

TRABAJO ORIGINAL

CORRECCIÓN DE SUELOS ÁCIDOS DE LA PAMPA HÚMEDA PARA LA PRODUCCIÓN DE ALFALFA

Correction of acid soils of the humid pampa for the alfalfa production

VÁZQUEZ¹, M., PIRO, A., MILLÁN, G. Y LANFRANCO, J.

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales - Universidad Nacional de La Plata

RESUMEN

Suelos de áreas subhúmedas y húmedas templadas pueden tener problemas ligados a la acidez como consecuencia de prácticas de producción agrícola no repositivas. Se planteó como objetivo desarrollar pautas para el diagnóstico específico de esta problemática en la región pampeana. Con este propósito fue llevado a cabo un ensayo de invernáculo con alfalfa (**Medicago sativa** L.) sobre suelos ácidos de 9 localidades, clasificados como Argjudol Típico, Argjudol Vértico y Hapludol Típico. Los tratamientos fueron el agregado de cantidades equivalentes a 0, 650, 1300 y 2000 kg ha⁻¹ de CaCO₃ y CaCO₃/MgCO₃. Se incluyeron medidas de: materia seca; análisis químicos del suelo de caracterización de la problemática de acidez mediante la determinación de capacidad de intercambio catiónica (CIC), Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Al³⁺, Fe³⁺, saturación básica (V), pH, textura y análisis específicos de requerimiento de enmienda a través de los métodos de curva de titulación (CT), métodos de buffer simple y doble (SMP;BD); H de cambio (H). La respuesta de la alfalfa a la dosis y tipo de tratamiento fue dependiente del suelo. Se concluyó que los análisis de necesidad de enmiendas desarrollados para otras regiones edafo-climáticas no fueron adecuados para el diagnóstico de estos suelos ácidos utilizados como única herramienta. Se desarrollaron modelos diagnóstico multivariantes estadísticamente significativos, los cuales incluyeron Ca²⁺, Ca²⁺/Mg, CIC, V, textura y BD. La validación a campo de estos modelos permitirá probar su utilidad para el manejo del cultivo de la alfalfa.

Palabras clave: alfalfa, **Medicago sativa** L, Pampa húmeda, suelos ácidos, diagnóstico.

SUMMARY

*Soils of subhumid and humid temperate areas may have acidity problems, a consequence of soil-depletive crop-production practices. It was proposed as objective to develop a diagnostic guidelines specific for Pampa region. To this purpose green-house experiments with alfalfa (**Medicago sativa** L) were done on acid soils derived from nine locations, classified as Typic Argjudoll, Vertic Argjudoll and Typic Hapludoll. The treatments were equivalents quantities of 0, 650, 1300 and 2000 kg ha⁻¹ of CaCO₃ and CaCO₃/MgCO₃. Testing included: dry matter, acid soil-chemical tests with the determination of cation exchange capacity (CIC), Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Al³⁺, Fe³⁺, bases saturation (V), pH, texture; and the lime-requirement specific tests of titration*

Recibido: 10 de octubre de 2002

Aceptado: 11 de marzo de 2003

1. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. Av. 60 y 119 (1900) La Plata. E-mail: mevazquez@infovia.com.ar

curve (CT); simple and double buffer methods (SMP;BD); H exchange (H)). Alfalfa response to the dose and type was dependent on the soil. We concluded that lime-requirement analyses developed for other edapho-climatic regions were not an adequate stand-alone diagnostic tool for these acid soils. We have developed statistically significant multivariate diagnostic models which include Ca^{2+} , Ca^{2+}/Mg^{2+} , CEC, V, texture and BD testing. Field validation of these models will prove their usefulness for the management of alfalfa crops.

Key words: alfalfa, *Medicago sativa* L, humid Pampa, acid soil, diagnostic.

INTRODUCCIÓN

El complejo proceso de acidificación de los suelos acontece naturalmente a través de la pérdida de bases por lavado y erosión, con su posterior reemplazo por Al^{3+} , Fe^{3+} e H^+ en el complejo de intercambio. La actividad del hombre puede incidir en la acidificación del suelo principalmente a través de la exportación de bases por los productos agropecuarios, disminución de la capacidad buffer por pérdida de materia orgánica y otros coloides, así como el empleo de fertilizantes acidificantes. Algunos suelos de regiones templadas subhúmedas/húmedas como la pampeana argentina, ajenos a la problemática por causas naturales, están padeciendo fenómenos de esta índole debido a la historia productiva de los mismos, que en muchos casos supera la centuria. Cabe destacar que en estas circunstancias además de una acidificación en términos generales, se produce un desbalance de bases, igualmente perjudicial para el crecimiento de las plantas (Vázquez, Baridon, Lanfranco y Malagrina, 2000). Este fenómeno afecta especialmente a los cultivos de leguminosas, entre las que revisten especial importancia la alfalfa (*Medicago sativa* L.) y la soja (*Glicine max* L. Merr). El tratamiento más difundido de los suelos afectados por esta problemática es el agregado de materiales correctores de pH, sin considerar la compleja problemática enunciada, en su totalidad. Con el objetivo de dimensionar las dosis de enmienda a utilizar, se han desarrollado una variedad de técnicas analíticas, en general provenientes de regiones tropicales, donde el fenómeno es fundamentalmente genético y la condición de acidez extrema. Ambas razones señalarían la

inconveniencia de su aplicación en otras regiones sin ajustes locales. Se plantea como hipótesis que a causa de la probable existencia de diferentes fuentes de acidez, capacidad buffer y aún desbalances específicos de nutrientes básicos, el diagnóstico debe ser integrador de estos aspectos y adecuado regionalmente. El objetivo del presente trabajo es generar pautas para el diagnóstico de la problemática asociada a la acidez en los suelos de la Pampa Húmeda Argentina para la producción de alfalfa.

MATERIALES Y MÉTODOS

El objetivo propuesto fue abordado mediante el muestreo de suelos, su evaluación química y la realización de una prueba biológica de invernáculo utilizando alfalfa.

Naturaleza de los suelos, muestreo y procesamiento de las muestras

En este estudio se emplearon suelos desarrollados sobre material loésico, clasificados como Argiudol Típico, Argiudol Vértico y Hapludol Típico según Soil Taxonomy (Soil Service Staff, 1998) provenientes de localidades ubicadas en una extensa área subhúmeda y húmeda templada comprendidas entre 34E y 38E de latitud Sur, y 56,5E y 64E de longitud Oeste, cuyos regímenes térmico e hídrico son térmico y údico respectivamente (Wanbeke y Scoppa, 1975). En cada situación se obtuvieron muestras compuestas de 10 submuestras (0 - 20cm), sobre una superficie de estudio de aproximadamente 50 ha en cada caso, las cuales fueron secadas al aire y tamizadas por malla de 2 mm.

Ensayo de invernáculo

Fue conducido a través de un diseño estadístico completamente al azar con arreglo factorial, con 3 repeticiones. Las unidades experimentales fueron macetas con 700 g de suelo.

Los tratamientos fueron los siguientes: **T**, testigo sin agregados; **T1 Ca**, CaCO_3 equivalente a una dosis de 650 kg ha^{-1} ; **T2 Ca**, CaCO_3 equivalente a una dosis de 1300 kg ha^{-1} ; **T3 Ca**, CaCO_3 equivalente a una dosis de 2000 kg ha^{-1} ; **T1Ca/Mg**, $\text{CaCO}_3 / \text{MgCO}_3$ equivalente a una dosis total de 650 kg ha^{-1} , respetando la relación frecuente de la dolomita de $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} = 1,7$; **T2 Ca/Mg**, $\text{CaCO}_3 / \text{MgCO}_3$ equivalente a una dosis total de 1300 kg ha^{-1} ; **T3 Ca/Mg**, $\text{CaCO}_3 / \text{MgCO}_3$ equivalente a una dosis total de 2000 kg ha^{-1} . La elección de Ca y Mg como formulaciones de corrección se basa en el hecho que estos elementos son los componentes mayoritarios de la capacidad de intercambio catiónica de estos suelos, por su poder neutralizante y la amplia difusión de su empleo. Las dosis utilizadas fueron seleccionadas de manera de cubrir las cantidades de uso frecuente de estas enmiendas en la región, supeditadas en la mayor parte de los casos al costo del insumo y su aplicación.

El CaCO_3 y MgCO_3 utilizados fueron de calidad proanálisis y tamizados por malla de 0,2 mm. Fueron aplicados al suelo y enérgicamente mezclados para el posterior llenado de las macetas. En cada maceta se desarrollaron 10 plantas de alfalfa (**Medicago sativa** L.) cultivar SPS Dual grupo de latencia invernal 4, previamente inoculada con **Bradyrhizobium meliloti**, durante 6 meses.

Se condujeron macetas con idénticos tratamientos pero sin vegetación, a los efectos de evaluar los tratamientos sin la extracción de las plantas. Todas fueron regadas periódicamente con agua destilada, manteniendo la humedad al 90% de su capacidad de campo. La cosecha se realizó cortando a ras la parte aérea de las plantas en estado de prefloración, para posterior evaluación del peso seco por maceta.

Análisis físicos y químicos

Las muestras de suelo fueron analizadas para realizar una caracterización de la problemática de acidez mediante las siguientes metodologías: pH en agua, relación suelo:agua de 1: 2,5; pH en KCl 1 mol L^{-1} , relación suelo: KCl de 1: 2,5; capacidad de intercambio catiónica (CIC) y cationes intercambiables, método del acetato de NH_4^+ 1 mol L^{-1} pH 7, posterior determinación de NH_4^+ mediante destilación microKjeldahl; Ca^{2+} y Mg^{2+} por complejometría con EDTA; Na^+ y K^+ mediante fotometría de llama; Al^{3+} y Fe^{3+} mediante espectrometría de plasma de argón (Bhigam, 1996); textura por densimetría de Bouyoucos (Forsythe, 1975). A partir de estos análisis se procedió al cálculo del porcentaje de saturación de bases (V) y la proporción de cada base respecto del mismo (Ca^{2+}/V ; Mg^{2+}/V ; $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{V}$; K^+/V). A los fines de evaluar la capacidad predictiva de los métodos de diagnóstico de corrección de acidez utilizados con mayor frecuencia en los laboratorios de suelos, se determinó la necesidad de enmienda mediante los siguientes análisis: curva de titulación (**CT**) mediante soluciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $0,015 \text{ mol L}^{-1}$ (Abruña y Vicente, 1955); método del buffer (**SMP**) con buffer de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, K_2CrO_4 , p-nitrofenol y acetato de Ca (Mc Lean, Eckert, Reddy y Trierweiler, 1978); método del buffer doble (**BD**) con buffer de TRIS, imidazol, K_2CrO_4 , piridina, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Yuan, 1974); método del **H de cambio** evaluado a través del cambio de pH del acetato de NH_4^+ 1 mol L^{-1} pH 7 (Richter, Conti y Macarini, 1982). **A posteriori** del ensayo se midió pH (relación suelo: agua de 1: 2,5) sobre las macetas sin vegetación, a fin de apreciar la modificación de la variable según la dosis y el tipo de sustancia agregada.

Análisis estadístico

Los resultados de materia seca vegetal fueron evaluados mediante el análisis de la varianza con arreglo factorial, siendo los factores: suelo, tipo/dosis de sustancia agregada y su interacción. La asociación de las variables fue estudiada a través de correlaciones simples

de Pearson. Los modelos de respuesta de materia seca en función de las medidas analíticas fueron desarrollados mediante el método de selección decreciente de variables "paso a paso" (Mendenhall, Scheaffer y Wackerly, 1986).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características generales de los suelos y diagnóstico de la necesidad de corrección por métodos tradicionales

La caracterización física y química de los suelos estudiados se presenta en el Cuadro 1.

Del mismo se desprende que los suelos poseen pH actual (suelo: agua) comprendido entre 5,1 y 6,4; valores considerados de fuerte a ligeramente ácidos, mientras que el pH potencial (suelo : solución de KCl) abarca el rango de 4,4 a 5,8; calificados como muy fuertemente a medianamente ácidos respectivamente (Schoeneberger, Wysocki, Benham y Broderson, 2000). Si en lugar de usar una expresión como el pH, se utiliza su equivalente, la actividad de H ($[H^+]$), la dispersión de ambas medidas se toma sensiblemente mayor, de un orden superior al 90%, mostrando la variabilidad, en este sentido, de los suelos evaluados.

CUADRO 1: Resultados de los análisis físicos y químicos de los suelos usados en un experimento de corrección de acidez.

Table 1: *Physic and chemistry analytical results of the soils that had been used in an acid correction test.*

Determinación	Unidades	Suelos									CV (%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
pH (H ₂ O)	-	6,4	6,0	5,5	5,8	5,7	6,0	5,4	6,0	5,1	6,8
[H ⁺](H ₂ O)	mol L ⁻¹	4E-07	1E-06	3E-06	2E-06	2E-06	1E-06	4E-06	1E-06	8E-06	96,2
pH (KCl 1mol L ⁻¹)	-	5,3	5,3	4,4	4,8	5,0	5,1	4,9	5,8	4,7	8,1
[H ⁺](KCl 1mol L ⁻¹)	mol L ⁻¹	5E-06	5E-06	4E-05	2E-05	1E-05	8E-06	1E-05	2E-06	2E-05	88,3
Ca ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	13,9	9,1	7,0	9,8	9,5	8,0	12,0	8,1	7,6	23,6
Mg ²⁺	"	2,7	3,9	3,0	2,7	2,6	2,3	3,0	2,1	1,7	23,5
Na ⁺	"	0,4	0,3	0,6	0,3	0,5	0,2	0,1	0,4	0,5	42,7
K ⁺	"	1,8	1,7	1,1	1,5	1,5	1,4	1,2	1,8	0,7	25,7
H ⁺	"	1,34	1,56	0,91	0	0	0,47	1,12	0	1,78	88,3
CIC	"	23,5	17,5	15,2	17,7	16,1	15,1	20,6	19,1	13,5	17,7
Ca ²⁺ /Mg ²⁺	-	5,1	2,3	2,3	3,6	3,7	3,5	4,0	3,9	4,5	24,8
(Ca ²⁺ + Mg ²⁺)/K ⁺	-	9,2	7,6	9,1	8,3	8,1	7,4	12,5	5,7	13,3	27,0
Ca ²⁺ /V	%	74,1	60,6	59,8	68,5	67,6	67,2	73,6	65,5	72,4	7,7
Mg ²⁺ /V	"	14,4	26	25,6	18,9	18,5	19,3	18,4	17	16,2	20,4
K ⁺ /V	"	9,6	11,3	9,4	10,5	10,7	11,8	7,4	14,6	6,7	23,1
Saturación (V)	"	79,8	85,8	77,0	80,8	87,3	78,8	79,1	64,7	77,8	8,1
Clase textural	-	fr	fr-A	fr	fr	fr	fr-L	fr-a	fr-a-L	fr-a	

Al³⁺ y Fe³⁺ intercambiables: inferiores en todos los suelos al límite de detección de la metodología utilizada (0,10 mg kg⁻¹). fr: franco, A: arenoso, a: arcilloso, L: limoso.. Suelos: 1(Tres Arroyos), 2 (Lincoln), 3 (Bavio), 4 (Pergamino), 5 (Luján), 6 (Baradero), 7 (Azul), 8 (C. Casares), 9 (Etcheverry). CV: Coeficiente de Variación

A pesar de la condición de acidez manifestada por el pH, las cantidades de Al^{3+} y Fe^{3+} intercambiables son extremadamente bajas, propiedad que los diferencia de los suelos ácidos de regiones tropicales. La CIC comprende valores desde medios a altos (13,5 a 23,5 cmolc kg^{-1}), siendo la saturación básica (V) variable, desde cifras considerablemente bajas (64,7%) a medias (87,3%) (Darwich, 1998). Las diferentes condiciones texturales, y las ya comentadas de CIC y V, señalarían posibilidades reguladoras de la reacción del suelo variables, aspecto que conjuntamente con el valor de pH, llevaría a la necesidad de un diagnóstico particularizado en cada tipo de suelo.

Las bases intercambiables, las relaciones Ca^{2+}/Mg^{2+} , $(Ca^{2+} + Mg^{2+})/K^{+}$, así como los porcentajes de las bases respecto de la saturación básica en su conjunto, son medidas analíticas también de apreciable variabilidad, pero cabe destacar que estas medidas, fundamentalmente usadas con frecuencia para la

evaluación de la disponibilidad de nutrientes básicos, abarcan valores que sugerirían condiciones de deficiencias relativas, en especial de Ca^{2+} (Fassbender, 1980; Mora y Demanet, 1999). La nutrición de diferentes especies vegetales en materia de nutrientes básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}), entre ellas la alfalfa, obedece tanto a las cantidades absolutas de estas bases como a las relaciones entre sus concentraciones (Borie, Gallardo, Mora y García, 1999; Demanet, Schnettler y Mora, 1999). Dados estos antecedentes, podría sugerirse para los suelos estudiados que el desarrollo de la alfalfa en los mismos, podría estar condicionado por las concentraciones relativas de las bases y valores de pH; aspectos que debieran ser contemplados en el diagnóstico.

No obstante lo expuesto y dada la difusión de algunas técnicas analíticas basadas exclusivamente en la corrección de pH, en el Cuadro 2 se consignan las dosis de $CaCO_3$ sugeridas en base a ellas para alcanzar pH 7.

CUADRO 2: Necesidades de enmienda según diferentes métodos diagnósticos usados en un experimento de corrección de acidez.

Table 2: Lime-requirements according to different diagnostic methods that had been used in an acid correction test.

Localidad	Taxonomía de suelo	Métodos diagnóstico					
		CT	BD	SMP	H ⁺ 1 vez	H ⁺ 2 vez	H ⁺ 3 vez
		(kg ha ⁻¹ CaCO ₃)					
Tres Arroyos	Argiudol Típico	1500	2730	1214	1340	2680	4020
Lincoln	Hapludol Típico	1000	3569	1055	1560	3120	4680
Bavio	Argiudol Típico	3720	5977	1684	910	1820	2730
Pergamino	Argiudol Típico	1928	6067	1388	0	0	0
Luján	Argiudol Típico	2370	5140	1915	0	0	0
Baradero	Argiudol Vértico	2400	3782	1275	470	940	1410
Azul	Argiudol Típico	6600	6077	1332	1120	2240	3360
C. Casares	Hapludol Típico	750	2540	912	0	0	0
Etcheverry	Argiudol Típico	3600	7337	1376	1780	3560	5340

CT: Curva de titulación; BD: buffer doble; SMP: buffer simple; H⁺: H de cambio.

Cabe mencionar que de acuerdo a los resultados de las investigaciones de Conti, Maccarini y González (1983), que sugirieron la conveniencia de establecer múltiplos de la dosis estimada según el H de cambio (Richter y otros, 1982), en el Cuadro 2 se señalan los cálculos en base a la evaluación de H de cambio 1, 2 y 3 veces. Los resultados aludidos permiten afirmar la existencia de una gran variabilidad en la magnitud de las recomendaciones de acuerdo al método utilizado. Esta disparidad de resultados para un mismo suelo derivaría de la diferencia de los principios analíticos de los métodos, en relación a la naturaleza de la acidez en cada suelo en particular. Contribuirían a dicha disparidad aspectos tales como la indeterminación del tiempo requerido para alcanzar el equilibrio en las curvas de titulación (Mc Lean y otros, 1978; Alley y Zelazny, 1987), las diferentes estrategias de acción de las soluciones buffer (Sims y Dennis, 1989), o la probabilidad de ignorar otras fuentes de acidez, responsables de la misma manera, de la problemática asociada a la reacción del suelo cometida por el método del H de cambio. Este último concepto queda evidenciado en los resultados de los suelos de Pergamino, Luján y C. Casares, los cuales poseyendo pH actual igual o inferior a 6 y "V" variable (Cuadro 1), no producen

cambios en el pH del acetato de NH_4^+ tras la percolación, por lo que arrojan resultados nulos de H de cambio (Cuadro 2), en forma discordante con la naturaleza de la acidez de los mismos. Esta supuesta anomalía del método, de subevaluación en algunos casos, podría estar ligada a la naturaleza del poder regulador del acetato de NH_4^+ en relación a la de los suelos evaluados, a la vez que habría sido la causa de la necesidad de utilizar una corrección a través de múltiplos (2 y 3 veces) de la cantidad de enmienda necesaria para llegar a pH 7, utilizada por los autores.

Ensayo de invernáculo: respuesta de la alfalfa al agregado de CaCO_3 y $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$

El análisis de varianza permitió comprobar con un nivel de probabilidad $p < 0,01$ (Cuadro 3), que la respuesta de la alfalfa al agregado de enmiendas interactúa con el tipo de suelo ensayado, de lo que se desprende la invalidez del análisis de los factores principales estudiados (suelo, tipo/dosis de sustancia agregada). Estos resultados señalan la necesidad de diagnosticar el requerimiento de enmienda en cada situación edáfica, seleccionando no solamente dosis variables, si no también eligiendo la formulación más apropiada.

CUADRO 3: Análisis de la varianza de la materia seca aérea vegetal en un ensayo de invernáculo con alfalfa.

Table 3: Analyse of the variance of dry aerial vegetal material in an alfalfa greenhouse try.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculada	prob.
Suelo	48,36	8	6,05	41,44	$p < 0,01$
Tipo/dosis	1,89	6	0,31	2,16	$p < 0,05$
Interacción	15,13	48	0,32	2,16	$p < 0,01$
Residual	18,39	126	0,15		

Del conjunto de suelos estudiados se pueden reconocer tres respuestas diferentes de tipo general que se visualizan a través de los suelos de Bavio, Luján y Etcheverry en la Figura 1. La respuesta en materia seca de la alfalfa

en el suelo de Bavio manifestó un aumento de producción al agregado de CaCO_3 / MgCO_3 , comparable para las 3 dosis ensayadas, aunque no hubo respuesta positiva al agregado de CaCO_3 cuando éste fue utilizado como única

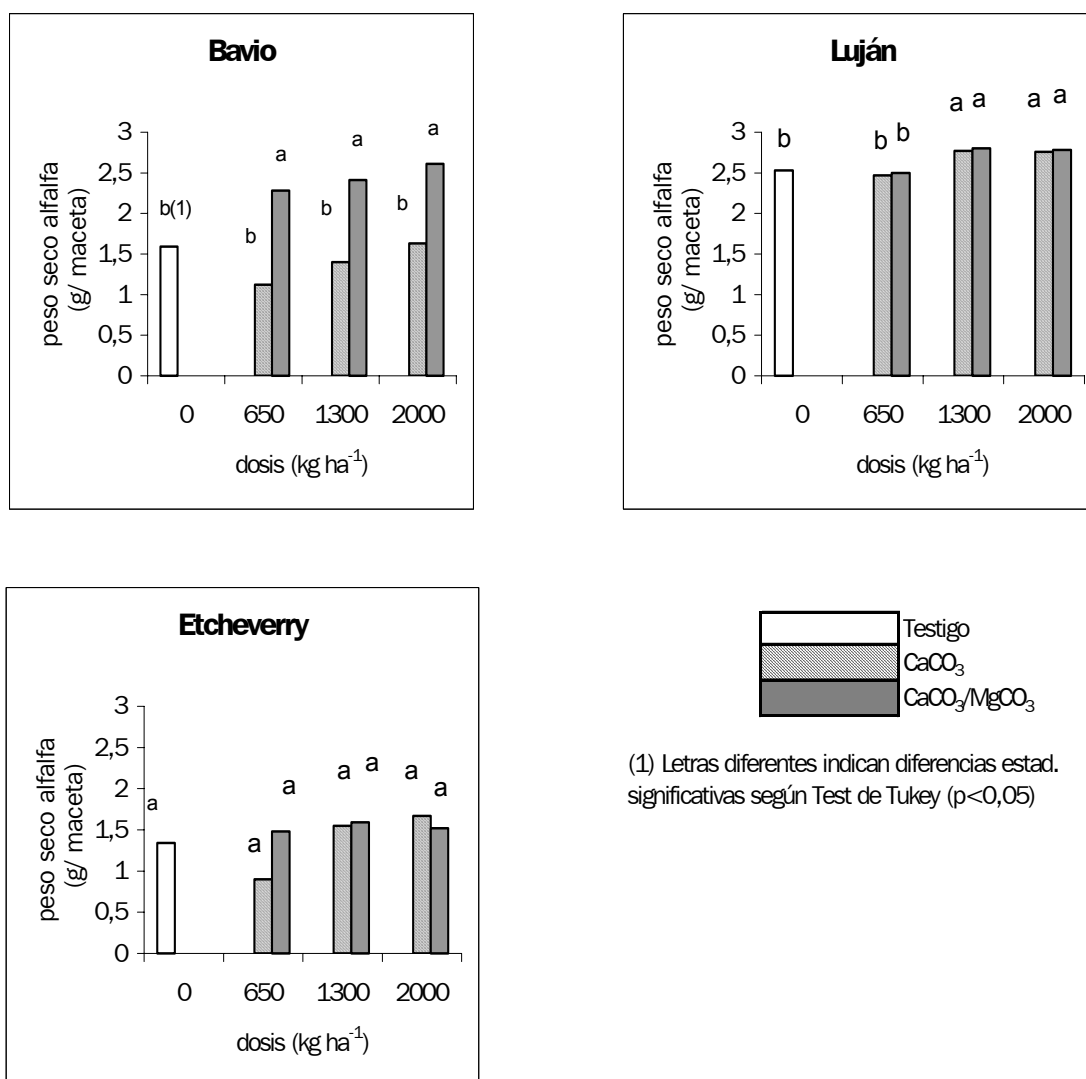


FIGURA 1: Peso seco de alfalfa (g / maceta) según tratamiento corrector (CaCO_3 , $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$, kg ha⁻¹) en los suelos de Bavio, Luján y Etcheverry.

Figure 1: Dry plant yield of alfalfa according to lime-treatment (CaCO_3 , $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$, kg ha⁻¹) in the soils of Bavio, Luján y Etcheverry.

enmienda. Debe destacarse que este suelo posee uno de los niveles más bajos de pH en agua y el más bajo en KCl. Cabe observar que los métodos de necesidad de enmienda (CT, BD, SMP, H de cambio) prescribían dosis sensiblemente superiores a T1Ca/Mg, hecho que no se condice con la respuesta medida, a la vez que podría ser conducente a mayores desequilibrios del sistema. El suelo de Luján manifestó un comportamiento comparable para ambos enmiendas, y respuesta significativa a las dosis equivalentes a 1300 y 2000 kg ha⁻¹, no evidenciándose diferencias entre ambas. El tercer suelo considerado, Etcheverry, dio respuesta estadísticamente no significativa a los distintos tratamientos. Debe destacarse que este suelo posee, sin embargo, valores muy bajos de pH en agua y KCl. Adicionalmente, la producción de materia seca de la alfalfa, independientemente del tratamiento, fue considerablemente menor que en el resto de los

suelos. Es probable que otras cualidades edáficas no evaluadas en este estudio hayan sido responsables de los sucesos, pero se demuestra claramente la complejidad en el diagnóstico y la variabilidad de la respuesta de la alfalfa al tipo de enmienda y su dosis.

En el Cuadro 4 se presentan las asociaciones de las mediciones analíticas de todos los suelos estudiados respecto de la respuesta de la materia seca vegetal a la distintas dosis y tipo de sustancia agregada (peso seco del tratamiento con enmienda menos peso seco del testigo). Se aprecia en dicho cuadro que existieron, fundamentalmente, asociaciones estadísticamente significativas entre algunas mediciones analíticas de los suelos y la respuesta al agregado de CaCO₃/MgCO₃. Puede destacarse que el Ca²⁺ intercambiable, la relación Ca²⁺/Mg²⁺ y la proporción de Ca²⁺/V, se asociaron significativamente (p<0,05) con la respuesta de la alfalfa al agregado de Ca²⁺

CUADRO 4: Correlaciones entre variables edáficas y respuesta de la alfalfa al agregado de diferentes enmiendas en dosis equivalentes de 650 (T1), 1.300 (T2) y 2000 (T3) kg ha⁻¹.

Table 4: Correlations between soil variables and alfalfa yield with addition of different lime-treatments in doses equivalents of 600 (T1), 1300 (T2) y 2000 (T3) kg ha⁻¹.

	T1Ca - T (1)	T2Ca - T	T3Ca - T	T1Ca+Mg - T	T2Ca+Mg - T	T3Ca+Mg - T
pH(H ₂ O)	0,02	-0,29	-0,38	-0,64 **	-0,61*	-0,55*
pH(KCl 1 mol L ⁻¹)	-0,22	0,06	-0,42	-0,65**	-0,40	-0,33
Ca ²⁺	0,28	-0,05	0,06	-0,74**	-0,87***	-0,75**
Mg ²⁺	-0,18	0,19	-0,46	0,22	0,13	0,09
Ca ²⁺ /Mg ²⁺	0,28	-0,15	0,44	-0,80***	-0,78***	-0,72**
Ca ²⁺ /V	0,39	-0,03	0,39	-0,66**	-0,77***	-0,63**
Mg ²⁺ /V	-0,37	0,09	-0,44	0,77***	0,68**	0,60*
CIC	0,08	-0,06	-0,13	-0,71**	-0,70**	-0,59*
V	0,26	0,16	0,10	0,06	-0,14	-0,59*
Arena	-0,46	0,40	-0,24	-0,19	0,04	0,11
Limo	0,50	-0,47	0,32	0,13	-0,08	-0,13
Arcilla	-0,51	0,54	-0,47	0,07	0,19	0,21
Curva Titulación	0,10	-0,01	0,06	0,33	0,36	0,17
Yuan	0,29	0,29	0,55*	0,59*	0,47	0,44
Buffer doble	0,43	-0,11	0,49	0,37	0,27	0,21
H ⁺	-0,64**	-0,13	-0,06	0,04	-0,24	-0,33

Nivel de significancia: *: p<0,10. **: p<0,05. ***: p<0,01. (1) diferencia entre la materia seca entre los tratamientos con CaCO₃ y CaCO₃/MgCO₃ y el testigo.

y Mg^{2+} en todas las dosis. Un comportamiento similar, aunque con menor significancia estadística, se manifestó con pH en agua, Mg^{++}/V y CIC. Lo anterior cuestionaría el empleo de las dosis emanadas de métodos tales como CT, BD y SMP (Cuadro 2) cuando éstos son empleados como único elemento de diagnóstico.

Dada la importancia que tradicionalmente se asigna al pH para el diagnóstico y la administración de enmiendas, en la Figura 2 se ilustra el cambio de pH producido en los 3 suelos tras el agregado de las sustancias correctoras e incubación de las macetas sin vegetación en iguales condiciones que las

sufridas por las macetas con alfalfa. En todos los casos el incremento de pH producido por ambos tipos de enmiendas es similar, sin embargo el aumento de pH a iguales dosis es diferente en los 3 suelos. El suelo de Bavio registró el mayor incremento (0,60 y 0,85 unidades de pH para dosis de 1300 y 2000 $kg\ ha^{-1}$ respectivamente) y Etcheverry el menor (0,25 y 0,30 unidades de pH respectivamente). La diferente capacidad reguladora de los suelos evidenciada, podría ser la causa de lo acontecido e invalida el empleo de esta medida como único elemento diagnóstico, a los fines de establecer recomendaciones de corrección.

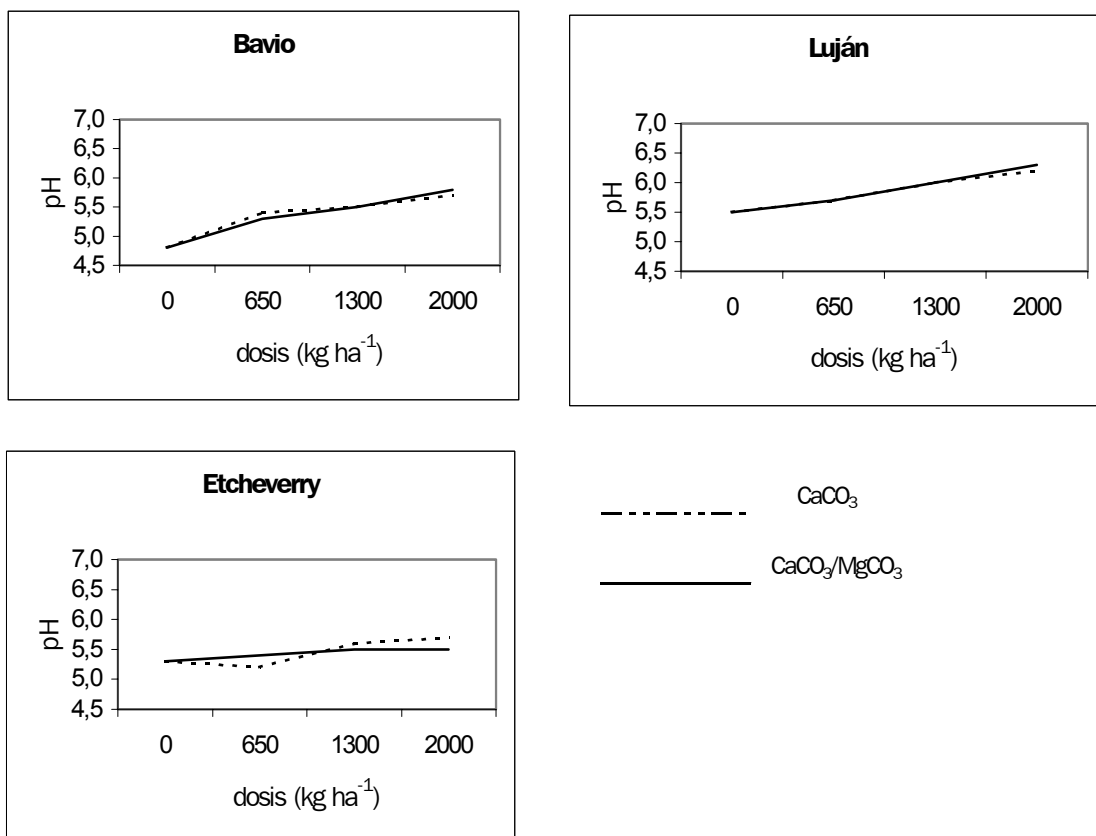


FIGURA 2: Evolución del pH del suelo sin vegetación con diferentes productos y dosis de corrector.
Figure 2: Evolution of edaphic pH without vegetation with different types and doses of lime.

Diagnóstico multivariante

Habiéndose demostrado la asociación de la respuesta de la alfalfa al agregado de $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$ con distintas variables analíticas del suelo, se procedió a la evaluación de modelos multivariantes mediante métodos estadísticos de selección de variables. En el Cuadro 5 se transcriben dos modelos de elevada significancia estadística. De estos se desprende que la evaluación conjunta de mediciones analíticas del suelo, incluido el método de BD en un caso, permite predecir el comportamiento de la alfalfa con un elevado grado de certeza. Dichas medidas analíticas son Ca^{2+} intercambiable,

relación $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, CIC, V y condiciones texturales.

Estos resultados confirman la hipótesis de lo inapropiado de la aplicación de metodologías de diagnóstico de la problemática, desarrolladas en otras condiciones edafo-climáticas como únicas medidas de la necesidad de enmienda.

Será necesario desarrollar en el futuro investigaciones que permitan verificar la validez de estos modelos para condiciones de campo, y ajustar los coeficientes de las variables independientes en tal caso.

CUADRO 5: Modelos multivariantes de la respuesta de la alfalfa al agregado de enmiendas.
Table 5: Multivariate models of alfalfa yield with addition of lime

Variable dependiente	R^2 / R^2 correg.	Variables independientes	β_i	p_i
T1CaMg - T	91,5 / 86,5	cte.	0,58	0,09
		Ca^{2+}	-0,06	0,07
		$\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$	-0,15	0,02
		BD	0,11	0,02
T2CaMg - T	94,2 / 88,4	cte.	7,18	0,002
		Arena	0,06	0,006
		Arcilla	-0,19	0,08
		CIC	-0,22	0,02
		V	-0,007	0,007

R^2/R^2 correg.: coeficiente de determinación del modelo sin y con corrección por número de variables. β_i : coeficiente de la variable independiente. p_i : probabilidad de la variable en el modelo. BD: buffer doble V: saturación básica.

CONCLUSIONES

- Se demostró una considerable variabilidad de las condiciones físico químicas de los suelos de la región estudiada, vinculadas a la acidez y la respuesta al agregado de sustancias correctoras. Esto conllevaría a la necesidad de utilizar metodologías diagnósticas integradoras de dichas condiciones.

- La respuesta de la alfalfa al agregado de CaCO_3 y $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$ en dosis equivalentes comprendidas entre 650 y 2000 kg ha^{-1} fue variable de acuerdo al suelo, reafirmando la

conveniencia del empleo de modelos predictivos integradores.

- Los métodos diagnósticos de necesidad de enmienda evaluados (CT, BD, SMP, H de cambio), conducen a recomendaciones sobredimensionadas de gran variabilidad y por lo tanto invalidan la determinación de la dosis a emplear cuando son usados como único elemento de diagnóstico.

- La evaluación conjunta de medidas analíticas del suelo (Ca^{++} intercambiable, relación $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$, CIC, V y condiciones texturales) incluido el método de BD, permite

predecir el comportamiento de la alfalfa con un elevado grado de certeza en condiciones de invernáculo. Será necesario desarrollar en el futuro investigaciones que permitan verificar la validez de estos modelos para condiciones de campo.

AGRADECIMIENTOS

A los alumnos de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales Ross, Fernando y Enrique, Hugo, y al personal de apoyo Sres. D. Gómez y L. Basaldúa, por la colaboración en la conducción del ensayo de invernáculo así como en tareas de laboratorio.

BIBLIOGRAFÍA

- ABRUÑA, F. y VICENTE, J. 1955. Requirement of a quantitative method for determining the lime requirement of soil. *Journal of Agric. of the University of Puerto Rico* 39: 41-45.
- ALLEY, M.M. y ZELAZNY, L.W. 1987. Soil acidity: Soil pH and lime needs. p. 65-72. *In*: J.R. Brown (ed.). *Soil Testing: sampling, correlation, calibration and interpretation*. SSSA Spec. Publ. 21, Wisconsin, USA.
- BIGHAM, J.M. 1996. *Methods of soil analysis*. Part 3: Chemical Methods. SSSA Book series NE 5 Ed. SSSA, ASA. Madison Wisconsin. USA. 1390 p.
- BORIE, B.F., GALLARDO, F.A., MORA, M.L.G. y GARCÍA, J.C. 1999. Sensibilidad y tolerancia a la acidez de los cultivos en condiciones de campo. *Frontera Agrícola (Chile)* 5 (1 - 2): 19-28.
- CONTI, M.E., MACCARINI, G. y GONZÁLEZ, M. 1983. Método rápido de corrección de suelos ácidos. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 1 (1): 15-20.
- DARWICH, N. 1998. *Manual de Fertilidad de Suelos y Uso de Fertilizantes*. Ed. Agar Cross. 182 p.
- DEMANET, R.F., SCHNETTLER, B.M. y MORA, M.L.G. 1999. Efecto del encalado y su relación con los nutrientes sobre la producción de pasturas en suelos ácidos. *Frontera Agrícola (Chile)* 5 (1- 2): 95-110.
- FASSBENDER, H.W. 1980. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Cap. 5. 1ra Ed. 2da. reimpresión, IICA, San José, Costa Rica. 398 p.
- FORSYTHE, W. 1975. *Física de Suelos*. Manual de Laboratorio. Cap. 6: 46-69. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Costa Rica. 212 p.
- MC LEAN, E.O., ECKERT, D.J., REDDY, G.Y. y TRIERWEILER, F.J. 1978. An improved SMP soil lime requirement method incorporating double-buffer and quick-test features. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 311-316.
- MENDENHALL, W., SCHEAFFER, R. y WACKERLY, D. 1986. *Estadística matemática con aplicaciones*. 3ª. ed. Grupo Editorial Iberoamericana, California, USA. 751 p.
- MORA, M. y DEMANET, R. 1999. Uso de enmiendas calcáreas en suelos acidificados. *Frontera Agrícola (Chile)* 5 (1-2): 43-58.
- RICHTER, M., CONTI, M. y MACCARINI, G. 1982. Mejoras en la determinación de cationes intercambiables, ácidos intercambiables y capacidad de intercambio catiónica en suelos. *Rev.Fac.Agron. (Argentina)* 3(2):145-155.
- SCHOENEBERGER, P.J., WYSOCKI, D.A., BENHAM, E.C. y BRODERSON, W.D. 2000. Libro de campaña para descripción y muestreo de suelos. Versión 1.1. Instituto de Suelos, Centro de Recursos Naturales, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina. Traducción en español del "Field Book for Describing and Sampling Soils", 1998. Centro Nacional de Relevamiento de Suelos, Servicio de Conservación de Recursos Naturales, Dto. de Agricultura EEUU, Lincoln, Nebraska 9 (10) p.
- SIMS, J.T. y DENNIS, L. 1989. Evaluation of lime requirement methods for Delaware Soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal* 20: 1279-1926.
- SOIL SERVICE STAFF. 1998. *Keys to Soil Taxonomy*. 8th Ed. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 869 p.
- VÁZQUEZ, M.E., BARIDON, E., LANFRANCO, J.W. y MALAGRINA, G. 2000. Evaluación de la potencialidad de la problemática de acidez en la región norte de la provincia de Buenos Aires. Com. 1 Panel 58. *In*: Actas XVIII Con-

- greso Argentino de la Ciencia del Suelo, 11-14 de abril, Mar del Plata, Argentina.
- WANBEKE, A. VAN y SCOPPA, C.O. 1975. Los regímenes térmicos e hídricos de los suelos argentinos calculados sobre la base de los registros climáticos. In: Actas 7E Reunión de la Ciencia del Suelos. Bahía Blanca, Argentina. 165 p.
- YUAN, T.L. 1974. A double buffer method for the determination of lime requirement of acid soil. *Soil Sci. Soc. Am.J.* 38: 437-440.