

Comparación de Métodos para Obtener la Capacidad de Intercambio Catiónico y Cationes Intercambiables de los Suelos Methods Comparison for Cation Exchange Capacity and Exchangeable Cations of Soils

José Francisco Preciado-Guzmán¹ , Edmundo Robledo-Santoyo^{1†} , Joel Pineda-Pineda¹ ,
Langen Corlay-Chee¹ , Antonio Vázquez-Alarcón¹ y Mateo Vargas-Hernández¹

¹ Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. Carretera México-Texcoco km 38.5 Chapingo. 56230, Texcoco, Estado de México, México; (J.F.P.G.), (E.R.S.), (J.P.P.), (L.C.C.), (A.V.A.), (M.V.H.).

† Autor para correspondencia: erobledo@correo.chapingo.mx

RESUMEN

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es una de las propiedades más importantes al evaluar la fertilidad del suelo. El método más usado es mediante acetato de amonio 1 N, pH 7.0; sin embargo, este método presenta errores durante la determinación. Se compararon varios métodos para medir la CIC: acetato de amonio (NH₄OAc) 1 N pH 7.0, acetato de sodio (NaOAc) 1 N pH 8.2, sumatoria de cationes extraídos con NH₄OAc 1 N a pH 7.0 (CICE), cloruro de bario (BaCl₂) 0.01 M y tiourea de plata (AgTU) 0.01 M. Los suelos analizados tenían características variables en pH, textura, materia orgánica y carbonatos. Los mayores valores de CIC se obtuvieron con la sumatoria de cationes, seguidos por acetato de amonio y tiourea de plata. El método de acetato de sodio presentó valores intermedios debido a los errores del método. Hubo asociación entre la CIC mediante AgTU y NH₄OAc a diferencia de CICE y NH₄OAc; el costo de determinación con NH₄OAc superó en ocho al de AgTU. Los cationes Mg²⁺, K⁺ y Na⁺ extraídos mediante cloruro de bario, acetato de amonio y acetato de sodio presentaron alta asociación; sin embargo, no hubo relación entre K⁺ y Na⁺ extraídos con NH₄OAc y AgTU. El calcio fue el catión que más se sobreestimó, seguido del magnesio y potasio extraído con NH₄OAc 1 N a pH 7.0, donde la sobreestimación varió de 10 a 498 veces con relación al que originalmente está en los sitios de intercambio, mientras que el magnesio y potasio se sobreestimaron de 11.2 a 141.7 y de 3.7 a 33.3 veces, respectivamente. El método de AgTU fue la mejor alternativa para determinar la CIC, ya que es rápido, de bajo costo, minimiza errores y es aplicable a suelos con diferentes características de pH, textura, materia orgánica y contenido de carbonatos.

Palabras clave: acetato de amonio, calcio, CIC, tiourea de plata.

SUMMARY

Cationic exchange capacity (CIC) is one of the most important properties when assessing soil fertility. The most commonly used method is by ammonium acetate 1 N, pH 7.0; however, this method presents errors during determination. Several methods to measure CEC were compared: ammonium acetate (NH₄OAc) 1 N pH 7.0, sodium acetate (NaOAc) 1 N pH 8.2, sum of cations extracted with NH₄OAc 1 N at pH 7.0 (CICE), barium chloride (BaCl₂) 0.01 M and silver-thiourea (AgTU) 0.01 M. The soils analyzed had variable characteristics in pH, texture, organic matter and carbonates. The highest CIC values were obtained with the sum of cations, followed by ammonium acetate and silver thiourea. The sodium acetate method presented intermediate values due to errors in the method. There was an association between CIC through AgTU and NH₄OAc as opposed to CICE and NH₄OAc; the cost of determination with NH₄OAc was eight times higher than that of AgTU. The Mg²⁺, K⁺



Cita recomendada:

Preciado-Guzmán, J. F., Robledo-Santoyo, E., Pineda-Pineda, J., Corlay-Chee, L., Vázquez-Alarcón, A., & Vargas-Hernández, M. (2024). Comparación de Métodos para Obtener la Capacidad de Intercambio Catiónico y Cationes Intercambiables de los Suelos. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-18. e1843. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1843>

Recibido: 14 de noviembre de 2023.

Aceptado: 28 de febrero de 2024.

Artículo. Volumen 42.

Mayo de 2024.

Editor de Sección:

Dr. Fabián Fernández Luqueño

Editor Técnico:

Dr. Marco Antonio Camacho Escobar



Copyright: © 2024 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

and Na⁺ cations extracted by barium chloride, ammonium acetate and sodium acetate were highly associated; however, there was no relationship between K⁺ and Na⁺ extracted with NH₄OAc and AgTU. Calcium was the cation that was most overestimated, followed by magnesium and potassium extracted with NH₄OAc 1 N at pH 7.0, where the overestimation varied from 10 to 498 times in relation to that originally at the exchange sites, while magnesium and potassium were overestimated from 11.2 to 141.7 and from 3.7 to 33.3 times, respectively. The AgTU method was the best alternative to determine CEC, as it is fast, low-cost, minimizes errors, and is applicable to soils with different characteristics of pH, texture, organic matter, and carbonate content.

Index words: ammonium acetate, calcium, CIC, silver-thiourea.

INTRODUCCIÓN

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), es una de las propiedades más importantes de los suelos ya que los cationes intercambiables influyen en las características físicas, químicas y biológicas del suelo (Fassbender, 1975). El resultado numérico de la determinación sirve además como base en el cálculo del porcentaje de saturación de bases, que es un dato ampliamente usado en los estudios pedológicos y de fertilidad NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Uno de los métodos usuales para determinar la CIC es mediante la sumatoria de cationes, en el cual se hace una estimación muy aproximada a través de la extracción con cationes de cambio mediante el uso de acetato de amonio 1 N a pH 7.0 para suelos neutros y alcalinos, la cual solo es una estimación de la determinación más precisa en laboratorio (Bower, Reitmeier y Fireman, 1952). La extracción de cationes se lleva a cabo a partir del desplazamiento de los cationes intercambiables y saturación de la muestra con un catión índice, lavado de la solución saturante que se queda impregnado en el suelo, desplazamiento del catión índice adsorbido y cuantificación del catión índice desplazado (Aguilar, Etchevers y Castellanos, 1987).

Sumner y Davidtz (1965) y Gillman y Bell (1976) indican que la CIC de los suelos es dependiente del método para determinarla, debido a que, en los suelos con carga variable, cualquier cambio de pH o en la concentración iónica de electrolitos, tiene efectos en la CIC. Es importante indicar que, en los suelos con alto contenido de carbonato de calcio, la determinación de la CIC, mediante el uso de acetato de amonio 1 N pH 7.0 es sobrestimada, debido a la disolución que se produce de los carbonatos liberando más Ca y Mg del que realmente está en la fase de cambio, situación que se resuelve con la extracción mediante acetato de sodio a pH 8.2 (Bower *et al.*, 1952). El problema de usar acetato de sodio u otro extractante como KCl, es que se debería hacer otra extracción para cuantificar el sodio intercambiable o el potasio intercambiable (Castellanos, Uvalle y Aguilar, 2000). Para evaluar la solubilización de cationes se introduce el concepto de capacidad de intercambio catiónico efectiva ajustada (CICEaj), tomando en cuenta la suma de cationes extraídos con acetato de amonio 1 N pH 7.0 y restando los cationes solubles (Cs), dejando por consecuencias sólo los cationes intercambiables (CI).

Uno de los métodos para determinar la CIC y bases intercambiables (potasio, calcio, magnesio, sodio) de los suelos ácidos y calcáreos es empleando tiourea de plata (AgTU) 0.01 M como solución saturante, debido a la afinidad de este reactivo por las cargas negativas de las partículas del suelo, lo cual permite una completa saturación, aun cuando el suelo contenga relativamente altas concentraciones de otras sales (SEMARNAT, 2002). Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue determinar la capacidad de intercambio catiónico y los cationes intercambiables de los suelos mediante diferentes métodos, comparar su eficiencia, evaluar sus ventajas económicas y calcular la sobreestimación de calcio, magnesio y potasio en suelos con características diferentes de pH, textura, materia orgánica y contenidos de carbonato de calcio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron treinta muestras de suelo con características variables en materia orgánica (Walkley Black), CaCO₃ (Newson & Horton) textura (Bouyoucos) y pH (potenciométrico en relación agua: suelo 2:1) (Cuadro 1); de las cuales 10 muestras tenían pH ácido, 10 con pH neutro y 10 con pH alcalino. El trabajo se condujo en el Laboratorio de Análisis Químico ubicado en el Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH).

Cuadro 1. Características físico - químicas de los suelos utilizados en el experimento.
Table 1. Soil physical and chemical characteristics used in the experiment.

No.	pH	M.O.	CaCO ₃	Arcilla	Limo	Arena	Clase Textural
----- % -----							
1	4.64	4.45	ND	13.08	10.90	76.02	Arenoso franco
2	4.75	3.99	ND	13.44	31.76	54.80	Franco Arenoso
3	5.00	1.61	ND	43.60	23.98	32.42	Arcilloso
4	5.18	3.22	ND	6.54	28.34	65.12	Franco Arenoso
5	5.30	2.06	ND	30.52	26.16	43.32	Franco Arcilloso
6	5.39	6.59	ND	41.42	28.34	30.24	Arcilloso
7	5.40	1.68	ND	45.78	21.80	32.42	Arcilloso
8	5.51	5.64	ND	10.90	19.62	69.48	Franco Arenoso
9	5.54	2.32	ND	39.24	28.34	32.42	Franco Arcilloso
10	5.56	1.35	ND	17.44	30.52	52.04	Franco Arenoso
11	6.82	0.39	ND	4.32	10.80	84.88	Arenoso franco
12	6.91	2.77	ND	32.40	38.88	28.72	Franco Arcilloso
13	7.04	6.91	ND	34.88	32.70	32.42	Franco Arcilloso
14	7.04	1.68	ND	8.72	32.70	58.58	Franco Arenoso
15	7.04	1.87	ND	23.98	47.96	28.06	Franco
16	7.09	1.29	ND	37.06	32.70	30.24	Franco Arcilloso
17	7.27	0.52	ND	2.16	15.12	82.72	Arenoso franco
18	7.28	0.90	ND	2.18	32.70	65.12	Franco Arenoso
19	7.32	6.49	ND	36.72	38.88	24.40	Franco Arcilloso
20	7.65	2.19	ND	17.28	64.80	17.92	Franco Limoso
21	7.96	7.66	ND	23.76	43.20	33.04	Franco
22	8.24	1.10	0.44	17.44	19.62	62.94	Franco Arenoso
23	8.30	0.19	0.66	2.16	45.36	52.48	Franco Arenoso
24	8.39	0.64	3.08	2.16	19.44	78.40	Arenoso franco
25	8.40	2.13	0.64	10.80	45.36	43.84	Franco
26	8.56	0.26	0.32	2.16	28.08	69.76	Arenoso franco
27	8.69	1.93	8.99	SD	SD	SD	SD
28	8.70	0.39	1.21	2.16	34.56	63.28	Franco Arenoso
29	8.99	0.19	0.69	12.96	43.20	43.84	Franco
30	9.11	0.13	0.41	2.16	43.20	54.64	Franco Arenoso

SD = sin dato; M.O = materia orgánica; ND = no detectado.
SD = no data, M.O = organic matter; ND = not detected.

Los métodos empleados para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico fueron: a) acetato de amonio (NH_4OAc) 1 N pH 7.0, lavado con etanol y extracción con NaCl 10 %; b) acetato de sodio (NaOAc) 1 N pH 8.2, lavado con etanol y extracción con NH_4OAc 1 N pH 7.0 (Bower *et al.*, 1952); c) cloruro de bario (BaCl_2) 0.01 M, desplazado con sulfato de magnesio 0.005 M y ajustando la concentración con una solución de referencia de sulfato de magnesio 0.0015 M para hacerla equivalente a la fuerza iónica de la solución del suelo mediante la adición de sulfato de magnesio 0.005M o de agua destilada (Guillman y Bakker, 1979); d) método de la CIC efectiva (CICE), extracción con NH_4OAc 1 N pH 7.0, aforando la solución resultante en matraces volumétricos de 100 mL y determinando calcio y magnesio por espectrofotometría de absorción atómica (GBC* XPLORAA DUAL), sodio y potasio mediante espectrofotometría de emisión de flama (CORNING 410), y aluminio (Al^{3+}) mediante extracción con KCl y titulación con NaOH ; y e) tiourea de plata (AgTU) 0.01 M (Chhabra, Pleysier y Cremers, 1975¹).

El método para la extracción de los cationes fue en acetato de amonio 1 N pH 7.0, acetato de sodio 1 N pH 8.2, cloruro de bario 0.01 M (relación suelo - solución 1:10), tiourea de plata 0.01 M. Los cationes solubles (Cs) se cuantificaron mediante pasta de saturación (Bower y Wilcox, 1965). De acuerdo con Rhoades (1982), este punto de saturación es generalmente reproducible con una precisión del ± 5 %. Los cationes intercambiables ajustados (CI aj), se estimaron restando los Cs a los cationes extraídos mediante NH_4OAc 1 N pH 7.0. La capacidad de intercambio catiónico efectiva ajustada (CICEaj) fue el resultado de la suma de los cationes extraídos mediante NH_4OAc 1 N pH 7.0, restando los cationes solubles (Cs), como se muestra a continuación:

$$\text{CICEaj} = \text{CICE} - \text{Cs} \quad (1)$$

Los valores obtenidos en laboratorio de los diferentes métodos empleados para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico se sometieron a prueba de análisis de la varianza, pruebas de comparación de medias (Tukey $P \leq 0.05$) y correlaciones entre métodos utilizando el software SAS v9.4 (SAS Institute, 2016); además, se realizó una comparación de los costos de determinación de la CIC por el método del acetato de amonio 1 N pH 7.0 y el método de la tiourea de plata 0.01 M, tomando en cuenta los precios de los reactivos de distribuidores autorizados 2024.

Para afrontar la problemática de la solubilización de partículas de carbonato de calcio en los suelos por la solución saturante de NH_4OAc (Rhoades, 1982b; Henríquez, Pérez, Gascó y Rodríguez, 2005), se analizaron 25 muestras de suelo con contenido de carbonato de calcio variable, el cual se determinó por el método de Horton y Newson (1953) y basándose en la extracción de Bower *et al.* (1952) al resolver la disolución de partículas de carbonato de calcio al extraer mediante NaOAc a pH 8.2, se determinaron los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) en NH_4OAc 1 N pH 7.0 y NH_4OAc 1 N con modificación interna a pH 10. Por diferencia entre extracción de métodos, se obtuvo el Ca^{2+} sobreestimado, el cual se correlacionó con los contenidos de carbonato de calcio. Los contenidos de Mg^{2+} y K^+ entre ambos métodos se sometieron a correlaciones utilizando el software SAS v9.4 (SAS Institute, 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras de suelo presentaron valores de pH entre 4.64 a 9.10. Los valores de la capacidad de extracción de cationes (CEC) se presentan en los Cuadros 2, 3, 4 y 5. En suelos ácidos, neutros y alcalinos, el calcio extraído mediante NH_4OAc 1 N, pH 7.0 fue similar al obtenido mediante BaCl_2 0.01 M y NaOAc 1 N pH 8.2, pero menor al extraído con AgTU 0.01 M, lo que sugiere que este último tiene una capacidad de extraer más calcio que los otros métodos.

Por otra parte, en todos los casos, la AgTU 0.01 M mostró extracciones de Mg^{2+} y K^+ (Cuadros 3 y 5) similares a los obtenidos con NH_4OAc 1 N pH 7.0, NaOAc 1 N pH 8.2 y BaCl_2 0.01 M; sin embargo, en suelos ácidos, neutros y alcalinos (Cuadro 4) la extracción de Na^+ con AgTU 0.01 M fue mayor a la obtenida con NH_4OAc 1 N pH 7.0 y BaCl_2 0.01 M. En suelos alcalinos la extracción de Mg^{2+} , Na^+ y K^+ (Cuadros 3, 4 y 5) con los métodos de NH_4OAc 1 N pH 7.0, NaOAc 1 N pH 8.2 y AgTU 0.01M fue similar, mientras que el NaOAc 1 N pH 8.2, mostró menor extracción de Ca^{2+} (Cuadro 2) que el NH_4OAc 1 N pH 7.0 y AgTU 0.01 M, lo que puede atribuirse a la poca disolución de carbonatos presentes en el suelo (Bower *et al.*, 1952), mostrando semejanza en la extracción de los cationes Mg^{2+} y K^+ con el método de NH_4OAc 1 N pH 7.0 y solo Mg^{2+} con la AgTU 0.01 M, la cual extrajo menor K^+ que los demás métodos. En los suelos neutros y alcalinos, los CI fueron similares a los cationes extraídos mediante NH_4OAc 1 N pH 7.0, donde los Cs no explicaron las cantidades solubilizadas de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ . Estos resultados indican que la pasta de saturación solubiliza menor cantidad de cationes que la solución saturante de NH_4OAc 1 N pH 7.0 durante la extracción.

¹ Chhabra, R., Pleysier, J. L., & Cremers, A. (1975). The measurement of the cation exchange capacity and exchangeable cations in soils: A new method. Proceedings of International. In S. W. Bailey (Ed.). *Proceedings of the International Clay Conference* (pp. 439-449) USA: Applied Publishing Ltd.

Cuadro 2. Calcio extraído en los suelos con diferentes métodos: acetato de amonio 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), tiourea de plata 0.01 M (AgTU), cloruro de bario 0.01 M (BaCl₂), acetato de sodio 1 N pH 8.2 (NaOAc) y cationes intercambiables ajustados (Cl aj).
Table 2. Calcium extracted in soils with different methods: ammonium acetate 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), silver-thiourea 0.01 M (AgTU), barium chloride 0.01 M (BaCl₂), sodium acetate 1 N pH 8.2 (NaOAc) and adjusted exchangeable cations (Cl aj).

No.	pH	Ca				
		NH ₄ OAc	AgTU	BaCl ₂	NaOAc	Cl aj
----- Cmol(+) kg ⁻¹ -----						
1	4.64	1.53 b	7.44 a	1.43 b	NA	1.48 b
2	4.75	7.16 b	22.43 a	6.99 b	NA	7.09 b
3	5.00	4.53 b	15.23 a	4.43 b	NA	4.38 b
4	5.18	3.33 b	7.51 a	3.23 b	NA	3.22 b
5	5.30	12.07 b	21.61 a	11.93 b	NA	12.02 b
6	5.39	2.13 b	7.51 a	1.97 b	NA	2.12 b
7	5.40	6.33 b	13.98 a	6.23 b	NA	6.33 b
8	5.51	2.40 b	7.28 a	2.30 b	NA	2.38
9	5.54	13.20 b	37.78 a	13.03 b	NA	13.16 b
10	5.56	5.13 b	13.10 a	5.00 b	NA	5.12 b
11	6.82	5.20 b	6.22 ab	NA	NA	5.19 a
12	6.91	16.80 b	42.52 a	NA	NA	16.77 b
13	7.04	62.07 b	84.81 a	NA	NA	61.13 b
14	7.04	11.93 b	20.35 a	NA	NA	11.9 b
15	7.04	20.47 b	37.2 a	NA	NA	20.36 b
16	7.09	28.53 b	41.7 a	NA	NA	28.51 b
17	7.27	6.07 b	11.62 a	NA	NA	6.03 b
18	7.28	12.73 b	29.13 a	NA	NA	12.68 b
19	7.32	49.80 b	63.23 a	NA	NA	49.37 b
20	7.65	37.40 b	66.21 a	NA	NA	37.28 b
21	8.00	44.27 a	38.45 b	NA	31.07 c	43.43 ab
22	8.20	7.13 b	19.89 a	NA	6.60 c	7.02 b
23	8.30	3.80 b	7.79 a	NA	3.80 b	3.66 b
24	8.40	32.67 b	37.66 a	NA	15.80 c	31.97 b
25	8.40	7.33 c	17.08 a	NA	9.00 b	7.23 c
26	8.60	4.07 c	9.15	NA	5.13 b	3.81 c
27	8.70	46.67 b	49.48 ab	NA	28.13 c	46.52 b
28	8.70	15.75 b	23.33 a	NA	9.07 c	15.46 b
29	9.00	3.67 c	16.6 a	NA	4.67 b	3.30 c
30	9.10	3.20 c	4.92 a	NA	2.27 b	2.92 c

Medias con letras iguales por hileras son estadísticamente iguales con base a la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). NA = no analizado.
 Means with equal letters per row are statistically equal based on Tukey's test ($P \leq 0.05$). NA = not analyzed.

Cuadro 3. Magnesio extraído en los suelos con diferentes métodos: acetato de amonio 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), tiourea de plata 0.01 M (AgTU), cloruro de bario 0.01 M (BaCl₂), acetato de sodio 1 N pH 8.2 (NaOAc) y cationes intercambiables ajustados (CI aj).
Table 3. Magnesium extracted from soils with different methods: ammonium acetate 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), silver-thiourea 0.01 M (AgTU), barium chloride 0.01 M (BaCl₂), sodium acetate 1 N pH 8.2 (NaOAc) and adjusted exchangeable cations (CI aj).

No.	pH	Mg				
		NH ₄ OAc	AgTU	BaCl ₂	NaOAc	CI aj
----- Cmol(+) kg ⁻¹ -----						
1	4.64	0.20b	0.53 a	0.20 b	NA	0.06 c
2	4.75	1.83 b	3.52 a	1.64 b	NA	1.75 c
3	5.00	0.85 b	1.65 a	0.78 b	NA	0.70 c
4	5.18	0.32 b	0.51 a	0.29 b	NA	0.24 c
5	5.30	4.90 a	4.57 b	3.24 c	NA	4.86 ab
6	5.39	0.35 b	0.56 a	0.37 b	NA	0.33 b
7	5.40	2.65 b	3.96 a	2.33 b	NA	2.64 b
8	5.51	0.17 b	0.30 a	0.18 bc	NA	0.14 c
9	5.54	2.14 b	3.34 a	2.03 c	NA	2.11 b
10	5.56	1.10 b	1.54 a	1.09 b	NA	1.09 b
11	6.82	0.49 a	0.55 a	NA	NA	0.48 a
12	6.91	2.61 b	3.96 a	NA	NA	2.59 b
13	7.04	2.11 a	2.01 b	NA	NA	1.96 b
14	7.04	5.69 a	4.63 b	NA	NA	5.65 a
15	7.04	12.62 a	10.13 b	NA	NA	12.59 a
16	7.09	15.61 a	12.74 b	NA	NA	15.59 a
17	7.27	0.69 a	0.62 a	NA	NA	0.67 a
18	7.28	7.63 a	5.82 b	NA	NA	7.50 a
19	7.32	2.33 a	2.25 b	NA	NA	2.24 ab
20	7.65	0.85 a	0.42 b	NA	NA	0.79 a
21	8.00	29.62 a	20.31 b	NA	17.30 c	26.52 a
22	8.20	1.06 b	1.77 a	NA	0.97 b	1.05 b
23	8.30	0.22 b	0.33 a	NA	0.21 b	0.19 b
24	8.40	1.54 b	2.34 a	NA	1.02 c	1.50 b
25	8.40	0.74 b	1.29 a	NA	0.64 bc	0.69 b
26	8.60	0.30 b	0.34 a	NA	0.28 b	0.24 c
27	8.70	8.31 a	4.84 c	NA	5.87 b	8.28 a
28	8.70	0.98 a	0.74 b	NA	0.66 c	0.95 a
29	9.00	0.24 a	0.11 c	NA	0.26 a	0.21 b
30	9.10	0.10 b	0.38 a	NA	0.14 b	0.05 c

Medias con letras iguales por hileras son estadísticamente iguales con base a la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). NA = no analizado.
Means with equal letters per row are statistically equal based on Tukey's test ($P \leq 0.05$). NA = not analyzed.

Cuadro 4. Sodio extraído en los suelos con diferentes métodos: acetato de amonio 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), tiourea de plata 0.01 M (AgTU), cloruro de bario 0.01 M (BaCl₂), acetato de sodio 1 N pH 8.2 (NaOAc) y cationes intercambiables ajustados (Cl aj).
Table 4. Sodium extracted from soils with different methods: ammonium acetate 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), silver-thiourea 0.01 M (AgTU), barium chloride 0.01 M (BaCl₂), sodium acetate 1 N pH 8.2 (NaOAc) and adjusted exchangeable cations (Cl aj).

No.	pH	Na				
		NH ₄ OAc	AgTU	BaCl ₂	NaOAc	Cl aj
		----- Cmol(+) kg ⁻¹ -----				
1	4.64	0.52 b	17.39 a	NA	NA	0.42 b
2	4.75	1.83 b	20.87 a	NA	NA	1.73 b
3	5.00	0.75 b	17.39 a	NA	NA	0.58 c
4	5.18	1.59 b	13.91 a	NA	NA	1.20 c
5	5.30	1.10 b	10.43 a	NA	NA	1.05 b
6	5.39	0.75 b	19.13 a	NA	NA	0.71 b
7	5.40	1.54 b	20.87 a	NA	NA	1.48 b
8	5.51	0.41 b	15.65 a	NA	NA	0.35 c
9	5.54	1.13 b	13.91 a	NA	NA	0.85 c
10	5.56	0.43 b	15.65 a	NA	NA	0.40 b
11	6.82	0.90 b	5.48 a	NA	NA	0.87 b
12	6.91	2.03 b	7.30 a	NA	NA	1.98 b
13	7.04	5.04 b	14.61 a	NA	NA	4.52 c
14	7.04	3.65 b	5.48 a	NA	NA	3.54 b
15	7.04	4.52 b	7.30 a	NA	NA	3.89 c
16	7.09	5.04 b	9.13 a	NA	NA	4.84 c
17	7.27	2.17 b	10.04 a	NA	NA	2.06 c
18	7.28	0.96 b	5.48 a	NA	NA	0.86 b
19	7.32	5.04 b	10.04 a	NA	NA	4.80 c
20	7.65	1.48 b	8.22 a	NA	NA	1.42 b
21	8.00	26.49 a	25.65 a	NA	NA	22.84 b
22	8.20	3.48 a	3.22 b	NA	NA	3.32 a
23	8.30	9.88 b	10.04 a	NA	NA	9.73 b
24	8.40	19.77 a	19.17 a	NA	NA	18.83 b
25	8.40	0.72 a	0.39 c	NA	NA	0.65 b
26	8.60	11.16 a	9.13 c	NA	NA	10.66 b
27	8.70	9.25 b	13.70 a	NA	NA	9.09 b
28	8.70	22.96 a	20.09 ab	NA	NA	21.54 b
29	9.00	9.88 a	9.13 b	NA	NA	9.11 b
30	9.10	15.94 a	10.96 c	NA	NA	15.14 b

Medias con letras iguales por hileras son estadísticamente iguales con base a la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). NA = no analizado.
 Means with equal letters per row are statistically equal based on Tukey's test ($P \leq 0.05$). NA = not analyzed.

Cuadro 5. Comparación de medias (Tukey $p \leq 0.05$) del potasio extraído en los suelos con diferentes métodos: acetato de amonio 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), tiourea de plata 0.01 M (AgTU), cloruro de bario 0.01 M (BaCl₂), acetato de sodio 1 N pH 8.2 (NaOAc) y cationes intercambiables ajustados (Cl aj).

Table 5. Comparison of means (Tukey $p \leq 0.05$) of cation potassium extracted in soils with different methods: ammonium acetate 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), silver-thiourea 0.01 M (AgTU), barium chloride 0.01 M (BaCl₂), sodium acetate 1 N pH 8.2 (NaOAc) and adjusted exchangeable cations (Cl aj).

No.	pH	K				
		NH ₄ OAc	AgTU	BaCl ₂	NaOAc	Cl aj
----- Cmol(+) kg ⁻¹ -----						
1	4.64	0.15b	0.31 a	0.14 b	NA	0.12 b
2	4.75	0.99b	1.18 a	0.98 b	NA	0.96 b
3	5.00	0.34a	0.31 a	0.33 a	NA	0.32
4	5.18	0.87a	0.72 c	0.86 a	NA	0.78 b
5	5.30	0.48 b	0.59 a	0.47 b	NA	0.47 b
6	5.39	0.31 a	0.31 a	0.30 a	NA	0.30 a
7	5.40	0.66 a	0.54 b	0.65 a	NA	0.65 a
8	5.51	0.10 b	0.15 a	0.09 b	NA	0.09 b
9	5.54	0.43 b	0.59 a	0.42 b	NA	0.32 c
10	5.56	0.10 a	0.10 a	0.09 a	NA	0.10 a
11	6.82	0.41 a	0.41 a	NA	NA	0.40 a
12	6.91	1.06 a	0.95 b	NA	NA	1.05 a
13	7.04	1.76 b	1.89 a	NA	NA	1.67 b
14	7.04	1.07 a	0.90 b	NA	NA	1.06 a
15	7.04	1.18 a	1.00 b	NA	NA	1.16 a
16	7.09	1.28 a	0.87 b	NA	NA	1.25 a
17	7.27	1.23 a	1.18 b	NA	NA	1.19 b
18	7.28	0.36 a	0.28 b	NA	NA	0.35 a
19	7.32	1.89 a	1.89 a	NA	NA	1.84 a
20	7.65	0.66 b	0.95 a	NA	NA	0.65 b
21	8.00	5.52 a	2.94 c	NA	5.63 a	4.81 b
22	8.20	0.99 b	1.02 b	NA	1.21 a	0.96 b
23	8.30	2.27 b	0.95 c	NA	2.54 a	2.24 b
24	8.40	7.77 a	2.71 c	NA	6.85 b	7.65 a
25	8.40	0.15 c	0.23 b	NA	0.31 a	0.14 c
26	8.60	2.34 ab	0.79 c	NA	2.56 a	2.26 b
27	8.70	4.60 a	3.20 c	NA	4.50 b	4.57 ab
28	8.70	8.29 a	2.43 c	NA	7.77 b	8.10 a
29	9.00	1.86 a	0.87 c	NA	2.25 a	1.76 b
30	9.10	5.01 b	0.69 d	NA	5.63 a	4.91 c

Medias con letras iguales por hileras son estadísticamente iguales con base a la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). NA = no analizado.
Means with equal letters per row are statistically equal based on Tukey's test ($P \leq 0.05$). NA = not analyzed.

La CIC determinada mediante NH₄OAc 1 N, pH 7.0 en suelos ácidos dio valores más altos que los demás métodos (CICE, CICEaj, AgTU 0.01 M, BaCl₂ 0.01 M) (Cuadro 6). Este cambio significativo de la CIC en suelos ácidos sugiere que se debe a las cargas negativas que surgen en la superficie de intercambio debido a que el pH de la solución saturante es más alto que el del suelo, por lo tanto, los resultados son sobreestimados, en especial en suelos ácidos con carga variable (Sumner y Miller, 1996; Pansu y Gautheyrou, 2006). Hendershot, Lalonde y Duquette (2007) piensan que, en suelos ácidos, la solución NH₄OAc a pH 7.0 es menos efectiva en el reemplazo de cationes y se considera más apropiado la aplicación del método no bufferizado, ya que proveería una mejor estimación de la CIC y de los cationes intercambiables. Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos por Kong, Li, Song y Zhang (2021) quienes obtuvieron valores de CIC con NH₄OAc 1 N pH 7.0 significativamente mayores a los obtenidos con intercambio forzado de BaCl₂-MgSO₄. Jaremko y Kalembsa (2014) encontraron que el método de la sumatoria utilizando como solución extractora el BaCl₂ sobreestima la capacidad de intercambio catiónico debido a la disolución de partículas de carbonato de calcio, y que la comparación de la CIC mediante BaCl₂ es equivalente a la obtenida con hexaamminocobalto (III) (Ciesielski, Sterckeman, Santerne y Willery, 1997; Nel, Bruneel y Smolders, 2023) y el método de Kappen's.

En suelos neutros y alcalinos, la CIC determinada mediante NH₄OAc 1 N pH 7.0 (Cuadros 7 y 8) dio valores inferiores a los métodos de suma efectiva, cationes intercambiables y NaOAc 1 N pH 8.2, pero mayores al de tiourea de plata, esto debido a que el catión índice (NH₄⁺) que participa en el desplazamiento de los cationes intercambiables en los sitios de intercambio compite con el calcio solubilizado por la solución saturante NH₄OAc 1 N pH 7.0 (Rhoades, 1982b; Henríquez *et al.*, 2005; Dohrmann, 2006), lo que se traduce en un obstáculo para que el amonio ocupe cada uno de los sitios de intercambio, dando valores menores que los otros métodos.

La CIC obtenida con el NaOAc 1 N pH 8.2, generó valores más bajos que con el método de CICE y CICEaj, pero mayores que NH₄OAc 1 N pH 7.0 y AgTU 0.01 M, ya que considera que la solución saturante alcalina, disminuye la solubilidad de carbonatos (Bower *et al.*, 1952). Sin embargo, este método incluye en su procedimiento la etapa de lavado, lo cual conlleva a errores, por lo que Polemio y Rhoades (1977) mencionan que su aplicación en suelos calcáreos es cuestionable. Jaremko y Kalembsa (2014) mencionan que el NaOAc como solución extractora causa incrementos de carga negativa en los suelos, particularmente en aquellos con materia orgánica. Elfaki, Gafer, Sulieman y Ali (2015) encontraron concordancia al evaluar y comparar el método de NaOAc (Bower *et al.*, 1952) con el método de Rhoades al medir la capacidad de intercambio catiónico en suelos con alto contenido de carbonato de calcio en Sudán, puesto que este último ahorra tiempo y reactivos. Amita y Taylor (2023) compararon la CIC de siete suelos calcáreos obtenida con NaOAc 1 N pH 8.2 como solución saturante y mediante la suma de los cationes extraídos con NH₄OAc 1 N a pH 8.2 donde la CIC sumada resultó ser igual a la CIC medida debido a la solución saturante alcalina y puede explicar que la CICE y la CIC obtenida con NaOAc son estadísticamente

Cuadro 6. Comparación de medias (Tukey P ≤ 0.05) de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos ácidos con diferentes métodos: sumatoria de cationes extractables (CICE), sumatoria de cationes extractables ajustada (CICEaj), acetato de amonio 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), tiourea de plata 0.01 M (AgTU) y cloruro de bario 0.01 M (BaCl₂).

Table 6. Comparison of means (Tukey P ≤ 0.05) of cation exchange capacity (CEC) in acid soils with different methods: sum of extractable cations (CICE), adjusted sum of extractable cations (CICEaj), ammonium acetate 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), silver thiourea 0.01 M (AgTU) and barium chloride 0.01 M (BaCl₂).

No.	pH	CIC				
		CICE	CICEaj	NH ₄ OAc	AgTU	BaCl ₂
----- Cmol(+) kg ⁻¹ -----						
1	4.64	3.663 c	2.067 d	6.333 a	4.503 bc	5.704 ba
2	4.75	12.060 b	11.537 b	12.923 ab	13.920 a	11.537 b
3	5.00	8.177 c	5.980 d	11.350 a	9.870 ab	8.850 bc
4	5.18	6.483 b	5.440 c	9.070 a	4.627 c	5.394 c
5	5.30	19.330 a	18.400 ab	17.123 bc	15.953 c	13.762 d
6	5.39	6.607 c	3.457 d	21.787 a	9.613 b	8.223 cb
7	5.40	13.517 b	11.097 c	15.807 a	14.340 b	14.194 b
8	5.51	4.133 b	2.970 c	6.890 a	4.903 b	6.030 a
9	5.54	16.967 ab	16.443 b	18.367 a	16.717 ab	15.131 b
10	5.56	7.040 a	6.713 ab	6.280 ab	5.837 ab	5.270 b

Medias con letras iguales por hileras son estadísticamente iguales con base a la prueba de Tukey (P ≤ 0.05).
Means with equal letters per row are statistically equal based on Tukey's test (P ≤ 0.05).

Cuadro 7. Comparación de medias (Tukey $P \leq 0.05$) de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos neutros y alcalinos con diferentes métodos: sumatoria de cationes extractables (CICE), sumatoria de cationes extractables ajustada (CICEaj), acetato de amonio 1 N pH 7.0 (NH₄OAc) y tiourea de plata 0.01 M (AgTU).

Table 7. Comparison of means (Tukey $P \leq 0.05$) of cation exchange capacity (CEC) in neutral and alkaline soils with different methods: sum of extractable cations (CICE), adjusted sum of extractable cations (CICEaj), ammonium acetate 1 N pH 7.0 (NH₄OAc) and silver thiourea 0.01 M (AgTU).

No.	pH	CIC			
		CICE	CICEaj	NH ₄ OAc	AgTU
----- Cmol(+) kg ⁻¹ -----					
11	6.82	7.000 a	6.947 a	3.190 b	4.023 b
12	6.91	22.500 a	22.393 a	21.483 a	19.363 a
13	7.04	70.980 a	69.280 b	42.710 c	31.260 d
14	7.04	22.350 a	22.157 a	13.273 b	13.427 b
15	7.04	38.787 a	37.997 a	23.813 b	24.987 b
16	7.09	50.470 a	50.197 a	29.080 b	29.020 b
17	7.27	10.157 a	9.953 a	4.410 b	6.320 b
18	7.28	21.673 a	21.393 a	13.477 b	16.367 b
19	7.32	59.070 a	58.247 a	36.123 b	31.067 c
20	7.65	40.397 a	40.143 a	20.300 b	15.657 c

Medias con letras iguales por hileras son estadísticamente iguales con base a la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).
Means with equal letters per row are statistically equal based on Tukey's test ($P \leq 0.05$).

Cuadro 8. Comparación de medias (Tukey $P \leq 0.05$) de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos alcalinos con diferentes métodos: sumatoria de cationes extractables (CICE), sumatoria de cationes extractables ajustada (CICEaj), acetato de amonio 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), tiourea de plata 0.01 M (AgTU) y acetato de sodio 1 N pH 8.2 (NaOAc).

Table 8. Comparison of means (Tukey $P \leq 0.05$) of cation exchange capacity (CEC) in alkaline soils with different methods: sum of extractable cations (CICE), adjusted sum of extractable cations (CICEaj), ammonium acetate 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), silver thiourea 0.01 M (AgTU) and sodium acetate 1N pH 8.2 (NaOAc).

No.	pH	CIC				
		CICE	CICEaj	NH ₄ OAc	AgTU	NaOAc
----- Cmol(+) kg ⁻¹ -----						
21	7.96	105.093 a	97.597 a	42.407 b	30.433 b	84.403 a
22	8.24	12.663 a	12.353 a	7.600 b	9.293 b	14.347 a
23	8.30	16.177 a	15.833 a	4.257 c	3.800 c	10.257 b
24	8.39	61.743 a	59.953 a	17.833 c	16.807 c	29.220 b
25	8.40	8.950 b	8.713 b	8.510 b	8.300 b	17.627 a
26	8.56	17.860 a	16.980 a	5.470 c	3.323 c	11.480 b
27	8.69	68.827 a	68.457 a	25.280 b	27.120 b	35.910 b
28	8.70	47.977 s	46.040 a	11.550 c	10.330 c	22.377 b
29	8.99	15.647 s	14.380 a	3.750 c	5.237 cb	8.520 b
30	9.11	24.257 s	23.027 a	5.520 b	4.430 b	10.607 b

Medias con letras iguales por hileras son estadísticamente iguales con base a la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).
Means with equal letters per row are statistically equal based on Tukey's test ($P \leq 0.05$).

diferentes por la solubilidad de carbonatos (Bower *et al.*, 1952) de la solución saturante de NH_4OAc 1 N, pH 7.0. En suelos ácidos se obtuvieron valores de CIC semejantes entre el método de AgTU 0.01M con el de BaCl_2 0.01 M, y CICE, pero menores que los obtenidos con NH_4OAc 1 N pH 7.0 y mayores a los de la CICEaj. Esta similitud de la CIC obtenida con AgTU 0.01 M se debe la gran afinidad de este reactivo por las cargas negativas del suelo al equilibrar la muestra de suelo con la solución saturante, lo cual permite una completa saturación (Chhabra *et al.*, 1975¹), sin que otros iones generen fuentes de variación que alteren el valor final de la CIC (Pérez-Rosales *et al.*, 2017).

En los suelos neutros y alcalinos, los valores obtenidos con AgTU 0.01 M son similares a los obtenidos con NH_4OAc 1 N pH 7.0, pero menores a los obtenidos con CICE y CICEaj. Esta discrepancia se debe a que en los suelos donde se obtiene una CICE mayor a la obtenida con AgTU 0.01 M, se presenta un efecto por la solución saturante de NH_4OAc 1 N a pH 7.0, la cual disuelve compuestos de carbonato de calcio, cuantificando por consecuencia más Ca^{2+} del que estaba originalmente en los sitios de intercambio (Castellanos *et al.*, 2000; Rhoades, 1982).

La correlación entre los valores de CIC obtenidos mediante NH_4OAc 1 N pH 7.0 y CICE indican, de acuerdo con el coeficiente de determinación, que no se conseguirá coincidencia en los valores de CIC mediante estos dos métodos (CICE y NH_4OAc 1 N pH 7.0) al tratar de compararlos (Cuadro 8), y pone en evidencia la sobrevaloración de la determinación de la CIC con el método de CICE (Figura 1). La correlación obtenida entre ambos métodos es mayor a la obtenida por Chávez (2015²) quien obtuvo un coeficiente de determinación de 0.25. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Rodríguez y Rodríguez (2002), quienes obtuvieron un alto grado de variabilidad estadística de la CIC medida con los métodos de NH_4OAc 1 N pH 7.0, NaOAc 1 N pH 8.2 y el cloruro de amonio, lo que no permitió obtener conclusiones coherentes, puesto que la CIC se determinó con base a la sumatoria de cationes. Henríquez *et al.* (2005), sugieren que el uso de cloruro de amonio no tamponado y la sumatoria de cationes, podrían usarse como metodologías de rutina para determinar la CIC en suelos arcillosos en sustitución del de acetato de amonio 1 N pH 7.0.

Los resultados de los Cuadros 7 y 8 indican, de acuerdo con las agrupaciones de Tukey ($P \leq 0.05$), que los valores obtenidos de CIC mediante CICE y CICEaj son iguales. Esto pone en evidencia la baja solubilización de cationes mediante pasta de saturación.

Los altos valores de los coeficientes de variación en este estudio pueden ser explicados por la gran variabilidad de los suelos, los cuales difieren en su ubicación, características fisicoquímicas, mineralogía y contenido de materia orgánica (Cuadro 1).

El coeficiente de determinación entre NH_4OAc 1 N pH 7.0 y AgTU 0.01 M indica alta asociación entre los métodos (coeficiente de correlación de 0.95) (Cuadro 9). Estos resultados son similares a los de Chhabra *et al.* (1975¹), quienes obtuvieron un coeficiente de correlación de 0.98 al comparar el método de tiourea de plata y acetato de amonio a pH específico. Pleyrier y Juo (1980) obtuvieron una correlación de 0.96 al utilizar la solución tiourea de plata sin tampón en suelos Alfisoles, Ultisoles y Oxisoles, mostrando que el método de AgTU es adecuado para medir la capacidad de intercambio catiónico de los suelos donde dominan coloides de carga variable. Estos resultados sugieren que el método de AgTU 0.01 M, pudiera utilizarse para evaluar rutinariamente la capacidad de intercambio catiónico real de los suelos ácidos (Figura 2), además su determinación es más simple y rápida.

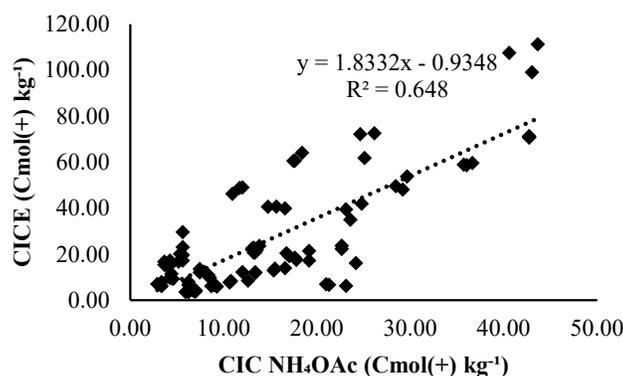


Figura 1. Relación entre la capacidad de intercambio catiónico (Cmol(+) kg^{-1}) medida con acetato de amonio (NH_4OAc) 1 N pH 7.0 y por sumatoria de cationes extraídos (CICE).
Figure 1. Relationship between cation exchange capacity (Cmol(+) kg^{-1}) measured by ammonium acetate (NH_4OAc) 1 N pH 7.0 and by summing cations extracted (CICE).

² Chávez, A. A. R. (2015). *Comparación de dos métodos de determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos de la región central de Honduras*. Tesis de para obtener el grado de licenciatura. Zamorano, Honduras. Disponible en <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/4564>

Cuadro 9. Modelos de regresión lineal de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) obtenida con diferentes métodos: sumatoria de cationes extractables (CICE), sumatoria de cationes extractables ajustada (CICEaj), acetato de amonio 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), tiourea de plata 0.01 M (AgTU), acetato de sodio 1 N pH 8.2 (NaOAc) y cloruro de bario 0.01 M (BaCl₂).

Table 9. Linear regression models of cation exchange capacity (CEC) obtained by different methods: sum of extractable cations (CICE), adjusted sum of extractable cations (CICEaj), ammonium acetate 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), silver thiourea 0.01 M (AgTU), sodium acetate 1 N pH 8.2 (NaOAc) and barium chloride 0.01 M (BaCl₂).

Ecuación de regresión				Coefficiente de correlación R	Coefficiente de determinación R ²	
CICE	=	1.83	(NH ₄ OAc)	- 0.935	0.80	0.65
CICEaj	=	1.77	(NH ₄ OAc)	- 1.100	0.80	0.64
AgTU	=	0.79	(NH ₄ OAc)	+ 1.984	0.95	0.90
BaCl ₂	=	0.81	(NH ₄ OAc)	+ 0.144	0.96	0.92
NaOAc	=	1.49	(NH ₄ OAc)	+ 3.524	0.97	0.95
AgTU	=	1.29	(BaCl ₂)	- 2.155	0.99	0.97
AgTU	=	0.66	NaOAc	- 2.299	0.94	0.88

La relación entre el método de BaCl₂ 0.01 M y AgTU 0.01 M presentan una alta correlación (0.99), por lo que el método de AgTU 0.01 M pudiera ser una alternativa al método de BaCl₂ 0.01 M que fue adaptado para suelos ácidos (Guillman y Bakker 1979); sin embargo, consume bastante tiempo en su determinación para igualar la fuerza iónica. La correlación obtenida entre los métodos NH₄OAc 1 N pH 7.0 y BaCl₂ para obtener la CIC fue mayor (0.96) a la obtenida por Zgorelec *et al.* (2019), quienes obtuvieron valores de 0.83. De igual manera la correlación es alta (0.99) al compararlo con el método de NaOAc 1 N pH 8.2, lo que reafirma la gran afinidad de la AgTU 0.01 M por las cargas negativas de las partículas del suelo aun cuando el suelo posea altas concentraciones de sales (Chhabra *et al.*, 1975¹).

Los valores de CIC con el método de NH₄OAc 1 N pH 7.0 presentan diferencias con el método de AgTU 0.01 M, lo que quizá se debe a que la superficie del complejo coloidal de estos suelos presente carga variable por la solución del NH₄OAc 1 N pH 7.0 y, por lo tanto, sobreestima los valores de CIC por las cargas negativas que se generan sobre los minerales de arcillas y la materia orgánica en suelos ácidos y de carga variable (Sumner y Miller, 1996; Pansu y Gautheyrou, 2006). La comparación de los valores entre los cationes intercambiables se presenta en el Cuadro 10, donde se observa que las diferencias de extracción del Ca²⁺ por los métodos NH₄OAc 1 N pH 7.0 y AgTU 0.01 M sugieren que, en efecto, ambos métodos disuelven carbonato de calcio; sin embargo, la AgTU 0.01 M disuelve más calcio que el NH₄OAc 1 N a pH 7.0, situación que promueve interpretaciones erróneas del potencial e indicadores de fertilidad de un suelo.

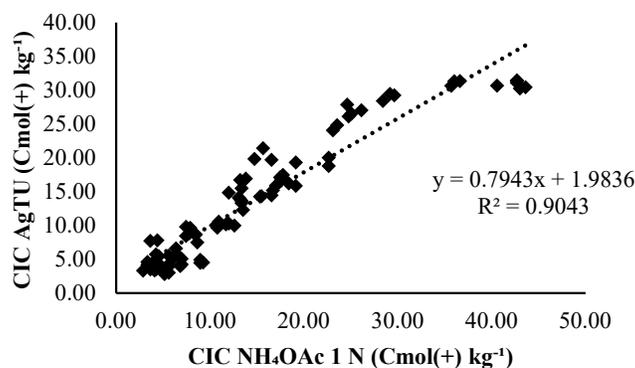


Figura 2. Relación entre la capacidad de intercambio catiónico (Cmol(+) kg⁻¹) medida con acetato de amonio (NH₄OAc) 1 N pH 7.0 y con tiourea de plata (AgTU) 0.01 M.

Figure 2. Relationship between cation exchange capacity (Cmol(+) kg⁻¹) measured by ammonium acetate (NH₄OAc) 1 N pH 7.0 and silver-thiourea (AgTU) 0.01 M.

La correlación entre los métodos para obtener la CIC se reportan en los Cuadros 11, 12 y 13. Los mayores coeficientes para suelos ácidos se observaron entre los métodos de CICE y CICEaj, CICE y el método de BaCl₂ 0.01 M y entre el método de la AgTU 0.01 M con los métodos de CICE, CICEaj y BaCl₂ 0.01 M (Cuadro 11). La alta correlación entre la CICE y CICEaj se debe a la poca cantidad de cationes solubles en pasta de saturación presentes en los suelos ácidos.

La relativamente baja correlación entre NH₄OAc 1 N a pH 7.0 y AgTU 0.01 M, BaCl₂ 0.01 M, CICE y CICEaj (0.76, 0.72, 0.63 y 0.53, respectivamente) es posible que se deba a la subestimación de la CIC por las cargas negativas que surgen en la superficie de intercambio (Sumner y Miller, 1996; Pansu y Gautheyrou, 2006).

En suelos neutros y alcalinos (Cuadro 12) los coeficientes de correlación entre los métodos fueron significativos (mayor a 0.96) con excepción de la CICE y CICEaj con AgTU 0.01 M debido a la subestimación de la CIC en suelos neutros y moderadamente alcalinos, ya que la solución saturante de NH₄OAc 1 N pH 7.0 tiende a solubilizar partículas de carbonato de calcio presente en los suelos (Rhoades, 1982b; Henríquez et al., 2005) y por los errores del método y a la baja solubilización de cationes en pasta de saturación.

En general, se observó una estrecha relación entre los métodos utilizados, por lo que es factible estimar la CIC en suelos ácidos, neutros, y alcalinos, mediante AgTU 0.01 M por ser más simple su determinación, y además muestra ventaja sobre el NH₄OAc 1 N a pH 7.0 en cuanto a los costos de determinación por muestra ya que el NH₄OAc 1 N pH 7.0 supera en ocho veces el costo por AgTU 0.01 M (Cuadro 14 y 15).

Los valores obtenidos en la determinación de carbonato de calcio (CaCO₃) equivalente fue entre 0.2 % y 96.9 %. Si se considera la sobreestimación de Ca²⁺ como la diferencia entre el Ca²⁺ extraído mediante NH₄OAc 1 N pH 7.0 y NH₄OAc 1 N pH 10.0 se obtienen valores de 240 mg kg⁻¹ hasta 6180 mg kg⁻¹, por lo que, de acuerdo con los datos obtenidos, la sobreestimación va desde 10 a 498 veces el que originalmente está en los sitios de intercambio, por lo que se deduce, que a mayores contenidos de CaCO₃, mayor solubilización de Ca²⁺ en los suelos (Figura 3). La ecuación de regresión para obtener el calcio sobrestimado que se extrae con NH₄OAc 1N pH 7.0 se presenta en el Cuadro 17.

Cuadro 10. Modelos de regresión lineal entre calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺), sodio (Na⁺) y potasio (K⁺) extraídos con diferentes métodos: cationes extractables (CICE), cationes extractables ajustada (CICEaj), acetato de amonio 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), tiourea de plata 0.01 M (AgTU), acetato de sodio 1 N pH 8.2 (NaOAc) y cloruro de bario 0.01 M (BaCl₂).

Table 10. Linear regression models between calcium (Ca²⁺), magnesium (Mg²⁺), sodium (Na⁺) and potassium (K⁺) extracted by different methods: extractable cations (CICE), adjusted extractable cations (CICEaj), ammonium acetate 1 N pH 7.0 (NH₄OAc), silver thiourea 0.01 M (AgTU), sodium acetate 1 N pH 8.2 (NaOAc) and barium chloride 0.01 M (BaCl₂).

Ecuación de regresión				Coefficiente de correlación R	Coefficiente de determinación R ²
K-AgTU	=	0.31	(K-NH ₄ OAc) + 0.48	0.80	0.64
K-NaOAc	=	0.88	(K-NH ₄ OAc) + 0.496	0.98	0.97
K-BaCl ₂	=		(K-NH ₄ OAc) - 0.01	1.00	1.00
Na-AgTU	=	0.61	(Na-NH ₄ OAc) + 9.919	0.50	0.25
K-CICE	=	0.97	(K-NH ₄ OAc) - 0.008	0.99	0.99
Na- CICE	=	0.92	(Na-NH ₄ OAc) + 0.054	0.99	0.99
Mg-AgTU	=	0.69	(Mg-NH ₄ OAc) + 0.709	0.98	0.95
Mg- NaOAc	=	0.58	(Mg-NH ₄ OAc) + 0.219	1.00	0.99
Mg-BaCl ₂	=	0.69	(Mg-NH ₄ OAc) + 0.214	0.98	0.95
Mg- CICE	=	0.93	(Mg-NH ₄ OAc) + 0.101	0.99	0.99
Ca- CICE	=	0.99	(Ca-NH ₄ OAc) - 0.028	0.99	0.99
Ca- AgTU	=	1.11	(Ca-NH ₄ OAc) + 8.311	0.91	0.82
Ca-BaCl ₂	=	1	(Ca-NH ₄ OAc) - 0.106	0.99	0.99
Ca-NaOAc	=	0.57	(Ca-NH ₄ OAc) + 2.028	0.97	0.93

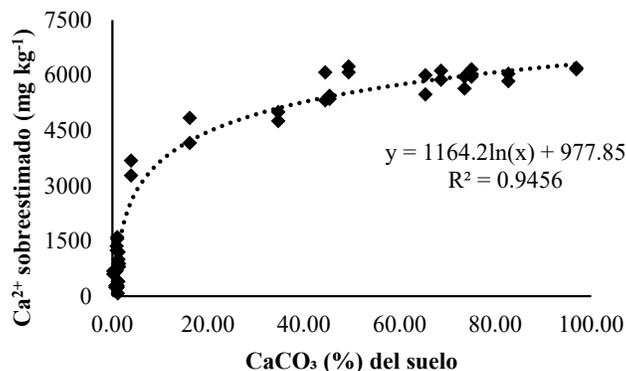


Figura 3. Sobreestimación del calcio (Ca^{2+}) extraído con acetato de amonio 1 N pH 7.0.

Figure 3. Calcium overestimated (Ca^{2+}) extracted by ammonium acetate 1 N pH 7.0.

Cuadro 11. Matriz de correlación de los métodos para determinar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos ácidos con diferentes métodos: suma de cationes extractables (CICE), suma de cationes extractables ajustada (CICEaj), acetato de amonio 1 N pH 7.0 (NH_4OAc), tiourea de plata 0.01 M (AgTU) y cloruro de bario 0.01 M (BaCl_2).

Table 11. Correlation matrix of methods to determine cation exchange capacity (CEC) in acid soils with different methods: sum of extractable cations (CICE), adjusted sum of extractable cations (CICEaj), ammonium acetate 1 N pH 7.0 (NH_4OAc), silver thiourea 0.01 M (AgTU) and barium chloride 0.01 M (BaCl_2).

	CICE	CICEaj	NH_4OAc	AgTU	BaCl_2
CICE	1.00				
CICEaj	0.99	1.00			
NH_4OAc	0.63	0.53	1.00		
AgTU	0.93	0.89	0.76	1.00	
BaCl_2	0.92	0.88	0.72	0.98	1.00

Cuadro 12. Matriz de correlación de los métodos para determinar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos neutros y alcalinos con diferentes métodos: suma de cationes extractables (CICE), suma de cationes extractables ajustada (CICEaj), acetato de amonio 1 N pH 7.0 (NH_4OAc) y tiourea de plata 0.01 M (AgTU).

Table 12. Correlation matrix of methods to determine cation exchange capacity (CEC) in neutral and alkaline soils with different methods: sum of extractable cations (CICE), adjusted sum of extractable cations (CICEaj), ammonium acetate 1 N pH 7.0 (NH_4OAc) and silver thiourea 0.01 M (AgTU).

	CICE	CICEaj	NH_4OAc	AgTU
CICE	1.00			
CICEaj	0.99	1.00		
NH_4OAc	0.97	0.97	1.00	
AgTU	0.92	0.92	0.96	1.00

Cuadro 13. Matriz de correlación de los métodos para determinar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos alcalinos con diferentes métodos: suma de cationes extractables (CICE), suma de cationes extractables ajustada (CICEaj), acetato de amonio 1 N pH 7.0 (NH₄OAc) y tiourea de plata 0.01 M (AgTU) y acetato de sodio 1 N pH 8.2 (NaOAc).

Table 13. Correlation matrix of methods to determine cation exchange capacity (CEC) in alkaline soils with different methods: sum of extractable cations (CICE), adjusted sum of extractable cations (CICEaj), ammonium acetate 1 N pH 7.0 (NH₄OAc) and silver thiourea 0.01 M (AgTU) and sodium acetate 1 N pH 8.2 (NaOAc).

	CICE	CICEaj	NH ₄ OAc	AgTU	NaOAc
CICE	1.00				
CICEaj	0.99	1.00			
NH ₄ OAc	0.95	0.95	1.00		
AgTU	0.92	0.93	0.96	1.00	
NaOAc	0.92	0.91	0.98	0.89	1.00

Cuadro 14. Costo aproximado en pesos mexicanos de la determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) mediante acetato de amonio (NH₄OAc) 1 N pH 7.0.

Table 14. Approximate cost in Mexican pesos of determining cation exchange capacity (CEC) by ammonium acetate (NH₄OAc) 1 N pH 7.0.

Unidad	Concepto	Costo	mL por muestra	Costo unitario
1 kg	Acetato de amonio 1 N	\$806.00	100	\$ 6.21
1 l	Alcohol etílico	\$760.00	100	\$ 76.00
1 kg	Cloruro de amonio 1 N	\$1288.00	33	\$ 2.27
1 kg	Cloruro de amonio 0.25 N	\$1288.00	33	\$ 0.57
1 kg	NaCl 10%	\$337.50	100	\$ 3.38
1 kg	NaOH 40%	\$516.00	20	\$ 4.13
1 kg	Ácido bórico al 2%	\$1494.61	10	\$ 0.30
1 g	Verde de bromocresol	\$895.36	0.1	\$ 0.01
1 g	Rojo de metilo	\$59.15	0.1	\$ 0.01
1 l	Ácido sulfúrico 0.05 N	\$570.72	5.0	\$ 0.01
1 kg	Carbonato de sodio	\$1848.00	0.75	\$ 1.39
125 g	Fenoltaleína	\$2189.65	0.5	\$ 0.01
	Total			\$ 94.29

Cuadro 15. Costo aproximado en pesos mexicanos de la determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) mediante tiourea de plata (AgTU) 0.01 M.

Table 15. Approximate cost in Mexican pesos of determining cation exchange capacity (CEC) by silver-thiourea (AgTU) 0.01 M.

Unidad	Concepto	Costo	mL por muestra	Costo unitario
0.5 kg	Nitrato de plata 0.04 M	\$45 875.88	30	\$5.33
0.5 kg	Tiourea 0.1 M	\$1450.00		
0.5 kg	Estándar de 500 mL Ag	\$45 875.88	0.3	\$0.02
1 kg	Ácido nítrico 1 M	\$994.50	10	\$0.70
1 kg	Aire/acetileno	\$1213.10	4.4	\$5.35
	Total			\$11.40

Las cantidades extraídas de Mg^{2+} y K^+ se sometieron a correlaciones entre las extracciones con NH_4OAc 1 N pH 7.0 y NH_4OAc 1 N pH 10.0 (Figuras 4 y 5). Se observó que el magnesio es el segundo catión sobreestimado en los suelos mediante extracción con NH_4OAc 1 N pH 7.0 de acuerdo con las evidencias encontradas (Cuadro 16), la pendiente de la recta para el caso del Mg^{2+} es menor que para el K^+ , lo cual sugiere que para obtener coincidencias entre un método y otro, es necesario disminuir el 23 % del Mg^{2+} extraído mediante acetato de amonio 1 N pH 7.0, donde los valores obtenidos de Mg^{2+} sobreestimado en los suelos van de 5.6 mg kg^{-1} a 823.7 mg kg^{-1} lo que sugiere que la sobreestimación va desde 11.2 hasta 141.7 veces, en relación al que estaba originalmente en los sitios de intercambio. La gran variabilidad en el contenido de magnesio sobreestimado en este estudio podría deberse a la presencia de carbonato de magnesio en los suelos.

Para obtener coincidencias entre las extracciones de K^+ en los suelos, es necesario disminuir el 12% del K^+ extraído mediante acetato de amonio 1 N pH 7.0, lo que supone que 12% extraído en la mayoría de los suelos pertenece al soluble y no al intercambiable con contenidos que van de 10 mg kg^{-1} a 100 mg kg^{-1} , donde la sobreestimación de este catión va desde 3.7 a 33.3 veces con relación al que se encuentra en los sitios de intercambio.

Con base a Haby, Russelle y Skogley (1990) el potasio soluble en general se encuentra en concentraciones que varían desde 1 mg kg^{-1} a 265 mg kg^{-1} , con rangos de 2 mg kg^{-1} a 5 mg kg^{-1} en suelos de las regiones húmedas, mientras que en suelos de zonas áridas y templadas va de 5 mg kg^{-1} hasta 100 mg kg^{-1} valores obtenidos de K^+ podrían ser explicados por la variabilidad de los suelos estudiados (Cuadro 1), (Castellanos *et al.*, 2000).

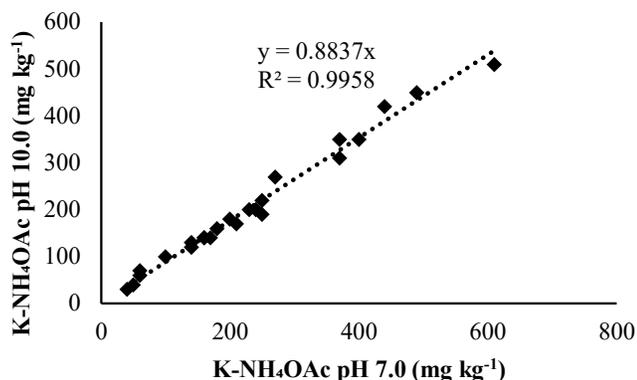


Figura 4. Corrección del magnesio (Mg^{2+}) extraído con acetato de amonio 1 N pH 7.0.

Figure 4. Magnesium correction (Mg^{2+}) extracted by ammonium acetate 1 N pH 7.0.

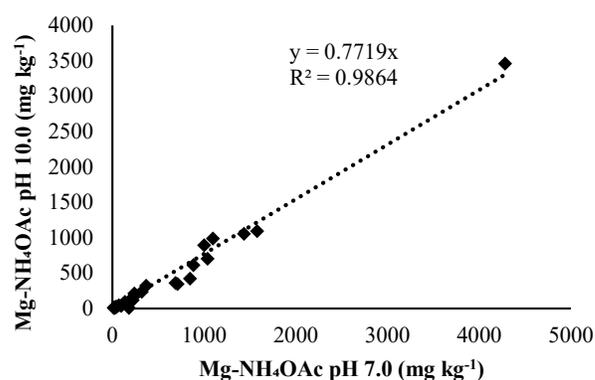


Figura 5. Corrección del potasio (K^+) extraído con acetato de amonio 1 N pH 7.0.

Figure 5. Potassium correction (K^+) extracted by ammonium acetate 1 N pH 7.0.

Cuadro 16. Corrección del magnesio y potasio (mg kg^{-1} extraído mediante acetato de amonio 1 N pH 7.0 (NH_4OAc)).
Table 16. Magnesium and potassium correction (mg kg^{-1} extracted by ammonium acetate 1 N pH 7.0 (NH_4OAc)).

Ecuación de regresión		Coeficiente de correlación R	Coeficiente de determinación R^2
Mg^{2+}	$= 0.772 (Mg^{2+}-NH_4OAc)$	0.99	0.98
K^+	$= 0.884 (K^+-NH_4OAc)$	0.99	0.98

Cuadro 17. Sobreestimación del calcio (mg kg^{-1}) extraído mediante acetato de amonio 1 N pH 7.0.
Table 17. Calcium overestimated (mg kg^{-1}) extracted by ammonium acetate 1 N pH 7.0.

Ecuación de regresión		Coeficiente de correlación R	Coeficiente de determinación R^2
Ca^{2+}	$= 1164.2 \ln(CaCO_3)+977.85$	0.97	0.95

CONCLUSIONES

El método de tiourea de plata (AgTU) mostró alta correlación con los métodos de NH_4OAc 1 N pH 7.0, acetato de sodio 1 N pH 8.2 y cloruro de bario (BaCl_2) para determinar la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

El método de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICEaj) para determinar la capacidad de intercambio catiónico, no resultó adecuado para suelos con pH neutro y alcalino.

El costo de análisis por muestra mediante NH_4OAc supera en ocho veces el costo por AgTU.

El método de tiourea de plata fue la mejor alternativa para determinar la capacidad de intercambio catiónico, ya que es rápido, de bajo costo, minimiza errores y es aplicable a suelos con diferentes características de pH, textura, materia orgánica y contenido de carbonatos.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización e idea principal: E.R.S. y J.F.P.G. Métodos y el análisis de muestras: E.R.S. y J.F.P.G. Análisis de datos: M.V.H. y J.F.P.G. Investigación: J.F.P.G. Recursos: E.R.S. Escritura, preparación del borrador original: J.F.P.G. Escritura, revisión y edición: J.P.P., A.V.A. y L.C.C.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Autónoma Chapingo. Al Laboratorio de Análisis Químico del Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Suelos por las muestras de estudio, y apoyo en los análisis químicos realizados.

LITERATURA CITADA

- Aguilar, S. A., Etchevers-Barra, J. D., & Castellanos-Ramos, J. Z. (1987). *Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo*. México: Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.
- Amita, J., & Taylor, R. W. (2023). Determination of cation exchange capacity of calcareous soils: Comparison of summation method and direct replacement method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54(6), 743-748. <http://doi.org/10.1080/00103624.2022.2118765>
- Bower, C. A., Reitmeier R. F., & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*, 73(4), 129-173. <https://doi.org/10.1097/00010694-195204000-00001>
- Bower, C. A., & Wilcox, L. V. (1965). Soluble Salts. In A. G. Norman (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy Monograph No. 9. American Society of Agronomy* (pp. 933-951) Madison, WI, USA: American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c11>
- Castellanos, J. Z., Uvalle, B. J. X., & Aguilar, S. A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos, aguas agrícolas, plantas y ECP*. México: Instituto de capacitación para la productividad agrícola.

- Ciesielski, H., Sterckeman, T., Santerne, M., & Willery, J. P. (1997). A comparison between three methods for the determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils. *Agronomie*, 17(1), 9-16.
- Dohrmann, R. (2006). Cation exchange capacity methodology I: An efficient model for the detection of incorrect cation exchange capacity and exchangeable cation results. *Applied Clay Science*, 34(1-4), 31-37. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2005.12.006>
- Elfaki, J., Gafer, M., Sulieman, M., & Ali, M. (2015). Comparison and evaluation of two analytical methods for cation exchange capacity and exchangeable sodium percentage of five soil types in central Sudan. *Open Journal of Soil Science*, 5(12), 311-318. <http://dx.doi.org/10.4236/ojss.2015.512029>
- Fassbender, H. W. (1975). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Turrialba, Costa Rica: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA.
- Gillman, G. P., & Bell, L. C. (1976). Surface charge characteristics of six weathered soils from tropical north Queensland. *Australian Journal of Soil Research*, 14(3), 351-360.
- Guillman, G. P., & Bakker, P. (1979). *The compulsive exchange method for measuring surface charge characteristics of soils*. Townsville, Australia: CSIRO Division of Soils.
- Haby, V. A., Russelle, M. P., & Skogley, E. O. (1990). Testing soils for potassium, calcium, and magnesium. In R. L. Westerman (Ed.). *Soil testing and plant analysis* (pp. 181-227). Madison, WI, USA: Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser3.3ed.c8>
- Hendershot, W. H., Lalonde, H., & Duquette, M. (2007). Ion exchange and exchangeable cations. In M. R. Carter, & E. G. Gregorich (Eds.). *Soil sampling and methods of analysis* (pp. 197-206). Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Henríquez, M., Pérez, J., Gascó, J., & Rodríguez, O. (2005). Determinación de la capacidad de intercambio catiónico en arena y en caolín, con acetato de amonio, acetato de sodio y cloruro de amonio. *Bioagro*, 17(1), 59-62.
- Horton, J. M., & Newson, D. W. (1953). A rapid gas evolution for calcium carbonate equivalent in liming materials. *Soil Science Society of America Journal*, 17, 414-415.
- Jaremko, D., & Kalembsa, D. (2014). A comparison of methods for the determination of cation exchange capacity of soils. *Ecological Chemistry Engineering Society*, 21(3), 487-498. <https://doi.org/10.2478/eces-2014-0036>
- Kong, X., Li, D., Song, X., & Zhang, G. (2021). Comparison of Highly-Weathered Acid Soil CEC Determined by NH₄OAc (pH= 7.0) Exchange Method and BaCl₂-MgSO₄ Forced-Exchange Method. *Agricultural Sciences*, 12(9), 917-927. <https://doi.org/10.4236/as.2021.129059>.
- Nel, T., Bruneel, Y., & Smolders, E. (2023). Comparison of five methods to determine the cation exchange capacity of soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 186(3), 311-320. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200378>
- Pansu, M., & Gautheryou, J. (2006). *Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods*. Heidelberg, Berlin: Springer.
- Pérez-Rosales, A., Galvis-Spínola, A., Bugarín-Montoya, R., Hernández-Mendoza, T. M., Vázquez-Peña, M. A., & Rodríguez-González, A. (2017). Capacidad de intercambio catiónico: descripción del método de la tiourea de plata (AgTU+ n). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1), 171-177.
- Polemio, M., & Rhoades, J. D. (1977). Determining cation exchange capacity: A new procedure for calcareous and gypsiferous soils. *Soil Science Society of America Journal*, 41(3), 524-528.
- Pleysier, J. L., & Jou, A. S. R. (1980). A single extraction method using silver-thiourea for measuring exchangeable cation effective CEC in soils with variable charges. *Soil Science*, 129, 205-211.
- Rodríguez, O., & Rodríguez, A. (2002). Comparación de la CIC en dos suelos, utilizando acetato de amonio, acetato de sodio y cloruro de amonio. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 19(4), 253-263.
- Rhoades, J. D. (1982). Soluble Salts. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Kenney (Eds.). *Methods of soils analysis* (pp. 167-179). Madison WI, USA: American Society of Agronomy.
- Rhoades, J. D. (1982b). Cation exchange capacity. In A. L. Page (Ed.). *Methods of soils analysis Part 2*. Madison WI, USA: American Society of Agronomy.
- SAS Institute. (2016). *Statistical Analysis System SAS/STAT User's Guide. version 9.4*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021 SEMARNAT-2000 antes NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. D. F., México: SEGOB.
- Sumner, M. E., & Davidtz, J. C. (1965). Positive and negative charges in some Natal soils. *South African Journal of Agricultural Science*, 8(4), 1045-1050.
- Sumner, M. E., & Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. In D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, & M. E. Sumner (Eds.). *Methods of soil analysis. Part 3 Chemical Methods* (pp. 1201-1229). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy.
- Zgorelec, Z., Grahovac, B., Percin, A., Jurkovic, V., Gandjaeva, L., & Maurovic, N. (2019). Comparison of two different CEC determination methods regarding the soil properties. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 84(2), 151-158.