

Artículo original

Evaluación de un método rápido para determinar los requerimientos de cal en suelos de la zona cafetera colombiana

Evaluation of a rapid method to determine lime requirements in acid soils of the Colombian coffee zone

Vanessa Catalina Díaz-Poveda*, Siavosh Sadeghian

Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé, Manizales, Colombia

Resumen

La determinación de los requerimientos de cal para suelos ácidos requiere métodos prácticos, rápidos y efectivos. Algunas de las opciones actualmente utilizadas subestiman estos requerimientos, en tanto que otras los sobreestiman. En este estudio el objetivo fue evaluar la metodología de titulación directa con hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) como una alternativa más rápida frente al método de incubación, el cual se empleó como patrón. Se emplearon 25 muestras de suelo de la zona cafetera colombiana con un $\text{pH} < 5,5$ y propiedades fisicoquímicas contrastantes. Estas se trataron con dosis crecientes de dolomita ($\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3$) en el método de incubación y de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 0,02 M en el método de titulación. El incremento del pH en respuesta a los tratamientos en el método de incubación fue de tipo exponencial y menor que en el de titulación, el cual presentó una tendencia lineal y subestimó los requerimientos de cal comparado con el de incubación en todos los suelos para alcanzar un pH de 5,5. Mediante regresión múltiple se pudieron explicar las diferencias de los requerimientos de cal entre los dos métodos ($R^2=0,94^{**}$) en función de los contenidos de materia orgánica, N, P, K, Mg, S, Al, Na, Mn, Cu, B y limo de los suelos, y se generó un factor de corrección que se debe sumar a la dosis determinada por el método de titulación. Se concluyó que, a pesar de que el método de titulación con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es más rápido que el de incubación, su aplicación en los suelos de la zona cafetera de Colombia requiere un factor de ajuste con base en las propiedades de sus suelos.

Palabras clave: Acidez del suelo; Encalamiento; Incubación; pH; Titulación- $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Abstract

Determining the lime requirements (LR) for acidic soils requires practical, fast, and effective methods. Some of the options currently used underestimate these requirements while others lead to overestimations. Here we evaluated the direct titration methodology with calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) as a faster alternative to the incubation method, which was used as a standard. We used 25 samples from the Colombian coffee zone with $\text{pH} < 5.5$ and contrasting physicochemical properties. We treated them with increasing doses of dolomite ($\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3$) in the incubation method and with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 0.02 M in the titration method. The increase in pH in response to the treatments in the incubation method was exponential and less than that obtained with the titration method. In all soils, the titration method showed a linear trend and underestimated the lime requirements to reach a $\text{pH} = 5.5$ compared to the incubation method. A multiple regression analysis ($R^2=0.94^{**}$) was used to explain the differences in lime requirements between the two methods based on several properties of the soils and generate the correction factor that should be added to the dose determined by the titration method. The soil properties considered in the regression analysis were the organic matter, N, P, K, Mg, S, Al, Na, Mn, Cu, B, and silt contents. We concluded that although the titration method with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is faster than the incubation method to determine the LR, its application in the Colombian coffee zone requires an adjustment factor based on the properties of the soil.

Keywords: Soil acidity; Liming; Incubation; pH; Titration- $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Citación: Díaz-Poveda VC, Sadeghian S. Evaluación de un método rápido para determinar los requerimientos de cal en suelos de la zona cafetera colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1246-1261, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1405>

Editor: Alexander Correa

***Correspondencia:**

Vanessa Catalina Díaz Poveda;
Vanessa.diaz@cafedecolombia.com

Recibido: 4 de marzo de 2021

Aceptado: 8 de noviembre de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

Uno de los principales problemas de la agricultura en muchas regiones de Colombia es la acidez de los suelos. Específicamente en la zona cafetera del país una alta proporción de las muestras de suelos analizadas en las últimas tres décadas revela limitaciones debido a la acidez (Sadeghian, 2016). En estas condiciones se incrementa la solubilidad del aluminio intercambiable (Al^{3+}), disminuye la disponibilidad de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), y se reduce la solubilidad de fósforo (P) y la actividad de los microorganismos del suelo con consecuencias en el crecimiento de las plantas (Havlin, *et al.*, 2017; Raij, 2011; Zapata, 2014).

La acidez del suelo puede corregirse con la aplicación de cales (carbonatos, óxidos e hidróxidos de Ca y Mg) (Caires, 2010; Raij, 2011; Sousa, *et al.*, 2007). En este sentido, el requerimiento de cal se define como la cantidad de material de encalado necesario para cambiar el pH del suelo o el contenido de Al^{3+} a partir de la condición inicial hasta alcanzar el nivel óptimo para el crecimiento de la planta (McLean, 1982; Soil Science Society of America - SSSA, 2008).

Se han propuesto diversos procedimientos para estimar dichos requerimientos en diferentes tipos de suelos, pero no existe un consenso sobre el tema, bien sea porque se sobreestiman las cantidades necesarias o se subestiman (Pagani & Mallarino, 2011) dada la naturaleza propia de los suelos y su variabilidad en propiedades físicas y químicas, las cuales generan diferencias en el comportamiento de la acidez. Por ejemplo, el poder tampón, que puede incrementarse con el aumento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la materia orgánica del suelo, y las fuentes de la acidez que pueden ser de origen biogénico o antropogénico (Havlin, *et al.*, 2017; Zapata, 2004). Lo anterior ha sido corroborado por Sadeghian y Díaz-Marín (2020) para algunos de los suelos de la zona cafetera de Colombia. Así, para una misma región es posible encontrar el uso de diferentes métodos con el fin de alcanzar recomendaciones más precisas (Sims, 1996).

Algunas de las propuestas para estimar los requerimientos de cal de los suelos recurren a algoritmos basados en investigaciones de campo, en tanto que otras se sustentan en pruebas de laboratorio. En las primeras se emplean criterios como la neutralización de Al^{3+} (Kamprath, 1970), el porcentaje de saturación de bases (Cochrane, *et al.*, 1980; Raij, 1991), la neutralización de Al^{3+} y el incremento de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ (Álvarez & Ribeiro, 1999), y el aumento del pH, Ca^{2+} y Mg^{2+} en el caso del café (Sadeghian, 2008). Las técnicas de laboratorio, por su parte, incluyen el empleo de cales o reactivos alcalinizantes para elevar el pH hasta el valor deseado según las exigencias del cultivo. Tradicionalmente, en estas se han utilizado tres enfoques generales para determinar el requerimiento de cal: i) la incubación del suelo, ii) el uso de una solución tampón y, iii) la titulación directa con una base (Godsey, *et al.*, 2007). El método más ampliamente aceptado es el de incubación, ya que permite resultados más próximos a los obtenidos en los experimentos de campo (Viscarra & McBratney, 2001; Sims, 1996; Alley & Zelazny, 1987). De aquí que muchos investigadores consideren este método como el referente o patrón al evaluar las nuevas metodologías o modelos de estimación (Teixeira, *et al.*, 2020; McFarland, *et al.*, 2020). La incubación es un método semidestructivo en el que las condiciones del suelo determinan la cinética de reacción de la neutralización de la acidez. Consiste en la mezcla de dosis crecientes de cal con el suelo a capacidad de campo durante 30 a 60 días, tiempo después del cual se mide el pH o el Al^{3+} (Cabrales, *et al.*, 2018). La incubación, a pesar de ser el método ideal, resulta poco práctica debido al tiempo que se requiere, lo que ha impulsado la formulación de otras alternativas más prácticas.

En cuanto a los métodos basados en el uso de soluciones tampón propuestos por Woodruff (1948), Shoemaker, *et al.* (1961), Adams & Evans (1962), y Mehlich (1976), entre otros, aunque son más rápidos que la incubación, requieren el uso de reactivos como el p-nitrofenol, el cromo hexavalente y el bario, los cuales generan problemas de salud y seguridad, además de añadir costos para la disposición final de los residuos (Sikora, 2006). El método de titulación directa, por su parte, es destructivo y acelera el equilibrio a través

de la agitación de la muestra. Consiste en adicionar una solución de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) a la muestra de suelo mezclada con agua en una relación de 1:1, con lo que el equilibrio en el pH se logra aproximadamente en 30 min, es decir, el lapso en el que el valor del pH del suelo alcanza un valor constante (Liu, *et al.*, 2004, Kissel, *et al.*, 2007). El estudio de las titulaciones directas inició con Dunn (1943), quien con este método pronosticó el requerimiento de cal en suelos ácidos enfocándose en el tiempo de equilibrio de la reacción entre el suelo y la base, para el cual propuso 4 días. Sin embargo, el método seguía considerándose dispendioso en términos de tiempo, razón por la que se evaluó una titulación directa con 30 min como el intervalo de tiempo entre adiciones de la solución de Ca(OH)_2 (Liu, *et al.*, 2004). Desde entonces se han hecho estudios para medir aún más rápidamente el requerimiento de cal, incluso con una sola adición de Ca(OH)_2 (Liu, *et al.*, 2005), midiendo el pH inicial de la muestra y adicionando una sola cantidad de base; a partir de la curva de titulación obtenida, que se asume como lineal, se obtiene la cantidad de cal necesaria para elevar el pH a los valores requeridos. Entre los trabajos relacionados se pueden citar los de Aitken, *et al.* (1990) en Queensland (Australia), Alabi, *et al.* (1986) en Nebraska (Estados Unidos), Edmeades, *et al.* (1985) en Nueva Zelanda, Godsey, *et al.* (2007) en Kansas (EUA), Owusu-Bennoah, *et al.* (1995) en Ghana, Ssali, *et al.* (1981) en Kenya y Tunney, *et al.* (2010) en Irlanda.

En los últimos años se han desarrollado estudios en el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), con el fin de determinar los requerimientos de cal de suelos de la zona cafetera de Colombia con base en el método de incubación (Sadeghian, *et al.*, 2019; Sadeghian & Díaz-Marín, 2020). Sin embargo, este resulta ser un procedimiento largo y dispendioso, razón por la que en el presente trabajo se propuso evaluar el método de titulación directa con Ca(OH)_2 como alternativa más rápida a la incubación para determinar dichos requerimientos.

Materiales y métodos

Muestreo, preparación y caracterización de suelos

En 25 localidades con lotes sembrados de café en la zona cafetera de Colombia, seleccionados previamente por las condiciones de acidez del suelo ($\text{pH} < 5,5$), se tomaron muestras de aproximadamente 10 kg a 20 cm de profundidad que luego se llevaron a Cenicafé en el municipio de Manizales (Caldas).

Las muestras se secaron en estufa a 40 °C, se pasaron por un tamiz No. 10 (abertura de 2 mm) y luego se analizaron las siguientes propiedades físicas y químicas (Tabla 1): pH, materia orgánica, calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y sodio (Na^+), aluminio intercambiable (Al^{3+}), CIC, fósforo (P), azufre (S), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu) y boro (B), así como su textura: arcilla (Ar), limo (L) y arena (A).

Para determinar el requerimiento de cal por el método de titulación con Ca(OH)_2 , las muestras se secaron a 40 °C y se pasaron por el tamiz No. 10 (apertura de 2 mm). Con el método de incubación, el cual se consideró como patrón, las muestras se secaron al aire y se pasaron por una zaranda (apertura de 10 mm), con el fin de eliminar terrones grandes buscando que las muestras fueran lo más parecidas posibles a la realidad de campo.

Método de incubación con cal

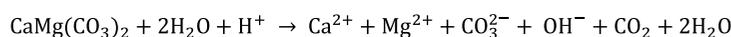
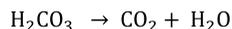
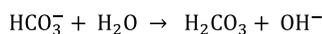
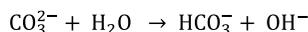
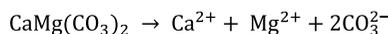
Se pesó un volumen de 0,184 dm³ (decímetro cúbico) de cada muestra de suelo y se trasladó a una matera plástica que luego se incubó durante 45 días con dosis equivalentes a 0,00; 1,25; 2,50; 5,00 y 10,00 g dm⁻³ de una cal dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) que contenía 34 % de CaO y 16 % de MgO, con un poder de neutralización de 102 %, una eficiencia granulométrica de 91 % y un poder relativo de neutralización total de 92 %. Las muestras se dispusieron por triplicado en el laboratorio de la Disciplina de Suelos de Cenicafé utilizando un diseño completamente aleatorio, y se regaron cada cuatro a cinco días con agua tipo II (conductividad < 1 $\mu\text{S cm}^{-1}$) para mantener la humedad a un 60 o 70 % de su máxima capacidad de retención. Al finalizar el tiempo de incubación, las muestras se secaron, se

Tabla 1. Propiedades químicas y textura de las muestras de suelo analizadas

Suelo	Departamento	Orden	pH ^a	N ^b	MO ^c	K ^d	Ca ^d	Mg ^d	Na ^d	Al ^e	CIC ^f	P ^g	S ^h	Fe ⁱ	Mn ⁱ	Zn ⁱ	Cu ⁱ	B ^h	Ar ^j	L ^j	A ^j	Textura
			%			cmol _c kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					%						
1	Meta	Entisol	4,0	0,26	5,8	0,23	0,39	0,17	0,02	2,9	18	12	15,0	515	13	1,3	7,0	0,10	36	27	36	FAr
2	Meta	Entisol	4,1	0,34	8,0	0,12	0,09	0,12	0,01	1,5	19	102	19,6	336	25	2,1	23,3	0,09	34	31	34	FAr
3	Meta	Entisol	4,0	0,22	4,7	0,20	0,38	0,16	0,01	3,0	18	3	24,0	475	21	1,0	2,6	0,13	40	28	32	FAr
4	Meta	Entisol	3,6	0,27	6,1	0,21	0,24	0,18	0,02	3,6	15	44	18,6	810	28	1,3	6,1	0,29	31	17	52	FArA
5	Meta	Entisol	3,7	0,27	6,2	0,15	0,15	0,12	0,02	4,6	18	15	15,1	1495	7	0,9	8,5	0,15	41	20	39	Ar
6	Meta	Entisol	3,8	0,21	4,6	0,19	0,21	0,12	0,01	3,4	14	64	14,6	497	24	1,4	4,4	0,56	33	22	45	FArA
7	Risaralda	Andisol	4,5	0,46	11,6	0,83	1,84	0,46	0,01	1,3	26	28	23,3	162	31	12,4	2,5	0,44	25	25	50	FArA
8	Risaralda	Inceptisol	4,5	0,17	3,6	0,25	1,56	0,58	0,03	3,9	18	2	18,7	86	122	1,2	6,0	0,00	55	34	11	Ar
9	Cauca	Andisol	4,6	0,70	21,6	0,27	1,69	0,47	0,04	1,6	39	12	5,5	758	22	6,3	4,3	0,34	24	35	41	F
10	Cauca	Andisol	5,3	0,58	16,2	0,58	5,71	2,24	0,04	0,3	33	12	4,8	168	22	8,8	5,5	0,49	28	31	41	FAr
11	Cauca	Andisol	4,8	0,66	19,4	0,27	1,00	0,30	0,03	1,4	39	12	3,0	149	14	4,1	4,8	0,33	26	32	42	F
12	Caldas	Andisol	4,3	0,46	11,6	0,07	0,22	0,09	0,05	1,2	26	30	20,0	165	9	2,7	5,9	0,35	21	27	52	FArA
13	Caldas	Andisol	4,6	0,46	11,8	0,09	0,16	0,07	0,04	1,0	26	36	16,8	183	7	2,9	26,0	0,39	20	29	51	F
14	Santander	Inceptisol	4,0	0,45	11,4	0,50	1,80	0,38	0,03	6,7	27	17	5,3	991	6	2,2	2,0	0,46	67	19	15	Ar
15	Santander	Molisol	5,2	0,21	4,6	0,16	4,17	0,81	0,06	0,2	12	9	5,3	358	108	2,7	2,1	0,39	19	23	59	FA
16	Santander	Inceptisol	4,5	0,34	8,2	0,16	1,39	0,15	0,06	2,5	19	6	3,0	704	4	2,4	1,7	0,42	44	25	30	Ar
17	Nariño	Andisol	5,2	0,38	9,3	0,54	1,60	0,35	0,06	1,1	19	14	4,3	159	16	2,2	8,9	0,49	20	24	56	FA
18	Huila	Inceptisol	4,8	0,29	6,7	0,43	1,13	0,49	0,01	1,1	10	43	5,4	244	22	2,6	1,0	0,44	13	18	69	FA
19	Huila	Inceptisol	4,6	0,28	6,4	1,07	4,69	1,58	0,03	1,6	22	28	9,2	409	17	5,7	4,0	0,42	31	26	43	FAr
20	Huila	Molisol	4,4	0,28	6,4	0,88	1,74	0,66	0,03	1,3	16	12	11,2	558	14	5,7	12,5	0,48	33	16	51	FArA
21	Huila	Inceptisol	4,7	0,32	7,6	0,25	2,73	1,85	0,08	0,9	19	4	11,2	396	38	3	5,5	0,07	49	20	30	Ar
22	Quindío	Andisol	5,1	0,28	6,4	0,25	2,07	0,44	0,03	0,5	18	24	16,3	135	9	2,7	3,2	0,18	13	22	65	FA
23	Quindío	Andisol	4,7	0,33	7,9	0,25	1,59	0,30	0,03	1,0	19	66	16,3	146	4	0,9	1,1	0,26	15	21	64	FA
24	Antioquia	Inceptisol	4,1	0,16	3,3	0,12	0,20	0,12	0,03	4,3	13	9	13,8	156	15	6,1	2,7	0,41	40	40	20	Ar
25	Antioquia	Andisol	4,2	0,47	12,1	0,16	0,07	0,16	0,02	4,0	28	3	18,3	559	7	2,2	2,1	0,50	54	22	24	Ar

^a Potenciométrico (H₂O, 1:1); ^b Calculado: %N=0,016 + 0,0453(%MO)-0,00063(%MO)²; ^c Materia orgánica según método Walkley-Black; ^d Ac. amonio 1,0 M pH=7,0 extractante; ^e KCl 1,0 M extractante; ^f Ac. amonio 1,0 M pH=7,0; ^g Bray II extractante; ^h Fosfato monocálcico extractante; ⁱ EDTA 0,01 M y Ac. amonio 1,0 M extractante; ^j Método de Bouyucos (Carrillo, 1985).

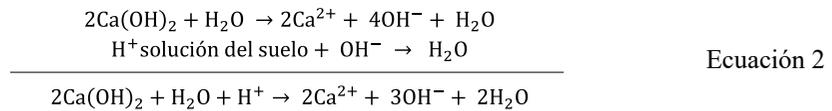
pesaron y se midió el pH. Con base en el volumen de las materas, el peso de suelo que ocupaba dicho volumen y la equivalencia de CaCO₃.MgCO₃ a CaCO₃, se hizo la conversión de unidades de dosis de dolomita en g dm⁻³ a CaCO₃ en g kg⁻¹ de suelo (**Anexo 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1405/3158>). La ecuación 1 describe las reacciones químicas que ocurren en el proceso de incubación y las especies formadas (Havlin, *et al.*, 2017; Espinosa & Molina, 1999):



Ecuación 1

Método de titulación directa con Ca(OH)₂

Haciendo el procedimiento por triplicado, se agregó una muestra de 25 g de cada suelo a un tubo plástico de polipropileno de 250 mL con tapa de rosca; posteriormente, se adicionaron 25 mL de agua tipo II. La mezcla se agitó durante 30 min en un agitador horizontal marca Bioblock Scientific a 150 mot1 min⁻¹ y se midió el pH; se adicionaron después los siguientes volúmenes de Ca(OH)₂ 0,02 M hasta alcanzar valores de pH superiores a 6,0: 2, 4, 8, 16, 32 y 64 mL. El intervalo de tiempo para cada adición de la solución de Ca(OH)₂ fue de 30 min; la suspensión del suelo se agitó constantemente durante la titulación y la medición del pH entre cada intervalo de tiempo, según lo descrito por Liu, *et al.* (2004). Según la concentración de la solución de Ca(OH)₂, las equivalencias de los pesos moleculares y el peso de suelo evaluado, se hizo la conversión de unidades de dosis de Ca(OH)₂ en mL g⁻¹ de suelo a CaCO₃ en g kg⁻¹ de suelo (**Anexo 2**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1405/3159>). La ecuación 2 describe la reacción química que ocurre en el proceso de titulación y las especies formadas (Havlin, *et al.*, 2017; Espinosa & Molina, 1999).



Análisis estadístico

Se evaluaron diferentes modelos de regresión para describir los cambios del pH con cada método de laboratorio en función de los tratamientos; para ello fue necesario expresar las dosis de dolomita y Ca(OH)₂ en unidades de CaCO₃ (g kg⁻¹ de suelo). Para el análisis de la bondad del ajuste y la selección de los mejores modelos, se utilizaron el coeficiente de determinación (R²) y su variante ajustada (R² aj) y la raíz del cuadrado medio del error (RCME) (Kaplan & Kemal, 2018).

Este procedimiento permitió seleccionar dos modelos: el lineal (y=a+bx) y el exponencial (y=a+b(1-e^{-cx})). Una vez obtenidas las ecuaciones para cada método y suelo, se estimaron las dosis necesarias para alcanzar el pH de 5,5, definido como óptimo para el cultivo de café en las condiciones de Colombia (Sadeghian, 2016). Posteriormente, se compararon los valores promedio de los dos métodos mediante la prueba *t* de Student (p<0,05) y se hizo un análisis de regresión múltiple con el fin de establecer la relación entre las diferencias de las dosis de CaCO₃ para alcanzar el pH 5,5 según los métodos evaluados y las propiedades químicas y la textura de las muestras de suelo evaluadas (**Tabla 1**). El grado de acuerdo entre el método de incubación y el método de titulación ajustado se midió mediante la prueba de Bland-Altman. Para el procesamiento estadístico se utilizaron los programas SigmaPlot 10.0 (2006), Statgraphics Centurion XV 15.2.14 (2007) y SAS 9.4 (TS1M5).

Resultados y discusión

En la **figura 1** se presentan los cambios del pH en respuesta a los tratamientos en cada uno de los suelos evaluados. En el método de incubación los incrementos del pH se ajustaron a la función exponencial creciente de la forma y=a+b(1-e^{-cx}), en la cual las tasas tienden a reducirse con el aumento de las dosis equivalentes de CaCO₃, en tanto que en el método de titulación los incrementos del pH por unidad de CaCO₃ suministrada fueron mayores y se ajustaron a la función lineal y=a+bx. Como se discutirá más adelante, este resultado se relaciona con la diferencia en la solubilidad y con la reactividad de la caliza dolomítica y el hidróxido de calcio. Como consecuencia, en el método de titulación se requirió de una menor cantidad de agente alcalinizante para alcanzar el pH de 5,5.

Con el propósito de ilustrar las variaciones entre los dos métodos evaluados con mayor detalle, a manera de ejemplo, en la **figura 2** se presentan los cambios del pH en función de las dosis equivalentes de CaCO₃ y las dosis requeridas para alcanzar el pH de 5,5 para la muestra de suelo 1.

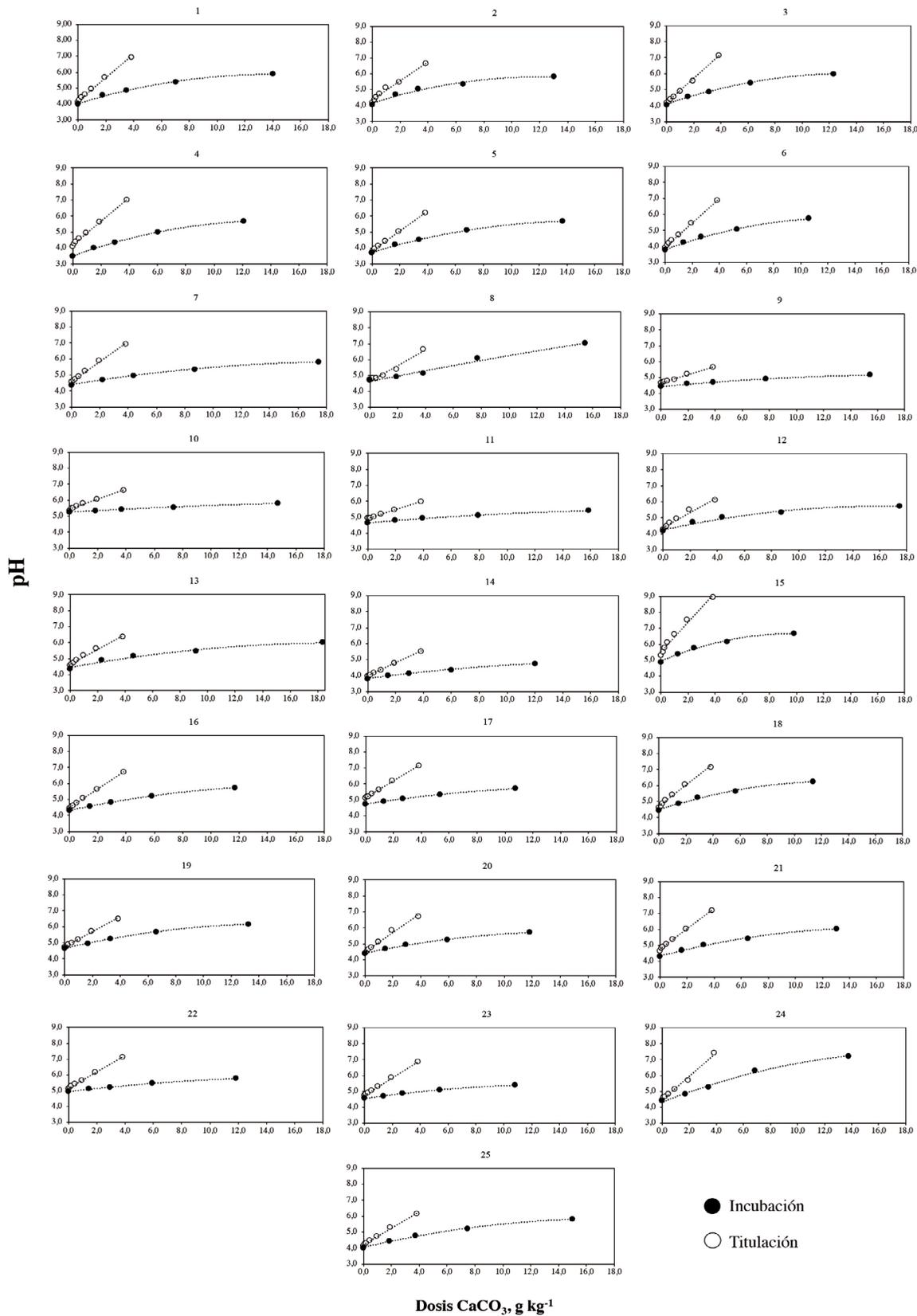


Figura 1. Cambios del pH del suelo en función de dosis equivalentes de CaCO_3 registrados en los métodos de titulación e incubación para 25 muestras de suelo de la zona cafetera de Colombia

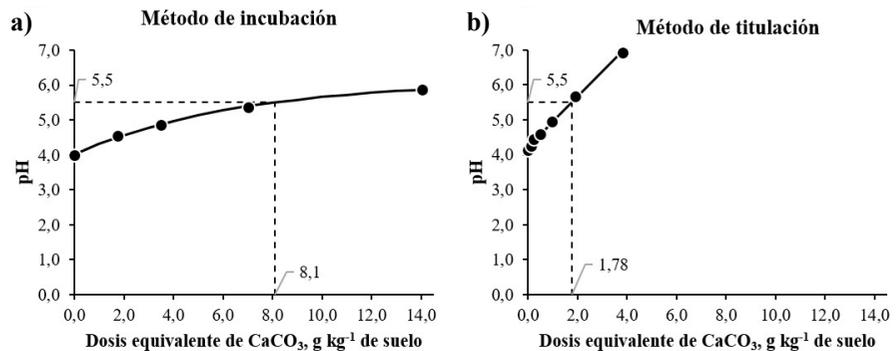


Figura 2. Cambios del pH del suelo en función de dosis equivalentes de CaCO_3 registrados en los métodos de incubación (a) y titulación (b) para la muestra de suelo 1

En las **tablas 2 y 3** se consignan las ecuaciones y los respectivos parámetros estadísticos que se tuvieron en cuenta como criterios de bondad de ajuste de los modelos seleccionados en cada uno de los métodos. Tanto los altos coeficientes de determinación (R^2) y de determinación ajustados (R^2_{aj}), como los menores valores de la raíz del cuadrado medio del error (RCME) y la significación de los parámetros de las ecuaciones ($p < 0,05$), muestran que los modelos exponencial y lineal presentaron buen ajuste y lograron describir adecuadamente los resultados de los métodos de incubación y titulación, respectivamente.

En el método de incubación el incremento del pH puede ocurrir de manera proporcional (lineal) (McFarland, *et al.*, 2020) o decreciente (exponencial asintótico); en este sentido, Sadeghian & Díaz-Marín (2020), Castro & Munévar (2013) y Castro, *et al.* (2006) reportaron para las condiciones de Colombia dos tendencias y relacionaron esta diferencia con las propiedades físicas y químicas de los suelos. Asimismo, Uchida & Hue (2000) y Bailey, *et al.* (1989) describieron en suelos de Hawaii y de Irlanda, respectivamente, respuestas en su mayoría exponenciales en las que, debido a las diferencias entre suelos, los primeros recomiendan preferiblemente determinar los requerimientos de cal para cada tipo de suelo. Por lo general, en las curvas de incubación las tasas del incremento del pH se reducen con el aumento de las dosis sin sobrepasar un pH de 7,0, ya que el material encalante, el cual suele ser cal agrícola, dolomita o una mezcla de ambas (Teixeira, *et al.*, 2020; Castro & Munévar, 2013), posee baja solubilidad y reduce sustancialmente su capacidad de reacción cuando el pH supera dicho valor. En este caso, el aumento de este parámetro está limitado por la velocidad a la que los hidrogeniones (H^+) se neutralicen, de modo que, para que continúe la reacción de disociación del carbonato (proceso en el que se da la formación a ácido carbónico), debe haber H^+ en la solución del suelo (ecuación 1) (Havlin, *et al.*, 2017; Espinosa & Molina, 1999).

En cuanto al método de titulación, se confirmó lo descrito por Magdoff & Bartlett (1985) y Weaver, *et al.* (2004) en cuanto a que las curvas de titulación son aproximadamente lineales en un rango de pH de 4,5 a 6,5. Por esta razón, en este método Liu, *et al.* (2004) y Liu, *et al.* (2005) sugieren una sola adición de hidróxido de calcio y un tiempo de reacción de 30 min para determinar los requerimientos de cal en suelos ácidos. Con este procedimiento se obtiene una ecuación lineal partiendo de un punto inicial (pH original del suelo) para llegar a un punto final con la adición de 3 mL $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Cabe aclarar que en estos trabajos se comparó el método de titulación directa con incubación aplicando una solución de hidróxido de calcio por 4 a 5 días, tiempo en el que el pH alcanzó estabilidad sin que se hiciera mezclado durante el proceso, lo que se denomina titulación con incubación.

En cuanto al tiempo requerido para las mediciones, en el método de incubación se necesitaron 50 días, en tanto que en el de titulación fueron necesarios 5 días. Cabe señalar que los períodos indicados tienen en cuenta el tiempo de preparación de la muestra, es decir, los procesos de secado y tamizado, así como la medición del pH posterior a la incubación en el método de incubación.

Tabla 2. Ecuaciones y estadísticos asociados con el modelo exponencial obtenidos para el método de incubación

Suelo	Ecuación	R ²	R ² aj	RCME
1	$\hat{y}=4,0125+2,1047(1-e^{-0,1514x})$	0,994	0,993	0,330
2	$\hat{y}=4,0957+1,7747(1-e^{-0,2195x})$	0,989	0,988	0,051
3	$\hat{y}=4,0744+2,3385(1-e^{-0,1413x})$	0,996	0,996	0,014
4	$\hat{y}=3,4942+2,7822(1-e^{-0,1258x})$	0,994	0,993	0,020
5	$\hat{y}=3,7133+2,3994(1-e^{-0,124x})$	0,990	0,989	0,020
6	$\hat{y}=3,775+2,5087(1-e^{-0,1405x})$	0,988	0,986	0,025
7	$\hat{y}=4,3832+1,7575(1-e^{-0,0945x})$	0,997	0,996	0,006
8	$\hat{y}=4,618+12,3193(1-e^{-0,0141x})$	0,980	0,977	0,117
9	$\hat{y}=4,4153+0,962(1-e^{-0,0924x})$	0,974	0,971	0,010
10	$\hat{y}=5,2522+1,0314(1-e^{-0,0518x})$	0,951	0,945	0,008
11	$\hat{y}=4,6448+1,0525(1-e^{-0,0787x})$	0,984	0,982	0,013
12	$\hat{y}=4,1807+1,6072(1-e^{-0,1607x})$	0,983	0,981	0,045
13	$\hat{y}=4,4048+1,8045(1-e^{-0,1088x})$	0,981	0,979	0,063
14	$\hat{y}=3,827+1,4534(1-e^{-0,0825x})$	0,968	0,964	0,009
15	$\hat{y}=4,907+1,9483(1-e^{-0,2285x})$	0,978	0,975	0,035
16	$\hat{y}=4,308+2,1449(1-e^{-0,0939x})$	0,959	0,954	0,007
17	$\hat{y}=4,7354+1,5004(1-e^{-0,0956x})$	0,983	0,981	0,012
18	$\hat{y}=4,4488+2,1767(1-e^{-0,1485x})$	0,996	0,995	0,031
19	$\hat{y}=4,6552+1,9316(1-e^{-0,1139x})$	0,992	0,991	0,012
20	$\hat{y}=4,4029+1,7188(1-e^{-0,1196x})$	0,989	0,987	0,020
21	$\hat{y}=4,3059+2,202(1-e^{-0,1159x})$	0,996	0,995	0,027
22	$\hat{y}=4,9458+1,2327(1-e^{-0,0916x})$	0,981	0,979	0,015
23	$\hat{y}=4,5475+1,2159(1-e^{-0,1087x})$	0,993	0,992	0,006
24	$\hat{y}=4,3207+4,4687(1-e^{-0,077x})$	0,988	0,986	0,089
25	$\hat{y}=4,0306+2,2512(1-e^{-0,1026x})$	0,994	0,993	0,024

Todos los parámetros del modelo fueron significativos ($p>0,05$), con excepción de a y b en el suelo 8 y b en el suelo 10.

Comparación de los métodos

Dado que los modelos matemáticos que explican las variaciones del pH en función de las dosis de CaCO_3 son diferentes, se puede afirmar que los métodos evaluados no son homogéneos o análogos. Es decir, que con el método de titulación no es posible obtener los mismos resultados que con el de incubación o, por lo menos, no de manera directa (**Tabla 4**). Lo anterior se pone de manifiesto en la diferencia significativa que presentaron los dos métodos objeto de estudio al estimar las dosis de cal necesarias para alcanzar un valor de pH igual a 5,5 (prueba t al 5 %). En las muestras de suelo 9 y 14 no fue posible determinar las dosis equivalentes de CaCO_3 requerida en el método de incubación, debido a que las curvas obtenidas no alcanzaron este valor de pH (**Figura 1**). En el caso de la muestra 15, usando el método de titulación no se necesitó adicionar cal para aumentar el pH, lo que se explicaría por su valor de pH cercano a 5,5. Como lo revelan estos resultados, el método de titulación subestimó los requerimientos de cal para neutralizar la acidez del suelo hasta alcanzar el nivel óptimo en el cultivo de café comparado con el método de referencia. Los hallazgos concuerdan con los reportes de **Godsey, et al.** (2007), quienes encontraron que las valoraciones por titulación generalmente subestiman, incluso cuando se deja un

Tabla 3. Ecuaciones y estadísticos asociados al modelo lineal obtenidos para el método de titulación

Suelo	Ecuación	R ²	R ² aj	RCME
1	$\hat{y}=4,2198+0,7184x$	0,996	0,995	0,056
2	$\hat{y}=4,3615+0,6037x$	0,979	0,977	0,113
3	$\hat{y}=4,1885+0,76x$	0,998	0,998	0,038
4	$\hat{y}=4,1817+0,7431x$	0,998	0,997	0,042
5	$\hat{y}=3,7853+0,632x$	0,997	0,997	0,044
6	$\hat{y}=3,974+0,7549x$	0,998	0,998	0,037
7	$\hat{y}=4,6099+0,6224x$	0,996	0,995	0,053
8	$\hat{y}=4,619+0,495x$	0,969	0,967	0,109
9	$\hat{y}=4,6471+0,2626x$	0,993	0,992	0,022
10	$\hat{y}=5,4545+0,3119x$	0,969	0,966	0,057
11	$\hat{y}=4,919+0,28x$	0,996	0,996	0,021
12	$\hat{y}=4,3799+0,4776x$	0,971	0,969	0,104
13	$\hat{y}=4,6371+0,4669x$	0,984	0,983	0,074
14	$\hat{y}=3,978+0,4047x$	0,997	0,997	0,019
15	$\hat{y}=5,5398+0,9274x$	0,972	0,969	0,177
16	$\hat{y}=4,4937+0,5832x$	0,998	0,997	0,025
17	$\hat{y}=5,1188+0,5296x$	0,997	0,997	0,023
18	$\hat{y}=4,7123+0,6572x$	0,991	0,991	0,075
19	$\hat{y}=4,7766+0,4654x$	0,993	0,992	0,040
20	$\hat{y}=4,4699+0,6125x$	0,979	0,978	0,096
21	$\hat{y}=4,7372+0,6435x$	0,997	0,997	0,040
22	$\hat{y}=5,1526+0,5155x$	0,999	0,999	0,019
23	$\hat{y}=4,7606+0,547x$	0,998	0,998	0,028
24	$\hat{y}=4,4361+0,7457x$	0,992	0,991	0,085
25	$\hat{y}=4,212+0,516x$	0,994	0,994	0,049

Todos los parámetros del modelo fueron significativos ($p>0,05$).

tiempo de equilibrio de siete días (**Baker & Chae, 1977**). Algunas de las discrepancias expuestas en los estudios se han explicado con el argumento de que los resultados son inherentes al tipo de suelo y que los métodos se han desarrollado para suelos de zonas específicas (**Godsey, et al., 2007**). En este sentido, **Bailey, et al. (1989)** y **Farhoodi & Coventry (2008)** concuerdan en que se debe discriminar la respuesta del material para encalado según el tipo de suelo, de allí la importancia de calibrar los requerimientos de cal con base en las características propias de los suelos locales o regionales (**Godsey, et al., 2007**). Se destaca que en este estudio se incluyeron muestras de suelo con propiedades físicas y químicas contrastantes procedentes de diversas áreas de la zona cafetera colombiana que tenían desde un pH muy ácido (3,6) hasta valores adecuados para el café (5,3); materia orgánica muy baja (3 %) y con niveles altos (22 %); Ca de 0,07 a 5,71 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$; Mg de 0,07 a 2,24 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$; K de 0,07 a 1,07 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$; Al^{3+} de 0,2 y 6,7 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$; CIC de 10 a 39 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$; P de 2 a 102 mg kg^{-1} ; S de 3 a 24 mg kg^{-1} ; Fe de 86 a 1495 mg kg^{-1} ; Mn de 4 a 122 mg kg^{-1} ; Zn de 0,9 a 12,4 mg kg^{-1} ; Cu de 1 a 26 mg kg^{-1} , y B de 0,09 a 0,56 mg kg^{-1} (**Tabla 1**). Dichas variaciones se relacionan tanto con el origen de los suelos como con su manejo. En cuanto al origen, se resalta la representación de los principales órdenes de la zona cafetera: Inceptisol (60,7 %), Andisol (17,6 %), Entisol (10,5 %) y Molisol (8 %) (**Federación Nacional de Cafeteros de Colombia - FNC & Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, 2017**).

Tabla 4. Dosis equivalentes de CaCO₃ estimadas con los métodos de incubación y titulación para alcanzar un valor de pH de 5,5

Suelo	Método	
	Incubación	Titulación
	$x=f(y :5,5)$	$x=f(y : 5,5)$
Dosis CaCO ₃ , g kg ⁻¹ suelo		
1	8,10	1,78
2	7,14	1,89
3	6,66	1,73
4	10,15	1,77
5	11,01	2,71
6	8,28	2,02
7	10,68	1,43
8	5,27	1,78
9	-	3,25
10	5,30	0,15
11	21,27	2,08
12	10,70	2,35
13	8,58	1,85
14	-	3,76
15	1,59	-0,04
16	8,64	1,73
17	7,45	0,72
18	4,44	1,20
19	5,05	1,55
20	8,50	1,68
21	6,74	1,19
22	6,52	0,67
23	14,07	1,35
24	3,98	1,43
25	10,31	2,50

Los resultados del estudio difieren de lo descrito por **Kissel, et al.** (2007), quienes proponen que el método de titulación se realice con dos mediciones de pH únicamente, una adición de hidróxido de calcio y un tiempo de equilibrio de 30 minutos. En este sentido, **Thompson, et al.** (2010) demostraron que el equilibrio en el pH del suelo después de la adición del hidróxido de calcio y de una agitación por 20 segundos se alcanzó después de 84 h. No obstante, con una relación calculada experimentalmente se recomienda la titulación en un tiempo de 30 minutos, tal como en el presente estudio. Además, se debe resaltar que en los trabajos de **Liu, et al.** (2004) y **Kissel, et al.** (2007) se empleó la prueba de incubación con una solución de Ca(OH)₂ por 3 a 5 días como estándar de comparación, en tanto que en este se empleó una incubación con cal dolomita por 45 días, lo que puede explicar parte de las diferencias encontradas.

Las variaciones en las dosis de cal entre el método de incubación y el de titulación pueden obedecer al tipo de material de encalado, la forma de aplicación y el tiempo de reacción. En el método de incubación se empleó dolomita incorporada en forma sólida a un

volumen de suelo, y la mezcla se mantuvo durante 45 días. En contraste, en el método de titulación se empleó una solución de hidróxido de calcio, la cual se adicionó a una mezcla de suelo y agua. En tanto que la cal dolomita reacciona en presencia de acidez y humedad y en el proceso se da formación a iones hidroxilo (OH⁻), los cuales causan el aumento del pH (ecuación 1), la solución de hidróxido de calcio ya los tiene disponibles, así que el aumento del pH se alcanza más rápidamente (ecuación 2). Vale la pena destacar, sin embargo, que en cada método se tuvo en cuenta el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio en el pH del suelo.

Es importante tener presente que la medición del pH en el método de titulación se efectuó a los 30 minutos de cada adición de la solución de Ca(OH)₂, en tanto que el procedimiento establecido para la medición de dicho parámetro en un análisis de suelos recomienda hacerlo pasada una hora.

Regresión múltiple

Debido a las diferencias significativas detectadas entre los valores promedio de los dos métodos, se buscó una expresión matemática que permitiera obtener una aproximación significativa a las dosis requeridas de cal a partir de los resultados logrados con cada método evaluado. Para ello se calculó la diferencia entre las dosis de CaCO₃ obtenidas con los dos métodos para alcanzar el valor de pH de 5,5. Posteriormente, se hizo una regresión múltiple que explicara estas diferencias en función de las propiedades medidas en el análisis de suelos (**Tabla 1**). El análisis de regresión múltiple generó una ecuación con la que se puede obtener un valor de corrección para el método de titulación con base en las propiedades químicas y la textura del suelo, el cual se debe sumar a la dosis determinada para el respectivo ajuste:

$$\hat{y} = 17,1184 + 7,81886MO - 217,177N + 0,0624708P + 7,50119K - 4,4739Mg + 0,203864S + 0,471334Al + 120,771Na - 0,0289981Mn - 0,131875Cu - 8,61187B - 0,265682L$$

La ecuación obtenida tiene un R² de 0,97 y R² ajustado de 0,94, con un marcado nivel de significación en todos los parámetros (p<0,05). A continuación se presenta un ejemplo de la aplicación de dicha ecuación para la muestra de suelo 1, en cuyo caso el requerimiento de cal por el método de titulación fue de 1,78 g CaCO₃ kg⁻¹ (**Tabla 4**). Los valores de las variables incluidas en la ecuación se encuentran en la **tabla 1**:

$$\hat{y} = 17,1184 + 7,81886*5,8 - 217,177*0,26 + 0,0624708*12 + 7,50119*0,23 - 4,4739*0,17 + 0,203864*15 + 0,471334*2,9 + 120,771*0,02 - 0,0289981*13 - 0,131875*7 - 8,61187*0,10 - 0,265682*27$$

$$\hat{y} = 5,22.$$

El resultado obtenido se suma a la dosis obtenida en el método de titulación. Así, la dosis necesaria para alcanzar un pH de 5,5 es igual a 1,78 g CaCO₃ kg⁻¹ + 5,22 g CaCO₃ kg⁻¹ = 7,00 g CaCO₃ kg⁻¹ de suelo.

Estos resultados corroboran lo descrito por **Teixeira, et al.** (2020) para estimar los requerimientos de cal. Para ello es necesario conocer algunas propiedades físicas y químicas de los suelos relacionadas con la resistencia al cambio de pH (capacidad de *buffer*). Entre las características de los suelos que han sido combinadas en modelos matemáticos para predecir los requerimientos se encuentran el pH y la materia orgánica (**Edmeades, et al.**, 1985), la CIC y el porcentaje de saturación de bases (**Quaggio, et al.**, 1985), el pH, el Al³⁺, las bases intercambiables y el carbono orgánico (**Hochman et al.**, 1995), el pH, la textura, el contenido de materia orgánica y la CIC (**Alatas, et al.**, 2005), la materia orgánica, el hierro extraíble y el contenido de arcillas (**Curtin & Trolove**, 2013) y el pH, la materia orgánica y el nivel de acidez potencial (**Teixeira, et al.**, 2020). En cuanto a la titulación con Ca(OH)₂, **Owusu-Bennoah, et al.** (1995) correlacionaron los requerimientos de cal con la materia orgánica, el Al³⁺ y el contenido de arcillas cuando el método se desarrolló en 72 horas. Así, se evidencia que la metodología evaluada puede ser efectiva para suelos de la

zona cafetera de Colombia, sin que necesariamente sea aplicable en otras regiones debido a las diferencias en las características de los suelos de cada zona, lo que es determinante en la forma de cambiar el pH de un suelo.

En la **figura 3** se observa la alta correlación entre las dosis de cal obtenidas en el método de incubación y las generadas con el de titulación una vez corregidas. Las muestras de suelo 9 y 14 no se incluyeron en el análisis dado que no alcanzaron valores de pH de 5,5, razón por la que el análisis se hizo con 23 muestras.

El grado de acuerdo entre los métodos, medido con la prueba de Bland-Altman, permitió obtener un diagrama de dispersión (**Figura 4**) que en el eje de las ordenadas presenta las diferencias entre los métodos de medición y en el eje de las abscisas, la media. Este análisis indica que el 95 % de las magnitudes de las diferencias entre los métodos se encontró dentro de un rango de diferencias de -1 y 1 dosis de CaCO_3 (g kg^{-1} suelo), lo cual indica que los dos métodos son consistentes, es decir, que pueden usarse indistintamente,

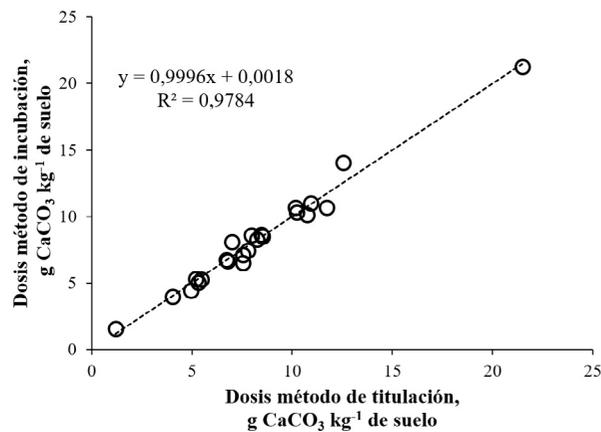


Figura 3. Requerimientos de CaCO_3 determinados por el método de titulación ajustado a través de la regresión múltiple en función de los requerimientos de cal obtenidos mediante el método de incubación (n=23)

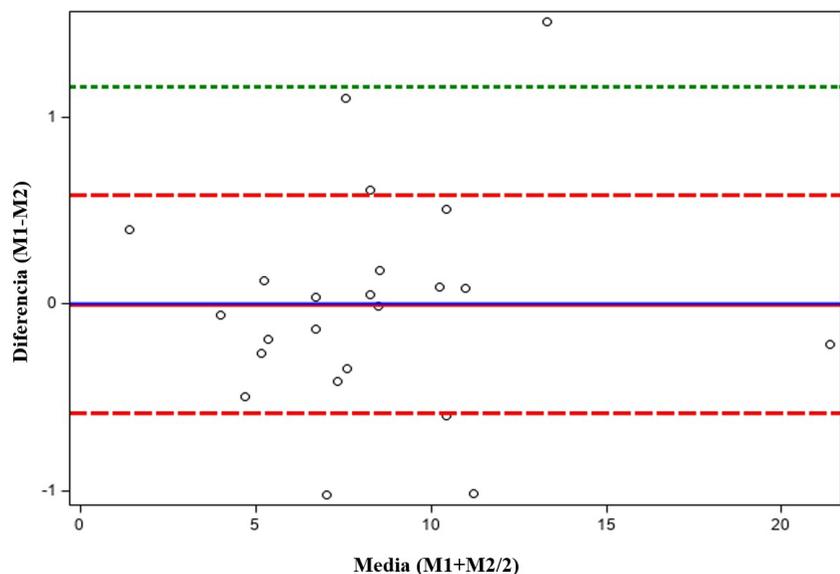


Figura 4. Análisis de concordancia de la diferencia entre el método de incubación (M1) y el método de titulación ajustado (M2) versus la media de las dos mediciones

dado que hay un nivel de discrepancia permitido en este tipo de determinaciones. Como resultado, el ajuste realizado al método de titulación lo equiparó con el método de incubación para determinar los requerimientos de cal en suelos con problemas de acidez en la zona cafetera colombiana.

Los resultados del estudio evidenciaron que el método de titulación para medir los requerimientos de cal puede emplearse en suelos de la zona cafetera colombiana si se hace un ajuste basado en la caracterización química y de la textura de las muestras. Se resalta que, como consecuencia de la naturaleza química de los suelos, el método de titulación pudo ajustarse mediante una expresión matemática.

Conclusiones

El método de titulación con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para determinar los requerimientos de cal fue más rápido que el de incubación con caliza dolomítica ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$); sin embargo, este método subestimó dichos requerimientos para los suelos de la zona cafetera de Colombia. Por ello, las dosis obtenidas con este método no pudieron aplicarse directamente para definir dichos requerimientos.

Se halló una ecuación que permitió aproximar los valores de tales requerimientos obtenidos con la titulación a aquellos calculados mediante la incubación. Esta ecuación explicó el 94 % de la variación total y contiene las siguientes propiedades químicas y físicas del suelo: materia orgánica, N, P, K, Mg, S, Al, Na, Mn, Cu, B y limos. El valor generado por esta expresión matemática correspondió a un factor de corrección que se debe sumar a los valores obtenidos con el método de titulación.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a los líderes departamentales de extensión de la Federación Nacional de Cafeteros, y en Cenicafe, al Dr. Rubén Darío Medina, líder de la disciplina de biometría, y a la señora Claudia Marcela Ospina, auxiliar de la disciplina de suelos.

Información suplementaria

Anexo 1. Conversión de unidades de dosis de dolomita en g dm^{-3} a CaCO_3 en g kg^{-1} de suelo. Ver anexo 1 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1405/3158>

Anexo 2. Conversión de unidades de dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en mL g^{-1} de suelo a CaCO_3 en g kg^{-1} de suelo. Ver anexo 2 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1405/3159>

Contribución de los autores

VCDP: seleccionó la metodología de titulación directa con hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) como alternativa frente al método de incubación, estandarizó los métodos, hizo los análisis de laboratorio, generó la base de datos y elaboró el manuscrito; SS: contribuyó con la idea de la investigación, seleccionó y obtuvo las muestras de suelos, participó en el análisis y discusión de los resultados y contribuyó en la revisión del documento.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Referencias

- Adams, F. & Evans, C.E. (1962). A rapid method for measuring lime requirement of red-yellow podzolic soils. *Soil Science Society of America Proceedings*. **26**: 355-357.
- Aitken, R. L., Moody, P. W., McKinley, P. G. (1990). Lime requirement of acidic Queensland soils. II. Comparison of laboratory methods for predicting lime requirement. *Soil research*. **28** (5): 703-715.

- Alabi, K. E., Sorensen, R. C., Knudsen, D., Rehm, G. W.** (1986). Comparison of several lime requirement methods on coarse-textured soils of Northeastern Nebraska. *Soil Science Society of America Journal*. **50** (4): 937-941.
- Alatas, J., Tsadilas, C.D., Sgouras, J.** (2005). Comparison of two methods of lime requirement determination. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. **36** (1-3): 183-190. Doi: 10.1081/CSS-200043028
- Alley, M.M. & Zelazny, L.W.** (1987). Soil acidity: Soil pH and lime needs. En: Brown, J.R., *Soil Testing: Sampling, Correlation, Calibration, and Interpretation*, Volume 21, pp. 65-72. Soil Science Society of America, Inc. Doi: 10.2136/sssaspecpub21.c7
- Álvarez, V.H. & Ribeiro, A.C.** (1999). Calagem. En: Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Álvarez V., V. H. (Ed.). *Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5a. Aproximação*. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 43-60.
- Baker, A.S. & Chae, Y.M.** (1977). A laboratory quick test for predicting lime requirement of acid mineral soils. *Tech. Bull. 88*. Washington Agric. Exp. Stn. Pullman. 1-11.
- Bailey, J.S., Stevens, D.J., Kilpatrick, J.** (1989). A rapid method for predicting the lime requirement of acidic temperate soils with widely varying organic matter contents. III. A lime-quality correction model. *Journal of Soil Science*. **40**: 831-847.
- Cabrales H., E. M, Velázquez H., C. M., Ayala C., J.** (2018). Determinación de la curva de requerimientos de cal para un alfisol bajo condiciones de vivero. Doi: 10.13140/RG.2.2.14825.13921
- Caires, E.** (2010). Manejo da acidez do solo. En: L. I. Prochnow, V. Casarin, S. R. Stipp (Eds.), *Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: Contexto mundial e práticas de suporte* (Vol. 1, pp. 277-347). International Plant Nutrition Institute.
- Carrillo, I.** (1985). *Manual de laboratorio de suelos*. Chinchiná: Centro Nacional de Investigaciones de Café.
- Castro, H. & Munévar, O.** (2013). Mejoramiento químico de suelos ácidos mediante el uso combinado de materiales encalantes. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. **16** (2): 409-416.
- Castro, H., Gómez, M., Munévar, O., Hernández, D.** (2006). Diagnóstico y control de la acidez en suelos sulfatados ácidos en el Distrito de riego del Alto Chicamocha (Boyacá) mediante pruebas de incubación. *Agronomía Colombiana*. **24** (1): 122-130.
- Cochrane, T., Salinas, J., Sánchez, P.** (1980). An equation for liming acid mineral soils to compensate crops aluminium tolerance. *Tropical Agriculture*. **57** (2): 133-140.
- Curtin, D. & Trolove, S.** (2013). Predicting pH buffering capacity of New Zealand soils from organic matter content and mineral characteristics. *Soil Res*. **51**: 494-502. Doi: 10.1071/SR13137
- Dunn, L. E.** (1943). Lime-requirement determination of soils by means of titration curves. *Soil Science*. **56**: 341-351.
- Edmeades, D. C., Wheeler, D. M., Waller, J. E.** (1985). Comparison of methods for determining lime requirements of New Zealand soils. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. **28** (1): 93-100.
- Espinosa, J. & Molina, E.** (1999). Acidez y encalado de los suelos. *Inpofos*. **1-5**: 29-30.
- Farhoodi, A. & Coventry, D.R.** (2008). Field crop responses to lime in the mid-north region of South Australia. *Field Crops Research*. **108**: 45-53.
- Godsey, C. B., Pierzynski, G. M., Mengel, D. B., Lamond, R.E.** (2007). Evaluation of common lime requirement methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **71**: 843-850. Doi: 10.2136/sssaj2006.0121
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Instituto Geográfico Agustín Codazzi.** (2017). *Atlas cafetero de Colombia*. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá, 65-254.
- Havlin, J., Tisdale, S., Nelson, J., Beaton, J.** (2017). *Soil fertility and fertilizers, an introduction to nutrient management*, (8th edition). Pearson Prentice Hall. 35, 68-71, 81.
- Hochman, Z., Crocker, G.J., Dettman, E.B.** (1995). Predicting lime-induced changes in soil-pH from exchangeable aluminum, soil-pH, total exchangeable cations and organic-carbon values measured on unlimed soils. *Soil Res*. **33**: 31-41. Doi: 10.1071/SR9950031
- Kamprath, E. J.** (1970). Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils 1. *Soil Science Society of America Journal*. **34** (2): 252-254.
- Kaplan, S. & Kemal G., E.** (2018). Comparison of growth curves using non-linear regression function in Japanese quail. *Journal of Applied Animal Research*. **46** (1): 112-117. Doi: 10.1080/09712119.2016.1268965
- Kissel, D. E., Isaac, R. A., Hitchcock, L. S., Sonon, L. S. Venderll, P. F.** (2007). Implementation of soil lime requirement by a single-addition titration method. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **38**: 1341-1352. Doi: 10.1080/00103620701328735

- Liu, M., Kissel, D. E., Vendrel, P.F., Cabrera, M. L.** (2004). Soil lime requirement by direct titration with calcium hydroxide. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **68**: 1228-1233. Doi: 10.2136/sssaj2004.1228
- Liu, M., Kissel, D. E., Cabrera, M.L., Vendrell, P. F.** (2005). Soil lime requirement by direct titration with a single addition of calcium hydroxide. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **69**: 522-530. Doi: 10.2136/sssaj2004.1228
- Magdoff, F.R. & Bartlett, R.J.** (1985). Soil pH buffering revisited. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **49**: 145-148. Doi: 10.2136/sssaj1985.03615995004900010029x
- McFarland, C.; Shiwakoti, S.; Carpenter-Boggs, L.; Schroeder, K.; Brown, T., Huggins, D.** (2020). Evaluating buffer methods for determining lime requirement on acidified agricultural soils of the Palouse. *Soil Science Society of American Journal.* **84**: 1769-1781.
- McLean, E.O.** (1982). Soil pH and lime requirement. In: *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties* 2nd edition. Page AL ed., Am. Soc. Agronomy. Soil Sci. Soc. Am. 199-224.
- Mehlich, A.** (1976). New buffer pH method for rapid estimation of exchangeable acidity and lime requirement of soils. *Commun. in Soil Science and Plant Analysis.* **7** (7): 637-652. Doi: 10.1080/00103627609366673
- Owusu-Bennoah, E., Acquaye, D.K., Mahamah, T.** (1995). Comparative study of selected lime requirement methods for some acid Ghanaian soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* **26** (7-8): 937-950. Doi: 10.1080/00103629509369346
- Pagani, A. & Mallarino, A. P.** (2011). Comparison of methods to determine crop lime requirement under field conditions, *Soil Sci. Soc. Am. J.* **76**: 1855-1866. Doi: 10.2136/sssaj2011.0327
- Quaggio, J.A., van Raij, B., Malavolta, E.** (1985). Alternative use of the SMP-buffer solution to determine lime requirement of soils. *Commun Soil Sci Plan.* **16**: 245-60. Doi: 10.1080/00103628509367600
- Raij, B. van.** (1991). *Fertilidade do solo e adubacao. Potafos*, 343.
- Raij, B. van.** (2011). *Acidez e calagem. En: Fertilidade do solo e Manejo de nutrientes.* IPNI. Piracicaba. 1-420.
- Sadeghian, S.** (2008). Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. *Boletín Técnico Cenicafé.* **32**: 14-15.
- Sadeghian, S.** (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 466.
- Sadeghian K., S.; Alarcón T., V. F., Díaz-Poveda, V.C., Lince S., L. A., Rey S., J.C.** (2019). Fertilidad del suelo y manejo de la nutrición. En *Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (Ed.), Aplicación de ciencia, tecnología e innovación en el cultivo de café ajustado a las condiciones particulares del Huila*, (pp. 80-105). Cenicafé.
- Sadeghian K., S., Díaz-Marín, C.** (2020). Corrección de la acidez del suelo: alteraciones químicas del suelo. *Revista Cenicafé.* **71** (1): 7-20. Doi: 10.38141/10778/1116
- SAS Institute Inc.** (2017). SAS, Cary, North Carolina, USA.
- Shoemaker, H. E., McLean, E. O., Pratt, P. F.** (1961). Buffer methods for determination of lime requirements of soils with appreciable amounts of exchangeable aluminum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **25**: 274-277.
- Systat Software Inc.** (2006). Sigma Plot 10.0, Systat Software Inc., CA, USA.
- Sikora, F.J.** (2006). A buffer that mimics the SMP buffer for determining lime requirement of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **70**: 474-486. Doi: 10.2136/sssaj2005.0164
- Sims, J.T.** (1996). Lime requirement. En: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., Sumner, M.E., *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5.3, Soil Science Society of America, Inc. Doi: 10.2136/sssabookser5.3.c17
- Soil Science Society of America.** (2008). *Glossary of Soil Science Terms.* Soil Science Society of America, Madison.
- Sousa, D.M., Miranda, L.N., Oliveira, S.A.** (2007). Acidez do solo e sua correção. En: Novais, R.F., Alvarez V., V.H., Barros, N.F., Fontes, R.L., Cantarutti, R.B., Neves, J.C., eds. *Fertilidade do solo.* Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 206-274.
- Ssali, H. & Nuwamanya, J. K.** (1981). Buffer pH methods for estimation of lime requirement of tropical acid soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* **12** (7): 643-659.
- StatPoint Technologies. Inc.** (2007). *Statgraphics Centurion, X.V. Version 15.2.14; Software for Technical Computation.* StatPoint Technologies. Inc., Warrenton, VA, USA.

- Teixeira, W.G., Alvarez V., V.H., Lima, J.C.** (2020). New methods for estimating lime requirement to attain desirable pH values in Brazilian soils. *Rev Bras Cienc Solo*. **44**: e0200008. Doi: 10.36783/18069657rbcs20200008
- Thompson, J.S., Kissel, D.E., Cabrera, M.L., Sonon, L.S.** (2010). Equilibration Reaction from Single Addition of Base to Determine Soil Lime Requirement. *Soil Science Society of America Journal*. **74** (2): 663-669. Doi: 10.2136/sssaj2009.0168
- Tunney, H., Sikora, F. J., Kissel, D., Wolf, A., Sonon, L., Goulding, K.** (2010). A comparison of lime requirements by five methods on grassland mineral soils in Ireland. *Soil use and management*. **26** (2): 126-132.
- Viscarra R. & McBratney, A.B.** (2001). A response-surface calibration model for rapid and versatile site-specific lime-requirement predictions in south-eastern Australia. *Australian Journal of Soil Research*. **39** (1): 185-201. Doi: 10.1071/SR99131
- Uchida, R. & Hue, N.V.** (2000). Soil acidity and liming. En: Silva, J.A., Uchida, R. *Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils, Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture*. College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa. p. 101-111.
- Weaver, A.R., Kissel, D.E., Chen, F., West, L.T., Adkins, W., Rickman, D., Luvall, J.C.** (2004). Mapping soil pH buffering capacity of selected fields in the Coastal. *Plain. Soil Sci. Soc. Am. J.* **68**: 662-668. Doi: 10.2136/sssaj2004.6620
- Woodruff, C.M.** (1948). Testing Soils for Lime requirement by means of a buffered solution and the glass electrode. *Soil Science*. **66**: 53-63.
- Zapata, R.** (2004). *Química de la acidez del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. p. 43-55.
- Zapata, R.** (2014). *Los procesos químicos del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. p. 440-449.