del Cauca se encontraron estas categorías, sin que su proporción excediera el 7%. Los departamentos con mayor porcentaje de muestras en el rango óptimo para café ($5,0 < pH \leq 5,5$) fueron Risaralda y Valle del Cauca.

Tabla 1. Porcentaje de muestras por departamento, según el rango de pH.

Departamento	$pH \leq 4,5$	$4,5 < pH \leq 5,0$	$5,0 < pH \leq 5,5$	$5,5 < pH \leq 6,0$	$pH > 6,0$
Antioquia	44,03	35,67	14,22	4,69	1,39
Bolívar	87,10	8,06	4,84	-	-
Boyacá	53,81	34,11	6,29	3,48	2,32
Caldas	10,23	36,93	37,93	12,95	1,96
Caquetá	74,25	22,76	2,71	-	0,27
Casanare	77,78	16,67	2,78	2,78	-
Cauca	22,29	44,00	26,05	6,00	1,66
Cesar	28,72	28,62	24,76	12,84	5,05
Chocó	16,79	54,85	24,25	4,10	-
Cundinamarca	34,96	33,64	19,94	7,83	3,62
Huila	23,38	32,80	26,10	13,51	4,20
La Guajira	16,30	22,96	28,89	20,74	11,11
Magdalena	16,94	43,98	31,13	7,23	0,72
Meta	84,65	11,63	1,40	0,47	1,86
Nariño	15,09	33,73	30,77	15,38	5,03
Norte de Santander	46,02	27,00	16,03	7,32	3,63
Putumayo	42,31	57,69	-	-	-
Quindío	15,91	38,91	35,81	8,67	0,70
Risaralda	7,27	35,61	45,20	10,91	1,01
Santander	53,47	26,55	10,05	5,41	4,52
Tolima	20,28	32,53	32,09	12,32	2,77
Valle del Cauca	4,38	20,13	40,66	27,30	7,53

Regionalización de pH

En la Figura 5 se representa, mediante mapa, la frecuencia porcentual de muestras de suelos con $\text{pH} \leq 5,0$. El 60,5% del área con potencial cafetero de Colombia presenta limitantes por acidez, siendo la situación más crítica para el 33% ($\text{pH} \leq 4,5$); escenario en la cual predomina el Al^{3+} sobre Ca^{2+} y Mg^{2+} .

Pueden distinguirse zonas que se caracterizan por su mayor frecuencia de acidez y otras en las que esta condición es menos limitante. En las primeras se tienen:

- **Zona Oriental.** Norte de Santander, Santander, Boyacá, Cundinamarca, Oriente del Tolima, Suroriente del Huila, Casanare, Meta, Caquetá y Putumayo.
- **Zona Central.** Oriente de Antioquia y de Caldas, y Suroriente de Tolima y de Huila.
- **Zona Occidental.** Occidente de Antioquia, Suroccidente del Valle del Cauca y Noroccidente de Cauca.

Y las zonas donde ocurren menos limitantes por acidez son:

- **Zona Occidental:** Noroeste de Antioquia, Suroeste y Occidente de Risaralda, Valle del Cauca y Nariño.
- **Zona Central:** Centro y Suroeste de Caldas.

La acidez del suelo, entre otros factores y proceso pedogenéticos, está íntimamente relacionada con el material parental. En Antioquia, Tolima, Santander y Cundinamarca, la alta frecuencia de la acidez puede asociarse a rocas de composición ácida; de las cuales, en Antioquia corresponden a dos tipos, la granodiorita biotítica que da origen a la unidad de suelos Oriente, y los esquistos silicatados

que dan origen a las unidades Aures y Salgar (FNC, 1972, 1992). En Tolima, las rocas que propician la condición ácida son el granito y la cuarzdiorita, representadas por las unidades de suelo San Simón, La Cabaña, Colón y Junín, y las sedimentarias, en su mayoría areniscas pobres en bases, originarias de las unidades Mendarco y Guadalupe. En Santander y Cundinamarca son las rocas sedimentarias, de tipo areniscas cuarzosas de grano fino a medio y lutitas silíceas, que dan origen a las unidades de suelos Llano de Palmas, El Roper, Sargento, Guadalupe y Chanchón (FNC, 1973, 1974, 1981).

Para el Valle del Cauca, esta condición puede asociarse con el material parental del cual provienen los suelos, que en su mayoría corresponden a rocas de composición básica. En las ígneas se tienen peridotitas, diabasas y basaltos hornbléndicos, las cuales dan origen a las unidades de suelo Parnaso, Dovia y Maibá y en las metamórficas a anfíbolitas, y esquistos talcosos, biotíticos y micáceos, originarios de las unidades Chuscal, Catarina y Cascarero (FNC, 1990).

Regionalización de aluminio intercambiable

En la Figura 6 se representa, a manera de mapa, la frecuencia porcentual de muestras de suelos con $\text{Al}^{3+} \geq 1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. En el 42,5% del área con aptitud para el cultivo de café en Colombia se presenta una alta a muy alta frecuencia de posibles problemas por el Al^{3+} . Las siguientes regiones presentan mayores limitantes:

- **Zona Oriental.** Santander, Boyacá, Norte de Cundinamarca, Oriente del Tolima, Suroriente del Huila, Casanare, Meta, Caquetá y Putumayo.
- **Zona Central.** Oriente de Antioquia y de Caldas, y Suroriente de Tolima y de Huila.

- **Zona Occidental.** Occidente de Antioquia, Suroccidente del Valle del Cauca y Noroccidente de Cauca.

Regionalización de la saturación de aluminio intercambiable

En la Figura 7 se representa, a manera de mapa, la frecuencia porcentual de muestras de suelos con porcentaje de $SAI^{3+} > 40\%$. En el 33% del área con aptitud para el cultivo de café en Colombia se presenta una alta a muy alta frecuencia de posibles problemas por el Al^{3+} . Las siguientes regiones se presentan mayores limitantes:

- **Zona Oriental.** Oriente de Santander y de Antioquia, Casanare, Meta, Caquetá y Putumayo.
- **Zona Central.** Oriente de Antioquia y de Caldas, y Suroriente de Tolima y de Huila.
- **Zona Occidental.** Occidente de Antioquia, Suroccidente del Valle del Cauca y Noroccidente de Cauca.

Puede concluirse que la acidez del suelo es un común denominador en muchos territorios de la zona cafetera de Colombia; basta con decir que, el 60,5% del área con potencial

cafetero presenta limitantes por acidez, siendo la situación más crítica para el 33% ($pH \leq 4,5$); escenario en el cual predomina Al^{3+} sobre Ca^{2+} y Mg^{2+} . En las siguientes regiones la frecuencia de acidez es mayor: Norte de Santander, Santander, Boyacá, Cundinamarca, Oriente del Tolima, Suroriente del Huila, Casanare, Meta, Caquetá, Putumayo, Oriente de Antioquia y de Caldas, Suroriente de Tolima y de Huila, Occidente de Antioquia, Suroccidente del Valle del Cauca y Noroccidente de Cauca. La condición de la acidez está relacionada con el material parental en interacción con otros factores de formación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración y los valiosos aportes de Luis Ignacio Estrada, Rubén Darío Medina, Luis Carlos Imbachí, los revisores del manuscrito y los Comités Departamentales de Cafeteros que proporcionaron los resultados de los análisis de suelos. Proyecto SUE02001.

Contribución de los autores: Conceptualización de la investigación, Administración del proyecto y Recolección de datos: **SSK**; Análisis de la información: **SSK** y **LALS**; Preparación del manuscrito: **SSK**; Revisión del manuscrito: **SSK** y **LALS**; Elaboración de mapas: **LALS**.

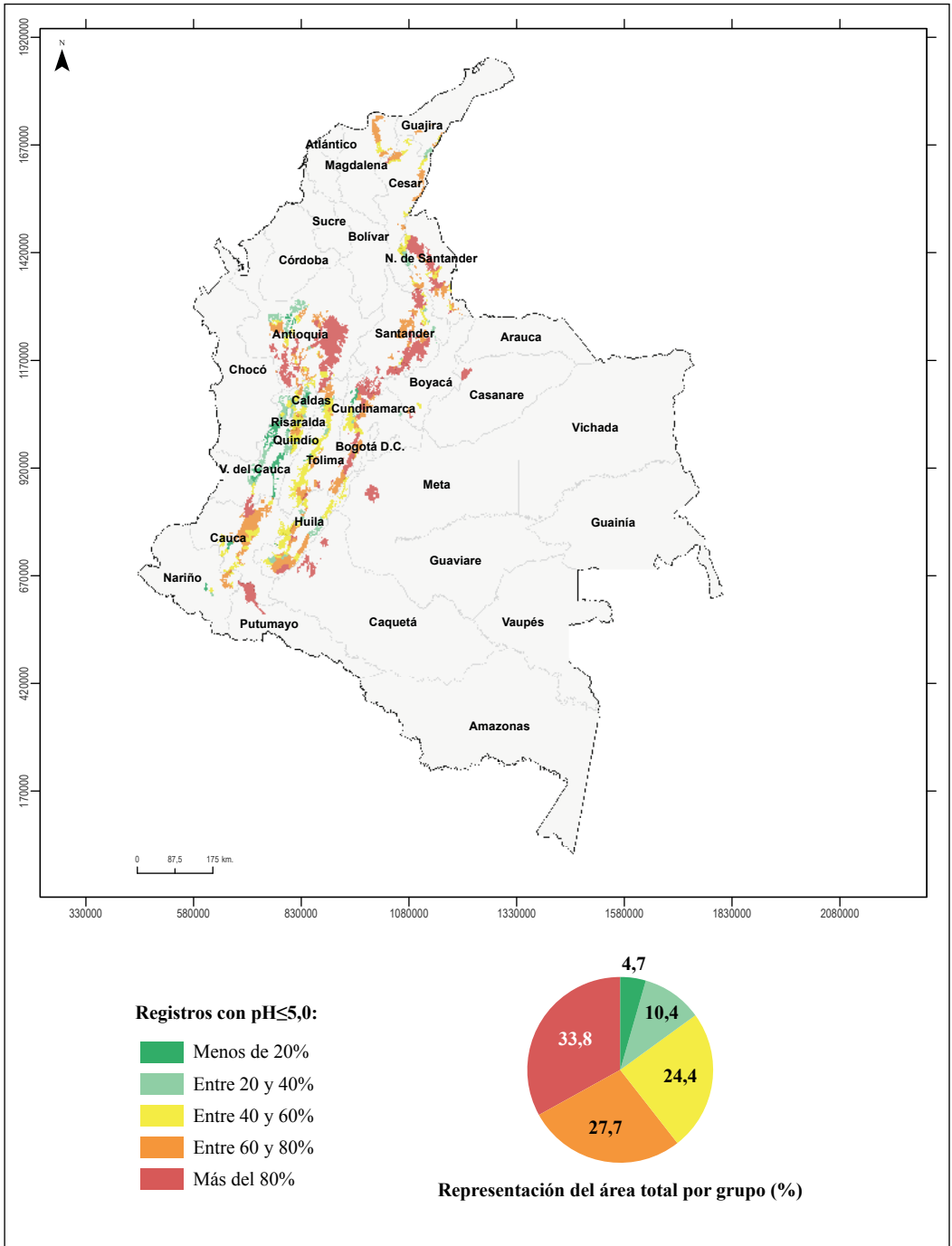


Figura 5. Representación de la frecuencia relativa de muestras de suelo con valores de pH menores que 5,0 en la zona cafetera de Colombia.

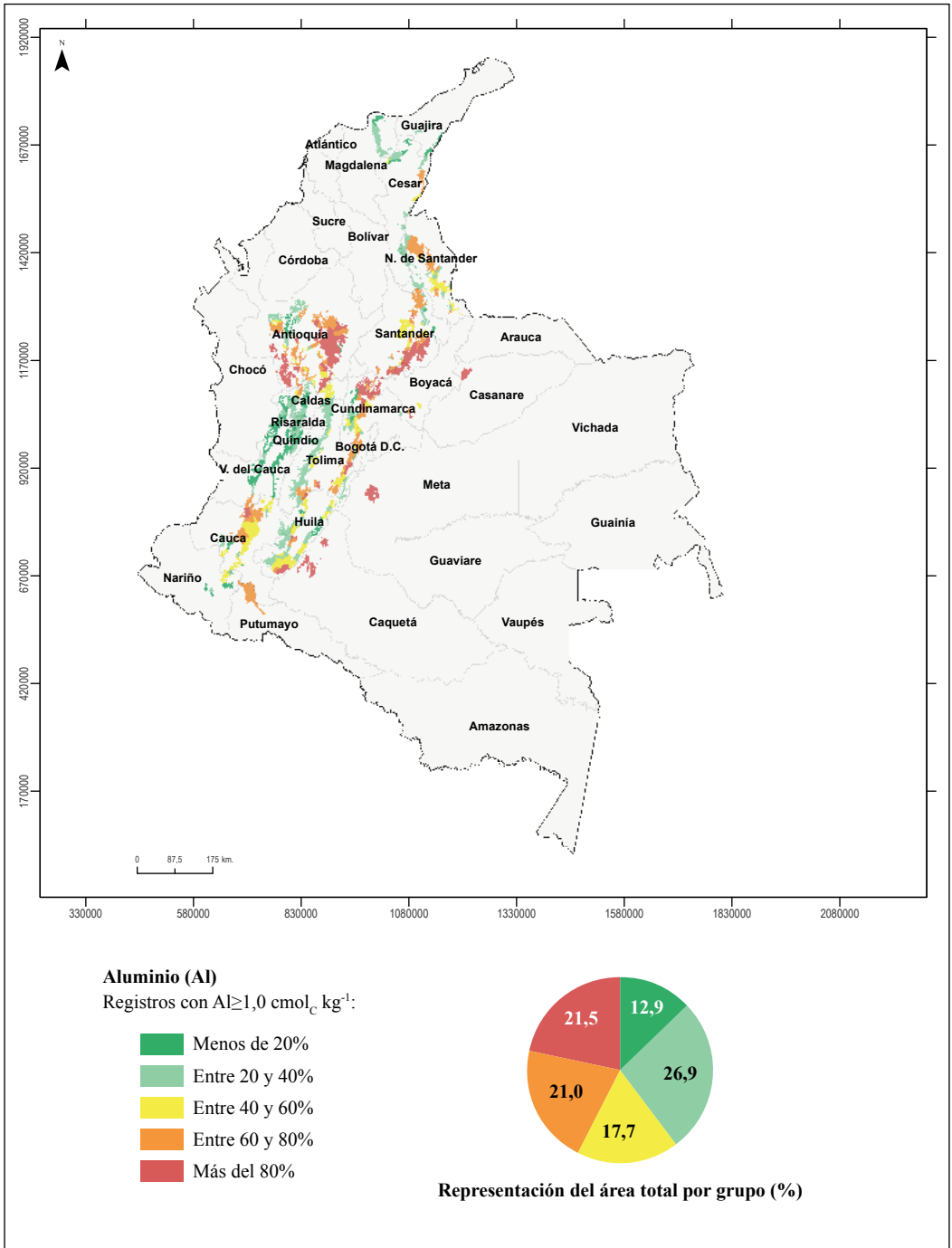


Figura 6. Representación de la frecuencia relativa de muestras de suelo con valores de Al^{3+} mayores que $1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ en la zona cafetera de Colombia.

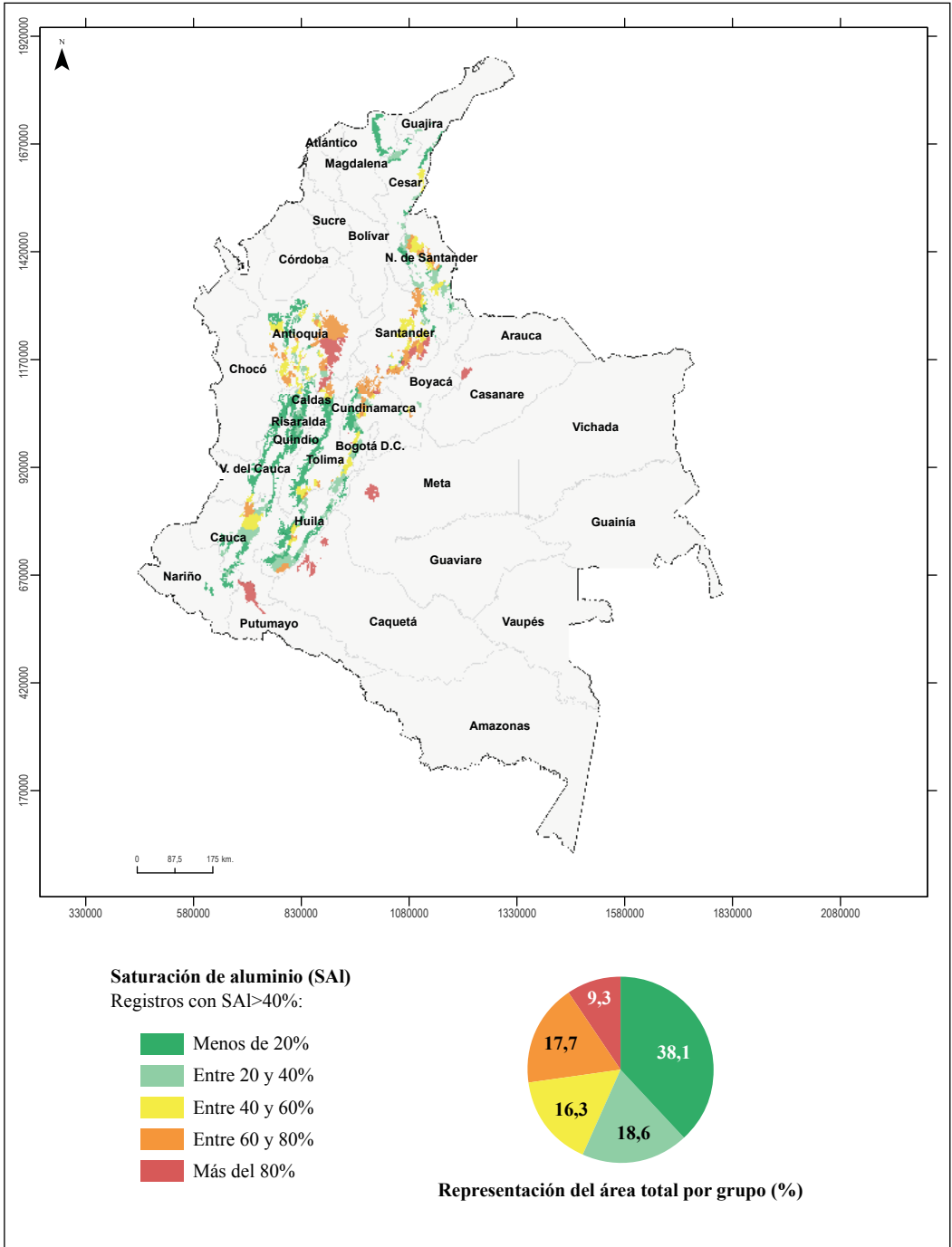


Figura 7. Representación de la frecuencia relativa de muestras de suelo con valores de saturación de Al³⁺ mayores que 40% en la zona cafetera de Colombia.

LITERATURA CITADA

- Acuña-Zornosa, R., & Sadeghian-Khalajabadi, S. (2020). Identification of acid-tolerant coffee genotypes in a coffee germplasm collection of Colombia. *Coffee Science*, 15, e151727. <https://doi.org/10.25186/v15i.1727>
- Barbosa, S. M., Silva, B. M., Oliveira, G. C. D., Benevenuto, P. A. N., Da Silva, R. F., Curi, N., Da Silva Moretti, B., Silva, S. H. G., Norton, L. D., & Pereira, V. M. (2020). Deep furrow and additional liming for coffee cultivation under first year in a naturally dense inceptisol. *Geoderma*, 357, 113934. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113934>
- Behera, S. K., & Shukla, A. K. (2015). Spatial Distribution of Surface Soil Acidity, Electrical Conductivity, Soil Organic Carbon Content and Exchangeable Potassium, Calcium and Magnesium in Some Cropped Acid Soils of India. *Land Degradation & Development*, 26(1), 71–79. <https://doi.org/10.1002/ldr.2306>
- Belay, A. M., Selassie, Y. G., Tsegaye, E. A., Meshesha, D. T., & Addis, H. K. (2023). Soil pH mapping as a function of land use, elevation, and rainfall in the lake tana basin, northwestern of ethiopia. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 6(4), e20420. <https://doi.org/10.1002/agg2.20420>
- Bhering, L. L. (2017). Rbiod: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 17(2), 187–190. <https://doi.org/10.1590/1984-70332017v17n2s29>
- Bleam, W. (2017). *Soil and Environmental Chemistry*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-01022-X>
- Braccini, M. C. L., Martínez, H. E. P., Pereira, P. R. G., Sampaio, N. F., & Silva, E. A. M. (1998). Tolerância de genótipos de cafeeiro ao alumínio em solução nutritiva. I. Crescimento e desenvolvimento da parte aérea e sistema radicular. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22(3), 435–442. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000300009>
- Chaves, J., Paván, M. A., & Igue, K. (1984). Respostas do cafeeiro à calagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 19(5), 573–582. <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/15714/9728>
- Chen, S., Liang, Z., Webster, R., Zhang, G., Zhou, Y., Teng, H., Hu, B., Arrouays, D., & Shi, Z. (2019). A high-resolution map of soil pH in China made by hybrid modelling of sparse soil data and environmental covariates and its implications for pollution. *Science of The Total Environment*, 655, 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.230>
- Corrêa, J. B., Reis, T. H. P., Pozza, A. A. A., Guimarães, P. T. G., & Carvalho, J. G. de. (2007). Índice de saturação por bases na nutrição e na produtividade de cafeeiros ‘Catuai Vermelho’ (*Coffea arabica* L.). *Coffee Science*, 2(2), 159–167. <https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/62>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1972). *Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del Suroeste de Antioquia*. Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1973). *Estudio de zonificación y uso potencial del departamento del Tolima*. Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1974). *Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Cundinamarca*. Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1974). *Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Cundinamarca*. Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1990). *Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Valle del Cauca*. Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1992). *Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del oriente de Antioquia*. Cenicafé.
- Foth, H. D., & Ellis, B. G. (1997). *Soil fertility* (2nd ed.). CRC Press.
- Geng, Y., Zhou, T., Zhang, Z., Cui, B., Sun, J., Zeng, L., Yang, R., Wu, N., Liu, T., Pan, J., Si, B., & Lausch, A. (2024). Continental-scale mapping of soil pH with SAR-optical fusion based on long-term earth observation data in google earth engine. *Ecological Indicators*, 165, 112246. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112246>
- Guo, J., Wang, K., & Jin, S. (2022). Mapping of Soil pH Based on SVM-RFE Feature Selection Algorithm. *Agronomy*, 12(11), 2742. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112742>

- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson.
- Jaramillo, D. F., Sadeghian, S., & Lince, L. A. (2013). Variabilidad espacial de las bases en un Andisol de la zona cafetera central colombiana. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 33, 111–124.
- Lince, L. A., & Sadeghian, S. (2012). Número de muestras simples para el análisis de las propiedades del suelo. *Suelos ecuatoriales*, 42(2), 129–137.
- Neina, D. (2019). The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019, 5794869. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). *Suelos Ácidos*. Portal de Suelos de la FAO. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-acidos/es/>
- Ortiz, M. E., Zapata, R. D., Sadeghian, S., & Franco, H. F. (2004). Aluminio intercambiable en suelos con propiedades ándicas y su relación con la toxicidad. *Revista Cenicafé*, 55(2), 101–110. <http://hdl.handle.net/10778/165>
- Parecido, R. J., Soratto, R. P., Perdoná, M. J., Guidorizzi, F. V. C., Gomes, G. G., Paula, R. A., & Gitari, H. I. (2021). Limestone increased coffee yield and profitability more than phosphogypsum or their combination. *Agronomy Journal*, 113(4), 3586–3599. <https://doi.org/10.1002/agj2.20712>
- Parecido, R. J., Soratto, R. P., Perdoná, M. J., Gitari, H. I., Dognani, V., Santos, A. R., & Silveira, L. (2021). Liming Method and Rate Effects on Soil Acidity and Arabica Coffee Nutrition, Growth, and Yield. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(4), 2613–2625. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00550-9>
- Patiño, M. A., Sadeghian, S., & Montoya, E. C. (2006). Caracterización de la fertilidad del suelo en la zona cafetera del Valle del Cauca mediante registros históricos. *Revista Cenicafé*, 57(1), 7–16. <http://hdl.handle.net/10778/182>
- Paván, M. A., & Bingham, F. T. (1982). Toxicity of Aluminum to Coffee Seedlings Grown in Nutrient Solution. *Soil Science Society of America Journal*, 46(5), 993–997. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050021x>
- Paván, M. A., Bingham, F. T., & Pratt, P. F. (1982). Toxicity of Aluminum to Coffee in Ultisols and Oxisols Amended with CaCO₃, MgCO₃, and CaSO₄ · 2H₂O. *Soil Science Society of America Journal*, 46(6), 1201–1207. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600060017x>
- Reuter, H. I., Rodriguez, L. L., Hengl, T., & Montanarella, L. (2008). Continental-Scale Digital Soil Mapping Using European Soil Profile Data: Soil PH. *Hamburger Beiträge Zur Physischen Geographie Und Landschaftsökologie*, 19(1), 91–102.
- Rodrigues, L., Martínez, H. E. P., Neves, J. C. L., Novais, R. F., & Mendonça, S. M. (2001). Growth response of coffee tree shoots and roots to subsurface liming. *Plant and Soil*, 234(2), 207–214. <https://doi.org/10.1023/A:1017999318532>
- Rodrigues, L. A., Prieto Martínez, H. E., Neves, J. C. L., Novais, R. F., & Mendonça, S. M. D. (2006). Respostas nutricionais de cafeeiros Catuaí e Icatu a doses de calcário em subsuperfície. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30(6), 985–995. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000600008>
- Roudier, P., Burge, O. R., Richardson, S. J., McCarthy, J. K., Grealish, G. J., & Ausseil, A.-G. (2020). National Scale 3D Mapping of Soil pH Using a Data Augmentation Approach. *Remote Sensing*, 12(18), 2872. <https://doi.org/10.3390/rs12182872>
- Sadeghian, S. (2003). Efecto de la fertilización con nitrógeno fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados en café. *Revista Cenicafé*, 54(3), 242–257. <http://hdl.handle.net/10778/273>
- Sadeghian, S. (2008). Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica. *Boletín Técnico Cenicafé*, 32, 1–44. <http://hdl.handle.net/10778/587>
- Sadeghian, S. (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 466, 1–12. <http://hdl.handle.net/10778/704>
- Sadeghian, S. (2018). Interpretación de los resultados de análisis de suelo: Soporte para una adecuada nutrición de cafetales. *Avances Técnicos Cenicafé*, 497, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0497>
- Sadeghian, S. (2022). *Nutrición del café. Consideraciones para el manejo de la fertilidad del suelo*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0017>
- Sadeghian, S., & Díaz-Marín, C. (2020a). Corrección de la acidez del suelo: Efectos en el crecimiento inicial del café. *Revista Cenicafé*, 71(1), 21–31. <https://doi.org/10.38141/10778/1117>

- Sadeghian, S., & Díaz-Marín, C. (2020b). Corrección de la acidez del suelo: Alteraciones químicas del suelo. *Revista Cenicafé*, 71(1), 7–20. <https://doi.org/10.38141/10778/1116>
- Sadeghian, S., & Zapata, R. D. (2014). Crecimiento de café (*Coffea arabica* L.) durante la etapa de almácigo en respuesta a la salinidad generada por fertilizantes. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 31(2), 40–50. <https://doi.org/10.22267/rcia.143102.30>
- Sori, G., Iticha, B., & Takele, C. (2021). Spatial prediction of soil acidity and nutrients for site-specific soil management in Bedele district, Southwestern Ethiopia. *Agriculture & Food Security*, 10(1), 59. <https://doi.org/10.1186/s40066-021-00334-5>
- Sparks, D. (2003). *Environmental Soil Chemistry* (2a ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-656446-4.X5000-2>
- Yüzügüllü, O., Fajraoui, N., & Liebisch, F. (2024). Soil Texture and pH Mapping Using Remote Sensing and Support Sampling. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 12685–12705. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3422494>
- Weil, R. R., & Brady, N.C. (2017). *The nature and properties of soil* (15th ed.). Pearson.
- Zapata, R. D. (2022). *Los procesos químicos del suelo*. Universidad Nacional de Colombia.