

CORRELACION DE DIFERENTES SOLUCIONES EXTRACTORAS EN VERTISOLES Y ULTISOLES DE COSTA RICA¹

Eloy Molina *
Gilberto Cabalceta *

ABSTRACT

Correlation of different extracting solutions for Vertisols and Ultisols of Costa Rica. Five extracting solutions, KCl, Mehlich III, Modified Olsen, Modified Morgan and DPTA were tested in 15 Vertisols and 15 Ultisols from Costa Rica. The soluble phosphorus content, basic cations and extractable oligo-elements were analyzed with each one of the extracting solutions and a correlation analysis was made. An excellent correlation between the Mehlich III and Modified Olsen was found in the P and K extraction, and with the KCl solution in the Ca and Mg determinations in the two orders of soils evaluated. In the determination of Cu and Zn, the Mehlich III was not as effective as expected; besides, when correlated with Modified Olsen, DPTA solution was found more effective in that regard. The best correlation was found when working with DPTA and Olsen solutions in the Cu, Zn and Mn determinations. The correlations between the Modified Morgan and the other extracting methods were very poor.

INTRODUCCION

La evaluación de la fertilidad de un suelo mediante el análisis químico tiene gran importancia porque permite diagnosticar problemas de nutrición y realizar recomendaciones de fertilización.

Para lograr este objetivo es necesario desarrollar métodos apropiados de análisis químico de los suelos para evaluar la disponibilidad de un nutriente en particular. La interpretación del análisis se basa en estudios de correlación y calibración con la respuesta de las plantas a la aplicación de una cantidad adecuada del nutriente.

De acuerdo con Fitts y Nelson (1956), los principales objetivos del análisis de suelo deben ser:

- a) agrupar los suelos en clases para propósitos de fertilización
- b) predecir la probabilidad de respuesta a la aplicación de un nutriente determinado
- c) evaluar la productividad de un suelo
- d) determinar las condiciones específicas de suelo que pueden ser mejoradas por la adición de una enmienda.

Para cumplir estos objetivos es necesario seleccionar un método de análisis apropiado y efectivo que cumpla con los criterios de Bray (1948), que son:

- a) el método debe extraer todas las formas disponibles o una parte proporcional del nutriente en suelos con propiedades ampliamente diferentes

1/

Recibido para publicación el 31 de octubre de 1989.
Centro de Investigaciones Agronómicas, Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

- b) el procedimiento debe ser rápido, reproducible y de bajo costo
- c) las cantidades extraídas deben correlacionar con el crecimiento y respuesta de cada cultivo bajo diversas condiciones (Havlin y Soltanpour, 1982).

Existen gran cantidad de soluciones extractoras que bajo ciertas condiciones cumplen con estos requisitos, sin embargo, es difícil encontrar un extractante universal que sirva para todos los nutrientes y en diversas condiciones de clima y suelo. Por ejemplo, en el caso del P existen varios métodos que han probado ser efectivos, entre los que se destacan Bray I, Bray II, Carolina del Norte, Morgan modificado, Olsen (Kamprath y Watson, 1980), y Olsen modificado (Hunter, 1975).

Sin embargo, en América Latina se han hecho pocos trabajos en calibración y selección de métodos, especialmente en lo que se refiere a elementos menores (Rohman y Cox, 1988).

Recientemente se ha propuesto el uso de algunas nuevas soluciones con características de extractores universales, como la solución Mehlich III (Mehlich, 1984), la solución Morgan modificada (Jones y Wolf, 1984) y el DPTA (Lindsay y Norvell, 1978).

El objetivo del presente estudio fue correlacionar diferentes soluciones extractoras entre sí para P, bases intercambiables y elementos menores en Ultisoles y Vertisoles de Costa Rica con el propósito de comparar el comportamiento de estas nuevas soluciones con las convencionalmente usadas y así, evaluar sus potencialidades de uso en las condiciones locales.

MATERIALES Y METODOS

Se tomaron muestras de suelo a una profundidad de 0-20 cm en 15 suelos del orden Vertisol y 15 del orden Ultisol. En el Cuadro 1 se presenta la ubicación de los suelos muestreados y su clasificación según la Taxonomía de Suelos.

Las muestras se secaron al aire, se molieron y pasaron por una criba de 2 mm. Se utilizaron 5 métodos de extracción que se detallan a continuación.

KCl

Se midió 2,5 ml de suelo con una cuchara volumétrica y se colocó en vasos de extracción de 100 ml. Se agregó 25 ml de KCl 1N con un dispensador y se agitó 10 min a 400 rpm. Luego se

filtró con papel Whatman #42. Se tomó una alícuota del filtrado y se determinó la concentración de Ca y Mg por absorción atómica (Díaz-Romeu y Hunter, 1978).

Olsen modificado

Se midió 2,5 ml de suelo y se colocó en vasos de 100 ml. Se agregó 25 ml de Olsen modificado (NaHCO_3 0,5M, EDTA 0,01M y Superfloc 127) con un dispensador y se agitó 10 min a 400 rpm. Luego se filtró con papel Whatman #42. En el extracto se determinó P en un fotocolorímetro con cloruro estañoso y ácido sulfomolibdico; K y elementos menores en absorción atómica (Díaz-Romeu y Hunter, 1978).

Mehlich III

Se midió 2,5 ml de suelo y se colocó en vasos de 100 ml. Se añadió 25 ml de Mehlich III (HOAc 0,2N, NH_4NO_3 0,25N, NH_4F 0,015N, HNO_3 0,013N, y EDTA 0,001M), y se agitó 5 min a 400 rpm. Luego se filtró con papel Whatman #42. En el extracto se determinó P por colorimetría, y Ca, Mg, K, Cu, Zn y Mn en absorción atómica (Mehlich, 1984).

Morgan modificado

Se midió 15 ml de suelo y se colocó en vasos de 100 ml. Se agregó 30 ml de Morgan modificado (NaOAc 1N, HOAc , DPTA 0,00013M y pH 4,8), se agitó por 5 min a 400 rpm y luego se filtró con papel Whatman #41. En el extracto se determinó P por colorimetría, y Ca, Mg, Cu, Zn y Mn en absorción atómica (Jones y Wolf, 1984).

DPTA

Se midió 10 ml de suelo en vasos de 100 ml y se agregó 20 ml de DPTA (ácido dietilentriamino-pentacético 0,005M, CaCl_2 0,01M y TEA). Se agitó por 20 min y se filtró con papel Whatman #42. En el extracto se determinó, Cu, Zn y Mn por absorción atómica (Gaines y Mitchell, 1979).

Con los resultados obtenidos se hizo un análisis de correlación de los elementos extraíbles con los diferentes métodos.

RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 2 se presentan las cantidades de macronutrientes extraídas por los diferentes métodos en los 2 grupos de suelos.

Cuadro 1. Clasificación y ubicación de los suelos.

Vertisoles	
1.	Typic Pellustert
2.	Typic Pellustert
3.	Typic Pellustert
4.	Typic Pellustert
5.	Typic Pellustert
6.	Typic Pellustert
7.	Typic Pellustert
8.	Typic Pellustert
9.	Typic Pellustert
10.	Typic Pellustert
11.	Typic Pellustert
12.	Typic Pellustert
13.	Typic Pellustert
14.	Typic Pellustert
15.	Typic Pellustert
	Sardinal, Filadelfia, Gte Cañas, Guanacaste Las Tecas, Sta Cruz, Gte Hatillo, Sta Cruz, Gte Coopebagatzi, Bagaces, Gte San Pedro, Sta Cruz, Gte Río Cañas, Sta Cruz, Gte Montecillos, Nicoya, Gte Los Mangos, Gte El Sitio, Sta Cruz, Gte El Porvenir, Filadelfia, Gte Zapote, Nicoya, Gte Nicoya, Gte Filadelfia, Gte Sta Cruz, Gte
Ultisoles	
16.	Typic Rhodustult
17.	Typic Rhodustult
18.	Rhodic Paleudult
19.	Typic Hapludult
20.	Typic Hapludult
21.	Typic Ustoxic Haplohumult
22.	Typic Hapludult
23.	Typic Kandihumult
24.	Typic Haplohumult
25.	Typic Kandistult
26.	Typic Paleustult
27.	Typic Haplustult
28.	Typic Haplustult
29.	Typic Haplohumult
30.	Humic Hapludult
	San Rafael Norte, Pérez Zeledón Piñuela, Osa, Puntarenas Talamanca, Limón Río Claro, Golfito, Puntarenas Palmar Sur, Osa, Puntarenas La Piñera, Buenos Aires, Punt. Alegria, Siquirres, Limón Convento, Pérez Zeledón Volcán, Buenos Aires, Puntarenas Cajón, Buenos Aires, Puntarenas Las Mesas, Pérez Zeledón Uvita, Dominical, Puntarenas San Pablo, Pérez Zeledón Salitre, Buenos Aires Las Eses, Pérez Zeledón

Fósforo

El P extraíble en Olsen modificado varió entre 0,1 y 19 mg/L, con un promedio de 5,3 mg/L, y fue un poco más bajo en los Ultisoles que en los Vertisoles, debido probablemente a la mayor capacidad de adsorción de los suelos ácidos por la presencia de Al intercambiable. El P extraíble en Mehlich III varió entre 0,6 y 40,2 mg/L con un promedio de 8,7 mg/L. La solución Mehlich III presentó una tendencia a extraer un poco más de P que la Olsen modificada. Resultados similares han sido informados por Munter *et al.* (1987).

El P-Mehlich III correlacionó significativamente ($r=0,889$) con P-Olsen modificado (Figura 1), de igual manera como lo han obtenido otros autores:

$P\text{-Mehlich III} = 31,0 + 2,26P\text{-Olsen modificado}$, $r = 0,50$ (Munter *et al.*, 1987); $P\text{-Mehlich III} = -6,91 + 3,08P\text{-Olsen modificado}$, $r=0,79$ (Wolf y Baker, 1985).

De acuerdo con la curva de regresión de la Figura 1, el nivel crítico de P en Olsen modificado estimado en 12 mg/L, corresponde a 22,7 mg/L de P extraído con Mehlich III. De acuerdo con Mehlich (1984), el nivel crítico de P en Mehlich III es de 30 mg/L. Los resultados encontrados con respecto al P indican que la Mehlich III podría resultar efectiva para extraer P disponible en Vertisoles y Ultisoles tal como ha sido indicado por otros autores (Michaelson y Ping, 1986).

Bases intercambiables

Ca

La solución Morgan modificada extrajo más Ca que el KCl y éste más que la solución Mehlich III, tanto en Vertisoles como en Ultisoles (Cuadro 2). Hubo correlación significativa, superior a 0,85 entre los 3 métodos utilizados para extraer Ca (Figura 2).

Cuadro 2. Fósforo y bases intercambiables extraídas con diferentes soluciones extractoras.

	VERTISOLES			ULTISOLES		
	Rango	Prom.	d.e.	Rango	Prom.	d.e.
	mg/L			mg/L		
P-Olsen Modificado	1,30-19,00	6,69	5,45	0,10-13,40	3,80	3,97
P-Mehlich III	2,30-40,20	11,47	9,99	0,60-21,90	5,57	6,79
	cmol (+)/L			cmol (+)/L		
Ca-KCl	29,19-77,80	48,65	12,84	0,71-7,25	2,68	2,19
Ca-Mehlich III	12,50-73,00	42,86	13,17	0,61-6,21	2,63	1,79
Ca-Morgan	8,53-107,25	69,34	24,66	1,40-15,38	5,57	3,77
Mg-KCl	12,10-32,30	22,80	5,51	0,05-3,08		1,21
Mg-Mehlich III	10,00-22,71	19,18	3,65	0,06-2,04	0,76	0,60
Mg-Morgan	0,58-2,54	2,25	0,48	0,05-1,67	0,52	0,46
K-Olsen Modificado	0,16-0,85	0,52	0,21	0,01-0,60	0,27	0,17
K-Mehlich III	0,06-0,94	0,34	0,23	0,03-0,66	0,15	0,16

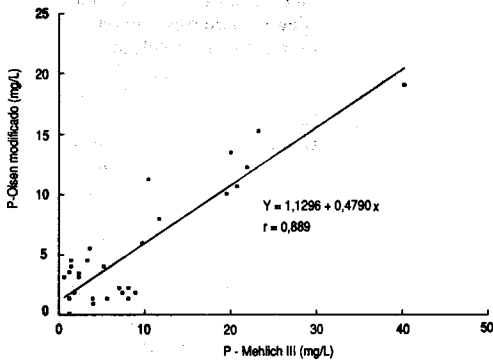


Fig. 1. Correlación entre el P extraído con solución Olsen modificada y Mehlich III.

El Ca es extraído en la Mehlich III por la acción del nitrato de amonio y el ácido nítrico (Hanlon y Johnson, 1984), los cuales actúan en forma muy semejante al KCl.

Mg

Las cantidades de Mg extraíbles con Morgan modificado fueron muy bajas (Cuadro 2), principalmente en Vertisoles, lo cual podría explicarse por el hecho de que la solución Morgan modificada pierde sensibilidad en suelos con pH cercano a la neutralidad y en presencia de carbonatos libres (Jones y Wolf, 1984). La solución Morgan modifi-

cada ha sido recomendada principalmente para suelos ácidos (Wolf, 1982).

Las cantidades de Mg extraídas con KCl y Mehlich III fueron similares (Cuadro 2) y hubo una correlación altamente significativa ($r=0,944$) entre ambos métodos (Figura 3). La relación entre ambos extractantes para Mg fue casi de 1:1.

El Mg extraído con KCl también correlacionó en forma significativa con el extraído con Morgan modificado (Figura 5), sin embargo, como se mencionó anteriormente, las cantidades de Mg extraídas por Morgan modificado fueron muy bajas, al punto que cantidades de 1 cmol(+)/L o menores extraídos con KCl correspondieron con valores muy cercanos a cero con Morgan modificado.

K

El Olsen modificado extrajo mayor cantidad de K que la Mehlich III en ambos grupos y, aunque hubo una correlación positiva ($r=0,72$) entre estos métodos (Figura 4), Mehlich III resultó ineficiente para detectar cantidades menores a 0,20 cmol(+)/L extraídos con Olsen modificado.

Elementos menores

En el Cuadro 3 se presentan los contenidos de elementos menores extraídos por las diferentes soluciones en los 2 grupos de suelos.

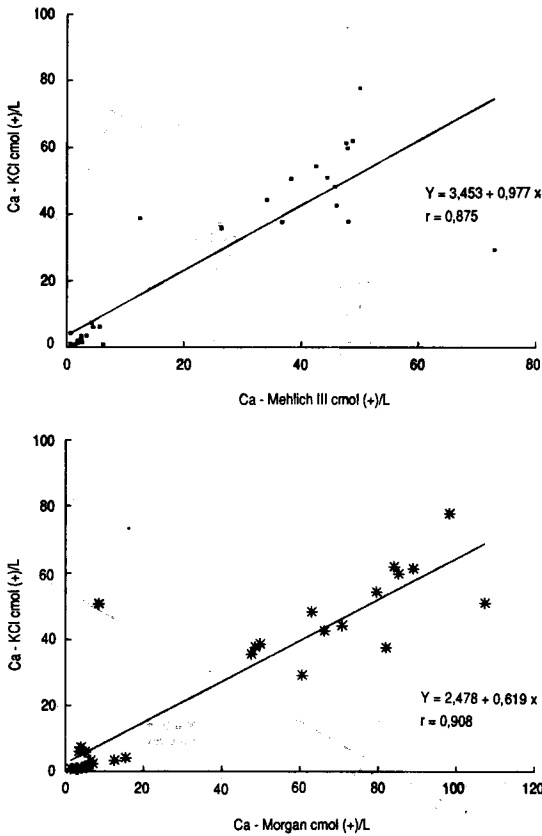


Fig. 2. Correlaciones entre diferentes soluciones extractoras de Ca.

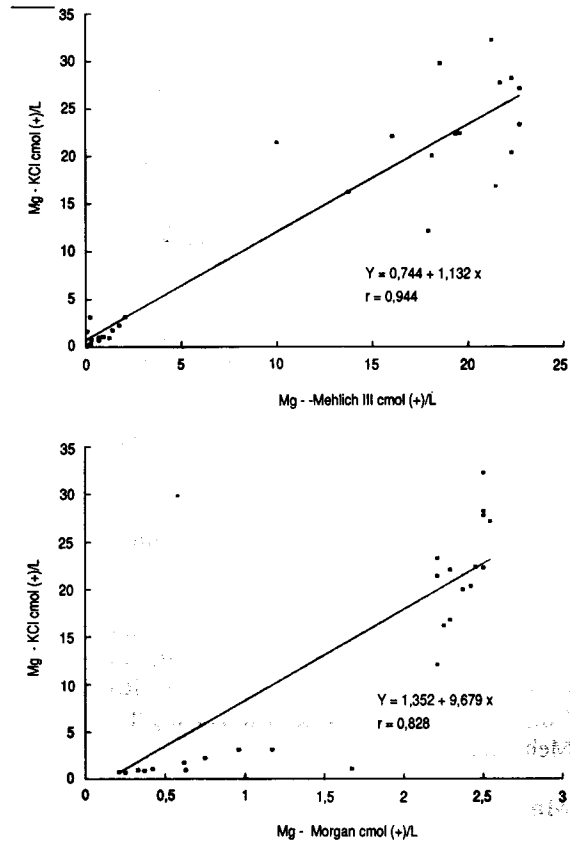


Fig. 3. Correlaciones entre diferentes soluciones extractoras de Mg.

Cu

La solución Mehlich III extrajo la mayor cantidad de Cu. El Cu extraído con Mehlich III, Olsen modificado y DPTA correlacionó entre sí en forma significativa (Figura 5). La mejor correlación se presentó entre Cu-Olsen modificado y Cu-DPTA ($r=0,85$), en donde la relación fue casi 1:1. De acuerdo con la ecuación de regresión, el nivel crítico de Cu-Olsen modificado, de 1 mg/L (Díaz-Romeu y Hunter, 1978), corresponde a 0,83 mg/L de Cu en DPTA. Recientemente, Rohman y Cox (1988) propusieron que el nivel crítico de Cu en Olsen modificado debe ser 0,3 mg/L, en tanto que el nivel crítico de Cu-DPTA es de 0,2 mg/L (Lindsay y Norvell, 1978). Si se utiliza la fórmula de la Figura 5 se obtiene que un contenido de Cu-DPTA de 0,21 mg/L corresponde a 0,3 mg/L de Cu-Olsen modificado. La solución Morgan modificada no fue hábil para extraer Cu disponible y no correlacionó con ningún método. Este extractante

contiene DPTA en una concentración de 0,00013M, que es inferior al de la solución DPTA (0,005M), lo cual probablemente disminuyó su capacidad de extracción de Cu.

Zn

Los contenidos de Zn extraídos en Olsen modificado, Mehlich III y DPTA correlacionaron moderadamente entre sí. La mejor relación se presentó entre el Zn extraído en Olsen modificado y el Zn en DPTA (Figura 6). El nivel crítico del Zn-DPTA es de 0,8 mg/kg (Lindsay y Norvell, 1978), este valor correspondió al 1,18 mg/L de Zn-Olsen modificado en los suelos estudiados. De acuerdo con Rohman y Cox (1988), el nivel crítico de Zn-Olsen modificado es de 1 mg/kg. Los resultados encontrados con estas 2 soluciones en relación al Zn muestran que ambas son efectivas en extraer este micronutriente y sus niveles críticos, estimados con base en la

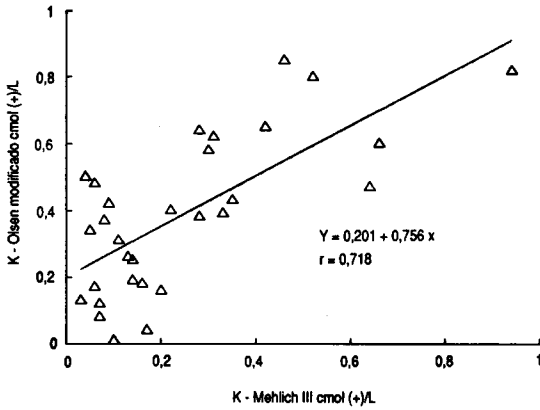
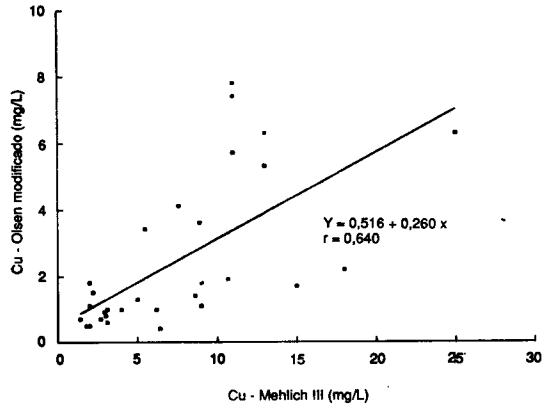


Fig. 4. Correlación entre el K extraído con solución Olsen modificada y Mehlich III.



ecuación de regresión lineal, son similares a los informados en la literatura.

La correlación del Zn-Olsen modificado (Figura 6), con Zn-Mehlich III no fue tan buena ($r=0,464$); sin embargo, el nivel crítico del Zn-Olsen modificado, señalado en 1 mg/L (Rohman y Cox, 1988), correspondió a 1,4 mg/L de Zn-Mehlich III.

Mn

El Mn-Mehlich III no se pudo determinar debido a problemas de contaminación. Los contenidos de Mn extraídos con Olsen modificado, Morgan modificado y DPTA presentaron una correlación alta. El Mn-Olsen modificado

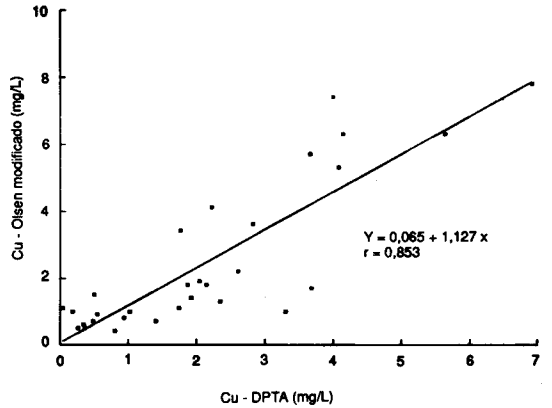


Fig. 5. Correlaciones entre diferentes soluciones extractoras de Cu.

Cuadro 3. Micronutrientes catiónicos extraídos con diferentes soluciones extractoras.

	VERTISOLES			ULTISOLES		
	Rango	Prom.	d.e.	Rango	Prom.	d.e.
	mg/L			mg/L		
Cu-Olsen Modificado	1,00-7,80	3,79	2,43	0,40-4,10	1,13	0,91
Cu-Mehlich III	4,00-25,00	11,56	5,07	1,40-7,60	3,43	1,93
Cu-Morgan	1,00-2,00	1,33	0,49	0,30-3,00	1,23	0,71
Cu-DPTA	1,02-6,92	3,19	1,62	0,04-3,30	1,06	0,99
Zn-Olsen Modificado	0,70-3,80	1,72	0,85	0,30-1,70	0,83	0,42
Zn-Mehlich III	1,00-6,60	3,47	1,40	0,20-3,70	1,66	0,99
Zn-Morgan	0,10-1,20	0,33	0,35	0,10-1,00		0,39
Zn-DPTA	0,58-3,12	1,33	0,66	0,06-1,36	0,53	0,45
Mn-Olsen Modificado	0,30-97,00	20,31	27,53	0,20-40,40	6,27	10,10
Mn-Morgan	14,00-106,20	37,83	27,62	0,60-150,00	29,03	41,81
Mn-DPTA	1,50-62,20	22,47	24,24	0,20-81,00	13,62	21,56

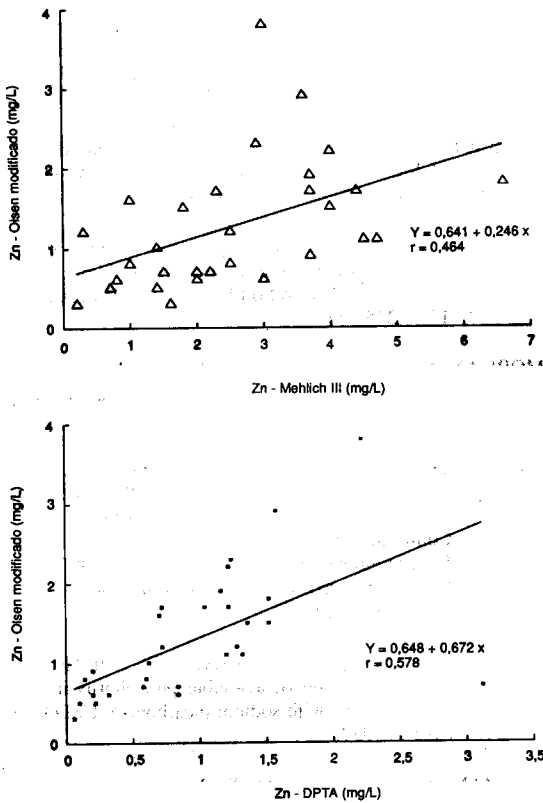


Fig. 6. Correlaciones entre diferentes soluciones extractoras de Zn.

correlacionó con Mn-Morgan modificado ($r=0,74$) y Mn-DPTA ($r=0,96$), y Mn-Morgan modificado correlacionó con Mn-DPTA ($r=0,86$). El orden de extracción del Mn fue Morgan modificado > DPTA > Olsen modificado. La mejor correlación se obtuvo entre Mn-Olsen modificado y Mn-DPTA (Figura 7).

El nivel crítico del Mn-Olsen modificado es de 3 mg/L (Rohman y Cox, 1988), que correspondió a 0,34 mg/L de Mn-DPTA. La solución Olsen modificado fue más sensible a la extracción de Mn en concentraciones de 0-5 mg/L; a partir de ahí, el DPTA fue más extractor.

CONCLUSIONES

Los resultados encontrados muestran que la solución Mehlich III presenta una excelente correlación con Olsen modificado en la extracción de P

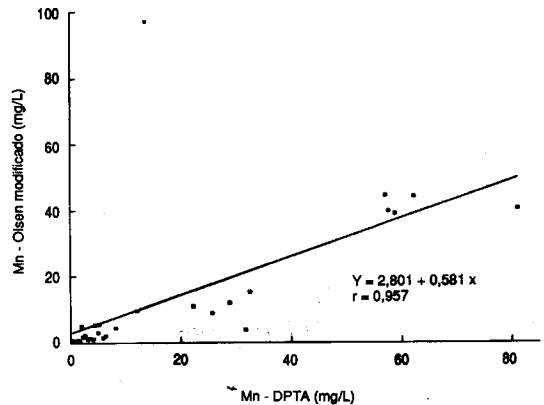


Fig. 7. Correlaciones entre el Mn extraído con Olsen modificado y DPTA.

y K, y con KCl en la determinación de Ca y Mg en Vertisoles y Ultisoles.

La solución Mehlich III no fue tan efectiva en la extracción de Cu y Zn, y aún cuando correlacionó con Olsen modificado el DPTA fue más efectivo. La solución DPTA presentó excelente correlación con Olsen modificado para Cu, Zn y Mn.

La solución Morgan modificada presentó correlaciones muy pobres con los otros métodos, por lo que preliminarmente no parece ser un extractante promisorio para los suelos de Costa Rica.

Se requieren estudios más detallados de correlación y calibración, utilizando una planta indicadora y una mayor variabilidad de suelos, para establecer con mejor criterio la conveniencia y eficiencia de los métodos evaluados en este trabajo. Sin embargo, los resultados preliminares indican que Mehlich III y DPTA pueden ser alternativas viables para los análisis de suelos en Costa Rica, por lo que se recomienda tomarlas en consideración en estudios posteriores.

RESUMEN

Fueron estudiadas 5 soluciones extractoras: KCl, Olsen modificado, Mehlich III, Morgan modificado y DPTA, en 15 Ultisoles y 15 Vertisoles de Costa Rica. Se analizó el P extraíble, las bases intercambiables y los elementos menores extraídos con cada solución y se realizó un análisis de correlación.

La solución Mehlich III presentó una excelente correlación con Olsen modificado en la extracción de P y K, y con KCl en la determinación de

Ca y Mg en Vertisoles y Ultisoles. Mehlich III no fue tan efectiva en la extracción de Cu y Zn, y además cuando se correlacionó con Olsen modificado el DPTA fue más efectivo. La solución DPTA presentó excelente correlación con Olsen modificado para Cu, Zn y Mn. La solución Morgan modificada presentó correlaciones muy pobres con los otros métodos.

LITERATURA CITADA

- DIAZ-ROMEU, R.; HUNTER, A. 1978. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 68 p.
- FITTS, J.W.; NELSON, W.L. 1956. The determination of lime and fertilizer requirements of soils through chemical test. *Advances in Agronomy* 8:241-282.
- GAINES, T.P.; MITCHEL, J.A. 1979. Chemical methods for soil and plant analysis. Tifton, University of Georgia. 105 p. (*Agronomy Handbook* no. 1)
- HANLON, E.A.; JOHNSON, G.V. 1984. Bray/Kurtz, Mehlich III, AB/D and ammonium acetate extractions of P, K and Mg in four Oklahoma soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15(3):227-294.
- HAVLIN, J.L.; SOLTANPOUR, P.N. 1982. Greenhouse and field evaluation of the NH_4HCO_3 -DPTA soil test for Fe. *Journal of Plant Nutrition* 5:764-783.
- HUNTER, A. 1975. Nuevas técnicas y equipo para análisis de suelos de rutina. *In* Manejo de suelos de América Tropical. Ed. por E. Bornemiza y A. Alvarado. Raleigh, North Carolina State University. p. 467-483.
- JONES, J.R.; WOLF, B. 1984. Manual of soil testing procedure using modified (Wolf) Morgan extracting reagent. Athens, Georgia, Benton laboratories. 61 p.
- KAMPRATH, E.J.; WATSON, M.E. 1980. Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. *In* The role of phosphorus in agriculture. Ed. by F.E. Khasawneh *et al.* Madison, Wisconsin, ASA. p. 471-514.
- LINDSAY, W.C.; NORVELL, W.A. 1978. Development of DPTA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42:421-428.
- MEHLICH, A. 1984. Mehlich 3 soil extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15:1409-1416.
- MICHAELSON, G.J.; PING, C.L. 1986. Extraction of phosphorus from the major agricultural soils of Alaska. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 17(3):275-297.
- MORGAN, M.F. 1941. Chemical soil diagnosis by the universal testing system. Connecticut Agricultural Exp. Sta. Bull. 450.
- MUNTER, R.; ELIASON, R.; FLAUS, M. 1987. A comparison of Mehlich III soil extractant with conventional extractants on typical Minnesota soil. *In* Committee on soil testing and plant analysis and the Subcommittee on soil extractants. (13., 1987, Saint Louis, Missouri). University of Minnesota, St. Paul, Minnesota, NCR.
- OLSEN, S.R.; COLE, C.V.; WATANABE, F.S.; DEAN, L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extractions with sodium bicarbonate. USDA circular no. 939.
- RHOMAN, P.C.; COX, F.R. 1988. Evaluation of the modified Olsen extraction reagent for copper, zinc and manganese. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 19(16):1859-1870.
- SOLTANPOUR, P.N.; SCHWAB, A.P. 1977. Evaluation of efficient soil test for simultaneous extraction of micronutrients in alkaline soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 8:195-207.
- WOLF, B. 1982. An improved universal extracting solution and its use for diagnosing soil fertility. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 3(12):1005-1033.
- WOLF, A.M.; BAKER, D.E. 1985. Comparison of soil test phosphorus by Olsen, Bray-P1, Mehlich 1 and Mehlich 3 methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 16:467-484.