

DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD BUFFER Y DOSIS DE CaCO_3 DE LOS SUELOS DEGRADADOS DEL DISTRITO DE ÑÜRÜM, CERRO PELADO, COMARCA NGÄBE BUGLE, PANAMÁ

DETERMINATION OF THE BUFFER CAPACITY AND CaCO_3 DOSE OF DEGRADED SOILS IN THE DISTRICT OF ÑÜRÜM, CERRO PELADO, NGÄBE BUGLE REGION, PANAMA

*Ruiz-Morales, Giancarlo A. Universidad Tecnológica de Panamá, Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica (CITT), Panamá. giancarlo.ruiz@utp.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-0862-9968>

Menéndez-Sierra, Antonio. Consultor independiente de Ciencias Agrícolas, Panamá. amenendez90@hotmail.com <https://orcid.org/0000-0003-3407-123X>

Fossatti-Carrillo, Aníbal. Universidad Tecnológica de Panamá, Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica (CITT), Panamá. anibal.fossatti@utp.ac.pa <https://orcid.org/0000-0003-4284-3500>
DOI <https://doi.org/10.48204/j.ia.v6n1.a4519>

*Autor de Correspondencia: giancarlo.ruiz@utp.ac.pa

Recibido: 04/05/2023

Aceptado: 17/10/2023

RESUMEN. Una de las formas de evaluar la capacidad de respuesta en el tiempo de enmiendas agrícolas, es a través de la aplicación de carbonato de calcio sobre la acidez intercambiable, pH, P, bases de intercambio y micronutrientes de suelos ácidos. Con la finalidad de conocer la capacidad buffer del suelo y dosis de carbonato de calcio se utilizó un diseño factorial 5x6x3 con cinco tratamientos de carbonato de calcio, seis subtratamientos de tiempo de muestreo y tres repeticiones cada uno. Los resultados de los tratamientos mostraron que el pH de los suelos del distrito de Ñürüm es relativamente bajo y que el mismo se pueden mejorar con aplicaciones de carbonato de calcio, ya que al conocer la capacidad buffer del suelo se deja en evidencia los efectos más importantes de las dosis de cal aplicadas sobre el contenido de Ca y el pH del suelo y las relaciones de estos con los demás nutrientes. El solo hecho de mantener el suelo a humedad de campo por 15 días hace que cambie la composición química y disminuya el pH aproximadamente en 0,5 unidades, debido presumiblemente al aumento de la actividad microbiana y a la liberación de ácido fosfórico a la solución de suelo. Sin embargo, las dosis de carbonato de calcio aplicadas solo incrementaron el calcio cambiante y el pH en presencia de humedad. No se alcanzó la capacidad buffer ya que la mejor combinación usada (4000 kg de carbonato de calcio x 15 días de incubación) no fue suficiente para elevar el pH en una unidad, no obstante, se observó una relación entre la dosis de cal y el pH ($\text{pH}=4.83+0.000116 \times \text{kg de cal aplicada}$) por lo que asumiendo que el maíz requiere un $\text{pH} > 5.5$ pueden considerarse como adecuadas las dosis mayores a 5.5 ton de cal por hectárea.

PALABRAS CLAVE: *Capacidad buffer, carbonato de calcio, suelos degradados, Ñürum.*

ABSTRACT. One of the ways to evaluate the response capacity over time of agricultural amendments is through the application of calcium carbonate on the exchangeable acidity, pH, P, exchange bases and micronutrients of acidic soils. In order to know the buffer capacity of the soil and doses of calcium carbonate, a 5x6x3 factorial design was used with five calcium carbonate treatments, six sampling time sub treatments and three repetitions each. The results of the treatments showed that the pH of the soils in the Ñürüm district are relatively low and that they can be improved with applications of calcium carbonate, since knowing the buffer capacity of the soil makes the most important effects evident. of the doses of lime applied on the Ca content and pH of the soil and the relationships of these with the other nutrients. The mere fact of maintaining the soil at field humidity for 15 days causes the chemical composition to change and the pH to decrease by approximately 0,5 units, presumably due to the increase in microbial activity and the release of phosphoric acid to the soil solution. However, the applied doses of calcium carbonate only increased exchangeable calcium and pH in the presence of moisture. The buffer capacity was not reached since the best combination used (4000 kg of calcium carbonate x 15 days of incubation) was not enough to raise the pH by one unit, however, a relationship was observed between the dose of lime and the pH ($\text{pH}=4.83+0.000116 \times \text{kg of lime applied}$) so assuming that corn requires a $\text{pH} > 5.5$, doses greater than 5.5 tons of lime per hectare can be considered adequate.



KEYWORDS: *Buffer capacity, calcium carbonate, degraded soils, Ñürum.*

INTRODUCCIÓN

El distrito de Ñürüm se encuentra ubicado dentro de la Comarca Ngäbe-Buglé, formando parte de un paisaje donde predominan los terrenos accidentados y las altas precipitaciones, factores que inciden sobre la erosión y la lixiviación de los suelos, favoreciendo la acidez, todo lo que afecta la producción.

Los suelos predominantes son los Ultisoles, que representan cerca del 40% del territorio de Panamá. Estos suelos se caracterizan por presentar elevada acidez y alta saturación de aluminio, lo que hace necesario el uso de enmiendas y encalado para lograr el máximo aprovechamiento de la actividad agropecuaria. (Villarreal José, et al., 2010).

En las últimas décadas, la acidificación de los suelos se ha ido acelerando, debido a la exportación de nutrientes básicos, sin reposición, a través de la producción agraria de vegetales, carne o leche; a la aplicación de fertilizantes nitrogenados amoniacales en dosis altas y crecientes (Burle et al., 1997; Limousin y Tessier, 2007; Xu et al. 2012); a la expansión de la siembra directa, con su acumulación de materia orgánica en la superficie (Burle et al., 1997; Tang, 1998), a lo que se adiciona la lixiviación natural de las bases presentes en el suelo (Na, K, Ca y Mg), particularmente alta en suelos de mucha pendiente, textura gruesa y/o que se deforestan y alistan quemando la cubierta vegetal.

Desde el punto de vista de la nutrición vegetal los perjuicios de una reducción del pH, son:

1. La disminución de la reserva de los nutrientes básicos.
2. Los desbalances entre nutrientes. (Pellegrini et al., 2002; Pellegrini et al., 2004; Vázquez et al., 2003).
3. La toxicidad de aluminio, hierro y manganeso, cuando los valores descienden por debajo de 5.3-5.5 (Oorts et al. 2004; Millán et al. 2010; Xu et al. 2012).

Estos fenómenos son progresivos, ya que la reducción de pH trae como consecuencia una merma en la capacidad de intercambio catiónico, debido a la reducción de cargas variables negativas de los coloides y en consecuencia, hay menores posibilidades de retener las reducidas bases existentes (Blake et al., 1999) lo que conduce a un ciclo cerrado.

El tratamiento a este problema se basa en el empleo de productos básicos, generalmente derivados de la minería como caliza, dolomita y yeso, entre otros, y para determinar la dosis del producto a emplear se han usado diferentes procedimientos, siendo lo más popular el uso del pH como indicador. En consecuencia, las investigaciones se han centrado en conocer el rango de pH óptimo para las diferentes especies de cultivos, para después tratar de corregirlo utilizando un enmendante, aunque la reducción de la producción de los cultivos a pH bajo, posiblemente, esté relacionada con otros factores edáficos como los niveles de Al y Mn, el contenido de materia orgánica y/o el material genético utilizado para la siembra (Vázquez y Pagani, 2015).

La capacidad reguladora o buffer de un suelo se define como la resistencia que tiene el suelo a cambiar el pH cuando se le adicionan sustancias ácidas o básicas, lo que depende del contenido y

tipo de acidez, el tipo de arcilla, la presencia de sales, el contenido de materia orgánica y del pH inicial del suelo (Zapata Hernández, 2004; Van Rensburg et al. 2009) y es utilizada para estimar la cantidad de enmendante que hay que aplicar para modificar el pH de forma permanente.

Existen varios métodos que permiten la determinación rápida de las necesidades de encalado de los suelos. (Fernando J. y Ramírez R., 2002; Álvaro I, 2012)

1. Bradfield y Allison (1933). **Titulación-equilibrio del suelo** con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, donde cantidades crecientes de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ son agregadas a las suspensiones de suelo. La curva de titulación se ajusta a cierto pH, con la intersección de la curva ascendente del pH y la horizontal correspondiente a la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ añadido para alcanzar la condición de pH deseado.
2. Woodruff (1948). Método de la **solución reguladora de pH**. El método consiste en el uso de una solución reguladora de acetato y p-nitrofenol que experimenta una variación de pH lineal de acuerdo al H^+ intercambiable presente en el suelo dentro del intervalo de pH comprendido entre 6,0 y 7,0. La mezcla es ajustada a pH 7 y cada 0,2 mmol de H^+ adicionado causa la caída del pH en 0,1 unidades dentro del intervalo mencionado. Shoemaker *et al.* (1961), modificaron esta técnica utilizando una solución de baja capacidad reguladora consistente en una mezcla diluida de trietanolamina, p-nitrofenol, cromato de potasio y acetato de calcio.
3. Yuan (1974). Técnica de **doble solución reguladora**, la que consiste en equilibrar dos alícuotas de la misma muestra de suelo, con dos soluciones reguladoras de la misma composición, pero con diferente pH (6,0 y 7,0 respectivamente). La determinación de las necesidades de encalado de los suelos se calcula mediante una fórmula basada en las lecturas de pH de ambas soluciones buffer, este método demostró una alta precisión para medir la acidez de una amplia gama de suelos del sudeste de Estados Unidos.
4. Barrow y Cox (1990). **Incubaciones breves** y consiste en mezclar diferentes cantidades de CaCO_3 con pequeñas cantidades de suelo, estos son humedecidos a capacidad de campo e incubados durante algún tiempo a temperatura de 60°C , al término del cual se miden el pH, determinándose así la cantidad de cal necesaria para neutralizar la acidez del suelo. Estos autores demostraron que la mayor parte del cambio de pH ocurre rápidamente y la velocidad de la reacción aumento con la temperatura. De esta experiencia concluyeron que es posible producir, en pocos días a 60°C , efectos similares a los ocurridos durante meses a temperatura ambiente.

El método, usado para este trabajo y, que es considerado mundialmente como referencia para la evaluación de otras técnicas (Tran y Van Lierop, 1982), consiste en estimar las necesidades de encalado, a partir de la curva obtenida, luego de incubar los suelos con carbonato de calcio o alguna otra base por un tiempo, que varía de acuerdo con el tipo de suelo, la temperatura de incubación y la base empleada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio se tomó suelo de 0 – 20 cm de profundidad, extraído de diferentes puntos de un área experimental de 1000 m^2 , se usó el sistema de sobre cerrado, con un azadón y una pala. El

área se seleccionó previamente, en la escuela de Ñürüm, lugar donde se realizó el estudio de dosis de encalado.

El suelo se depositó en una bolsa y se homogenizó, y se conformó un estudio con lotes de 5 dosis de carbonato de calcio (tratamientos) que se tomaron en diferentes momentos (tiempo de incubación) con un espacio de 15 días entre muestras, replicados en tres ocasiones.

Se empleó un diseño factorial 5x6x3 con cinco tratamientos de carbonato de calcio (4000 kg/ha, 2000 kg/ha, 1000 kg/ha, 500 kg/ha y 0 kg/ha), seis subtratamientos de tiempo de muestreo después de la aplicación (0 días, 15 días, 30 días, 45 días y 60 días) y tres repeticiones cada uno.

Se utilizaron 90 potes plásticos que se rellenaron con 500 g de suelo cada uno, organizados, por periodo de incubación, tratamientos y, finalmente, por repeticiones, en una mesa, a temperatura ambiente y se analizaron en el tiempo correspondiente.

Se utilizó carbonato de calcio No 120 y se aplicó en seco, se mezcló uniformemente con el suelo de cada pote y cada dosis por separado, se llevó al 80 % de capacidad de campo, con agua desionizada. Una vez alcanzada la capacidad de campo cada pote se pesó y se fijó el peso. Cada dos días el peso de los potes y la capacidad de campo mantenida agregando agua hasta el peso correspondiente.

Al término de cada periodo de incubación las muestras se secaron al aire y se tamizaron para determinar: K, P, Fe, Zn, Cu, Mn por Olsen Modificado; Ca, Mg, Acidez por KCl: 1N y pH en H₂O en el laboratorio “Agro análisis” de Costa Rica.

Los datos se analizaron empleando técnicas uní y multivariadas, de varianza, correlación no paramétrica, regresión, análisis de factores con rotación por varimax, coordenadas y componentes principales, y la técnica de Chernoff, todas incluidas y descritas en el paquete estadístico Statgraphics Centurion v18. (Statpoint Technologies, Inc., 2014) que fue usado en el procesamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Conociendo el efecto que tiene el pH sobre el comportamiento de los elementos que determinan el estado nutricional de los cultivos; que el pH de los suelos del distrito de Ñürüm es relativamente bajo (< 5,1; IDIAP 2006) y, que el mismo se puede mejorar con aplicaciones de carbonato de calcio, se implementó el estudio de determinación de la capacidad buffer del suelo, donde evidentemente los efectos más importantes son los de las dosis de cal aplicadas sobre el contenido de Ca y el pH del suelo y las relaciones de estos con los demás elementos.

En la Tabla 1 se muestra el análisis de varianza para el contenido de calcio intercambiable. En el mismo se aprecian efectos significativos sobre el contenido de calcio tanto de las dosis aplicadas como del tiempo de incubación (F = 6,04 con α de 0,0153 y 32,63, con α de 0,0004 respectivamente), sin que existieran diferencias entre réplicas ni interacciones.

Tabla 1*Análisis de Varianza para Ca - Suma de Cuadrados Tipo III.*

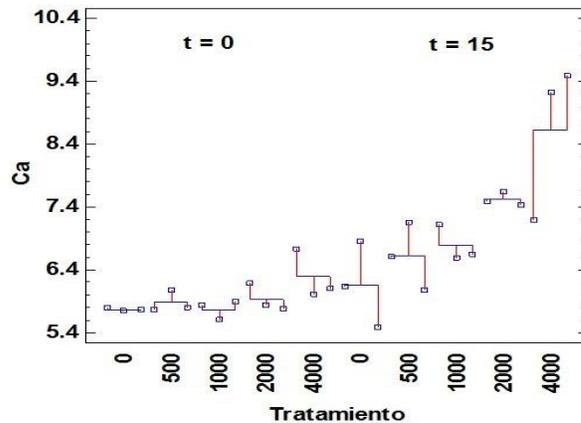
| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|-----------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| EFFECTOS PRINCIPALES | | | | | |
| A: Tiempo | 10,9929 | 1 | 10,9929 | 32,63 | 0,0004 |
| B: Tratamiento | 8,14039 | 4 | 2,0351 | 6,04 | 0,0153 |
| C: Repetición | 0,300207 | 2 | 0,150103 | 0,45 | 0,6554 |
| INTERACCIONES | | | | | |
| AB | 3,57015 | 4 | 0,892537 | 2,65 | 0,1123 |
| AC | 0,795287 | 2 | 0,397643 | 1,18 | 0,3555 |
| BC | 1,57729 | 8 | 0,197162 | 0,59 | 0,7674 |
| RESIDUOS | 2,69501 | 8 | 0,336877 | | |
| TOTAL (CORREGIDO) | 28,0712 | 29 | | | |

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Como era de esperar las aplicaciones de cal incrementan los contenidos de Ca^{2+} en el suelo (Figura 1), no obstante, resulta mucho mayor el efecto que ejerce el periodo de incubación de la muestra que la dosis de cal aplicada y los mejores resultados (contenidos de calcio más altos) se consiguen con la combinación de ambos (15 días de incubación y 4000 kg de CaCO_3).

Figura 1

Efectos del periodo de incubación y la dosis de cal sobre el contenido de calcio del suelo en el distrito de Ñürüm.



Al ingresar al suelo el agua produce un nuevo equilibrio químico, este equilibrio depende de la solubilidad de los elementos presentes en el, de la cantidad de CO_2 que contiene el suelo y de la cantidad y tipo microorganismos presentes y se debe a un efecto físico: aumento de volumen y corrimiento de las placas de la micela de suelo que libera nutrientes; un efecto químico: al solubilizar una parte de los minerales y reaccionar con el CO_2 del suelo formando ácido carbónico y un efecto biológico: al reactivar la vida microbiana, ya que como se sabe los microorganismos reaccionan fácil y rápidamente a los estímulos ambientales.

En un estudio de enclado es importante diferenciar los efectos de la dosis de cal de los efectos de la incubación, ya que como se comprenderá, al llevar las muestras a capacidad de campo y mantenerlas inalteradas a temperatura ambiente por varios días, se influye sobre muchas variables y los parámetros de efectos específicos son difíciles de determinar, ya que hay un gran número de variables influyentes que pueden ser, incluso, desconocidas, o no constantes; es por ello que la varianza en los ensayos es crítica para los procesos de detección de efectos y de interpretación de datos.

Las variaciones del pH en agua con las condiciones de incubación y las aplicaciones de cal se muestran en la Tabla 2. Como se aprecia el comportamiento de la varianza es similar al del Ca^{2+} siendo afectados, igual, sólo por el periodo de incubación y la dosis de cal, sin que existieran interacciones significativas. ($F = 160,02$, con α de 0,0000 y 4,63 con α de 0,0314 respectivamente).

Tabla 2
Análisis de Varianza para pH - Suma de Cuadrados Tipo III.

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|-----------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| EFFECTOS PRINCIPALES | | | | | |
| A: Tiempo | 1,61008 | 1 | 1,61008 | 160,02 | 0,0000 |
| B: Tratamiento | 0,186467 | 4 | 0,0466167 | 4,63 | 0,0314 |
| C: Repetición | 0,00056 | 2 | 0,00028 | 0,03 | 0,9726 |
| INTERACCIONES | | | | | |
| AB | 0,120667 | 4 | 0,0301667 | 3,00 | 0,0872 |
| AC | 0,0237067 | 2 | 0,0118533 | 1,18 | 0,3561 |
| BC | 0,121373 | 8 | 0,0151717 | 1,51 | 0,2874 |
| RESIDUOS | 0,0804933 | 8 | 0,0100617 | | |
| TOTAL (CORREGIDO) | 2,14335 | 29 | | | |

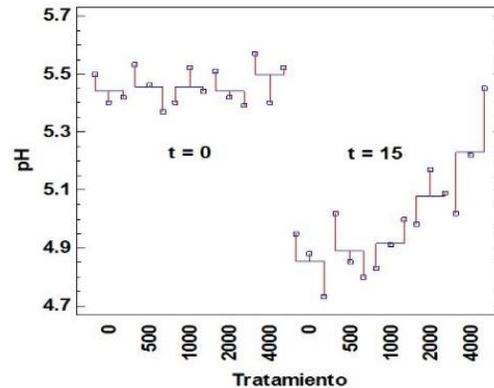
Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

No obstante, cuando se observa la Figura 2, en los componentes de la varianza se aprecia una caída del pH de 0,5 unidades, debido a la adición de agua al 80% de la capacidad de campo y los 15 días de incubación. En la misma pueden observarse dos poblaciones, la primera sin humedad y sin tiempo de incubación, donde la dosis de cal prácticamente no influyó sobre el pH y otra con una alta influencia de la cal sobre el pH, aunque con un valor inicial medio punto porcentual más bajo. ($t_{0\text{Ca}0}$: 5.4567; $t_{15\text{Ca}0}$: 5.0073).

Figura 2



Efectos del periodo de incubación y la dosis de cal sobre el pH en agua del suelo en el distrito de Muran.



Esta caída del pH del suelo puede deberse a que, en condiciones de humedad óptima y calor, se activa un proceso de crecimiento y desarrollo de microorganismos, que reducen la materia orgánica, liberando ácido adicional. Se puede observar en la Figura 3 que este ácido adicional provoca que el pH del suelo descienda, lo que hace soluble a todo el fósforo orgánico unido al suelo y, por lo tanto, más disponible, contribuyendo también a la acidez. Este proceso de liberación de ácido provocado por el fósforo se conoce como hiperliberación y puede pasar muy rápidamente, pudiendo llegar la caída hasta 2.0 unidades de pH.

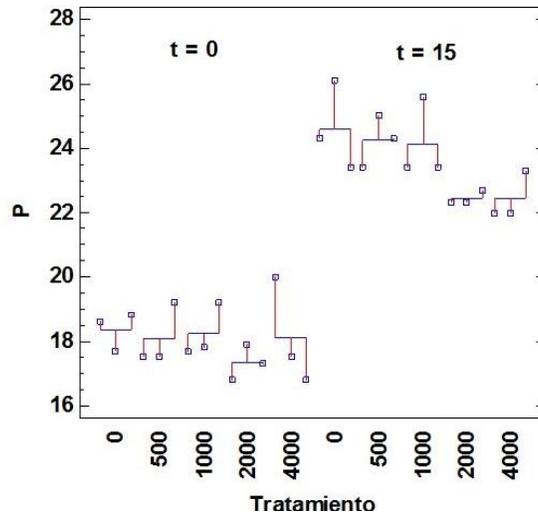
Como puede apreciarse en el análisis de varianza del fósforo (tabla 3), sólo fue significativo el efecto del proceso de incubación (15 días) responsable del ingreso de 6 ppm más de fósforo asimilable a la solución de suelo ($t_0Ca_0 = 18,36 \pm 0,6$; $t_{15}Ca_0 = 24,5 \pm 1,4$ ppm).

Tabla 3
Análisis de Varianza para P - Suma de Cuadrados Tipo III.

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|-----------------------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| EFFECTOS PRINCIPALES | | | | | |
| A: Tiempo | 230,741 | 1 | 230,741 | 176,86 | 0,0000 |
| B: Tratamiento | 11,1653 | 4 | 2,79133 | 2,14 | 0,1671 |
| C: Repetición | 0,610667 | 2 | 0,305333 | 0,23 | 0,7966 |
| INTERACCIONES | | | | | |
| AB | 3,97867 | 4 | 0,994667 | 0,76 | 0,5781 |
| AC | 3,60267 | 2 | 1,80133 | 1,38 | 0,3054 |
| BC | 5,16267 | 8 | 0,645333 | 0,49 | 0,8304 |
| RESIDUOS | 10,4373 | 8 | 1,30467 | | |
| TOTAL (CORREGIDO) | 265,699 | 29 | | | |

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual.

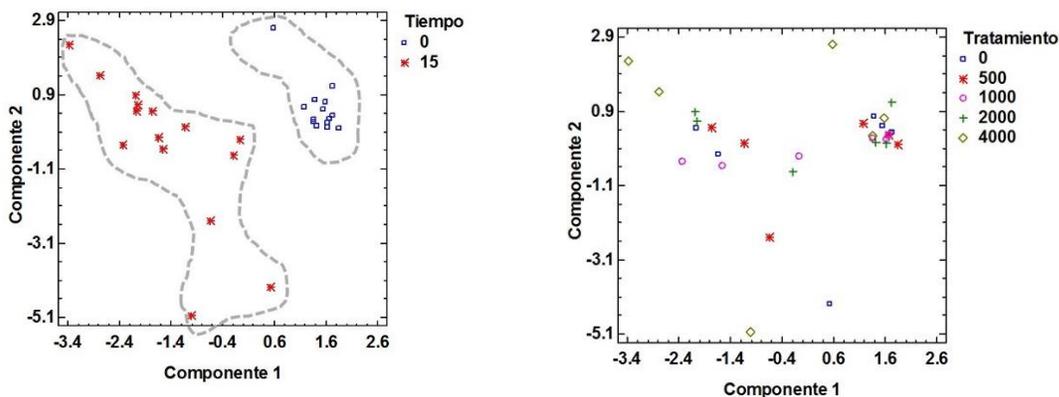
Figura 3
Efectos del periodo de incubación y la dosis de cal sobre el contenido de fósforo asimilable del suelo en el distrito de Ñürüm.



Aunque para el resto de los elementos el análisis pudiera hacerse sobre la base de estudios individuales, el número de análisis sería alto y su interpretación compleja ya que como sabemos, sus variaciones dependen más de las relaciones entre ellos, que de los efectos directos de los tratamientos aquí empleados, por otra parte también se conoce que, en un sistema, el todo puede ser más que las partes, pues las interacciones pueden mejorar el sistema, o puede ser menos que las partes, cuando las interacciones empeoran el sistema. Razón por la cual se han venido incrementando el uso de las técnicas multivariadas donde todos los factores se evalúan de conjunto. La Figura 4 muestra la comparación de todas las muestras utilizando las características medidas en un análisis de coordenadas principales. Las muestras han sido coloreadas, a la izquierda, de acuerdo con el periodo de incubación y, a la derecha, de acuerdo con la dosis de cal. En el mismo se explica el 87,3% de la varianza total.

Figura 4

Análisis de coordenadas principales de muestras obtenidas del suelo del distrito de Ñürüm. A la izquierda marcadas por periodo de incubación y a la derecha por dosis de cal.



Como se puede observar se forman dos grupos bien definidos por el periodo de incubación e independientes uno del otro. El grupo con 0 incubación se caracteriza por valores más

homogéneos, donde los tratamientos tienen un menor efecto ya que el carbonato de calcio, sin agua, no ha reaccionado en el suelo (CV 31.74%). En el segundo la variación es mayor, debido al efecto del agua sobre todo el sistema (CV 91.59%), incluida la dosis de carbonato de calcio.

(CP1: $t_0 = 1,6558 \pm 0,5259$; $t_{15} = -1,6558 \pm 1,5166$; CP2: $t_0 = 0,8031 \pm 0,9069$; $t_{15} = -0,8031 \pm 2,0749$)

El hecho de no contar con varianza homogénea dentro del conjunto limita el uso de técnicas paramétricas y obliga a trabajar por separado ambas datas, quedando la primera relegada a la caracterización del área de estudio antes de la aplicación de los tratamientos. (tabla 4)

Tabla 4

Caracterización inicial del suelo del área de estudio antes de la incubación (Resumen Estadístico para las muestras con tiempo de incubación t_0 .)

| | Ph | K | Ca | Mg | Acidez | P | Fe | Cu | Zn | Mn |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|---------|-------|-------|--------|
| | Unidades | meq/100g | meq/100g | meq/100g | meq/100g | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm |
| N | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Promedio | 5,457 | 0,423 | 5,932 | 1,283 | 1,331 | 18,020 | 195,933 | 2,653 | 4,473 | 51,073 |
| Mediana | 5,440 | 0,420 | 5,830 | 1,260 | 1,330 | 17,700 | 189,000 | 2,600 | 4,500 | 51,100 |
| Desv Estand | 0,063 | 0,010 | 0,274 | 0,078 | 0,106 | 0,934 | 16,016 | 0,083 | 0,139 | 1,470 |
| CV% | 1,15% | 2,31% | 4,61% | 6,08% | 7,96% | 5,19% | 8,17% | 3,14% | 3,10% | 2,88% |
| Mín | 5,370 | 0,410 | 5,610 | 1,190 | 1,200 | 16,800 | 180,000 | 2,500 | 4,200 | 47,200 |
| Máx | 5,570 | 0,450 | 6,740 | 1,520 | 1,520 | 20,000 | 234,000 | 2,800 | 4,700 | 53,100 |
| Q1 | 5,400 | 0,420 | 5,770 | 1,250 | 1,220 | 17,500 | 185,000 | 2,600 | 4,400 | 50,500 |
| Q3 | 5,520 | 0,420 | 6,090 | 1,310 | 1,400 | 18,800 | 202,000 | 2,700 | 4,600 | 52,000 |

En un análisis factorial de los tratamientos después de 15 días de incubación se logró un 95,2% de explicación de la varianza en 3 ejes:

En la Tabla 5 vemos que el primero, que llamaremos de la acidez, explica el 47% de la varianza y está formado por la dosis de cal, el Ca⁺⁺, la acidez, el pH, el Fe y el P; el segundo explica un 32,6% está formado por el K, el Mg, el P, el Fe y el Cu y el tercero que explica el 15,6% solo lo forman el Zn y el Mn.

Tabla 5

Factor Analysis

| Factor | Eigenvalue | Percent of | Cumulative |
|--------|------------|------------|------------|
| Number | | Variance | Percentage |
| 1 | 3,7477 | 47,000 | 47,00 |
| 2 | 2,5995 | 32,600 | 79,60 |
| 3 | 1,2439 | 15,600 | 95,20 |

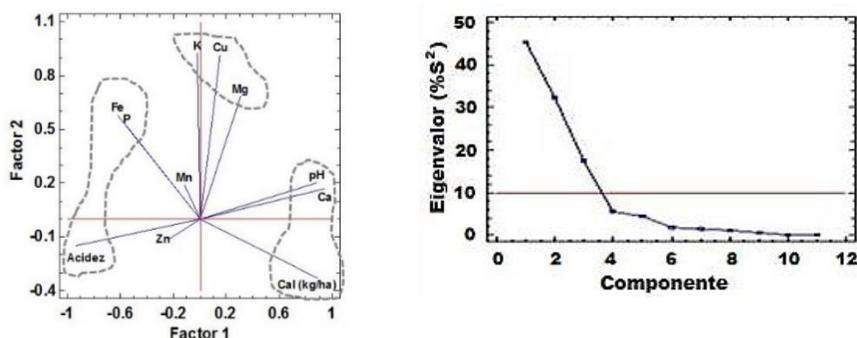
Factor Loading Matrix After Varimax Rotation

| | Factor 1 | Factor 2 | Factor 3 |
|--------------|----------|----------|----------|
| pH | 0,88 | 0,203 | -0,3244 |
| K | -0,022 | 0,925 | 0,0385 |
| Ca | 0,944 | 0,171 | -0,0688 |
| Mg | 0,311 | 0,686 | 0,5024 |
| Acidez | -0,93 | -0,147 | 0,0369 |
| P | -0,546 | 0,515 | 0,088 |
| Fe | -0,623 | 0,579 | -0,2343 |
| Cu | 0,15 | 0,914 | 0,0383 |
| Zn | -0,242 | -0,116 | 0,8604 |
| Mn | -0,113 | 0,191 | 0,6682 |
| Dosis de cal | 0,885 | -0,328 | -0,3377 |

En la Figura 5 aparece la gráfica de cargas de las variables donde se aprecia en el primer eje la relación directa que existe entre las dosis de cal, el calcio y el pH (derecha del gráfico) y la acidez, el hierro y el fósforo (izquierda del gráfico) relacionadas inversamente entre los grupos. En el segundo eje sólo se observa relación directa entre el potasio, el cobre y el magnesio.

Figura 5

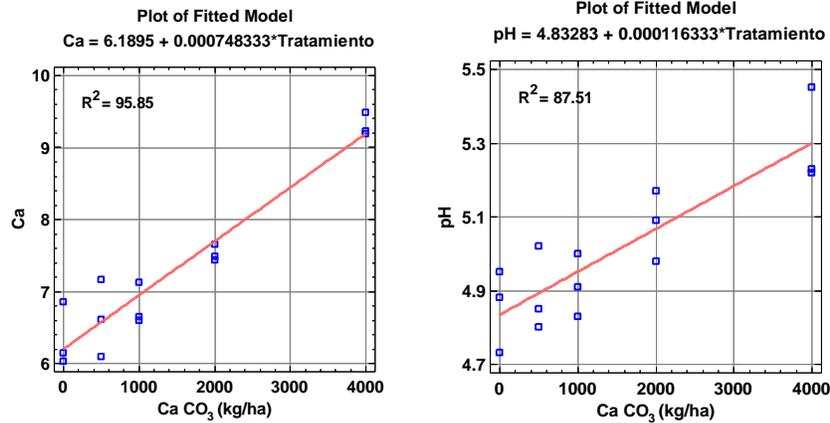
Análisis factorial rotado para lograr el máximo efecto de las dosis de cal sobre las mediciones realizadas en muestras, después de incubadas 15 días, izquierda valores de carga, derecha gráfica de sedimentación y valores de la varianza.



La Figura 6 muestra el efecto que sobre el contenido del calcio cambiante ejerce la dosis de caliza a los 15 días de aplicada manteniendo la humedad al 80% de la capacidad de campo, como se observa es lineal y significativo. Cada tonelada de cal aplicada, en 15 días, incrementa el contenido de Ca^{++} en $\approx 0,7287$ meq. /100 g de suelo, lo que a la vez sube el pH en 0,116 unidades, por lo que asumiendo que el maíz requiere para su normal desarrollo pH superiores a 5,5 (Yara 2023) el suelo estudiado requeriría dosis mayores a 5.6 toneladas de cal por hectárea.

Figura 6

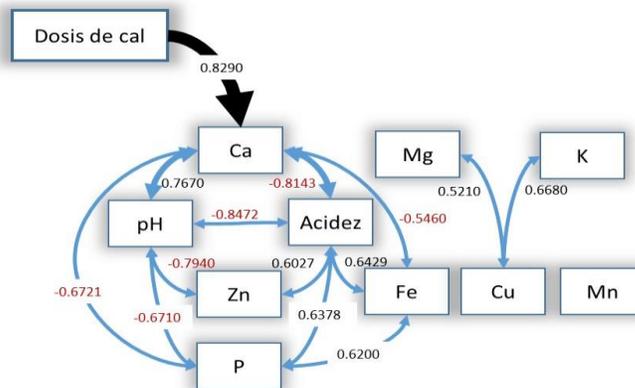
Efecto de la dosis de caliza aplicada al suelo estudiado del distrito de Ñürüm, sobre el contenido de calcio cambiante (izquierda) y el pH en agua (derecha).



Cuando se aplica carbonato de calcio al suelo los contenidos de calcio intercambiable aumentan y este aumento influye sobre la acidez y, esta a su vez, sobre el resto de los elementos. La Figura 7 muestra la topología del sistema a partir de los coeficientes de correlación de rango de Spearman, como se aprecia existen tres grupos uno dependiente del calcio que incluye al pH, la acidez, el Zn, el Fe y el P; otro formado por el Cu relacionado con el Mg y el K y el Mn que no guarda relación con nadie.

Figura 7

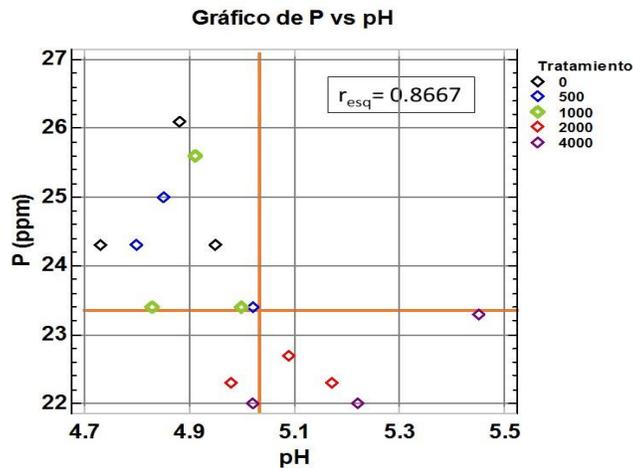
Topología de las relaciones inter variables en el suelo del distrito de Ñürüm, a partir de los coeficientes de correlación de rangos de Spearman.



Es interesante destacar que la dosis de cal influyó positivamente sobre el pH ($r_s=0,7965$, $\alpha=0,0029$) con efectos negativos, como era de esperar sobre el Zn ($r_s=-0,7576$, $\alpha=0,0046$) y el Fe ($r_s=-0,6765$, $\alpha=0,0114$), pero este efecto negativo se manifestó también sobre el fósforo asimilable ($r_{esq}=-0,8667$, $\alpha=0,0080$), que se puede observar en la Figura 8.

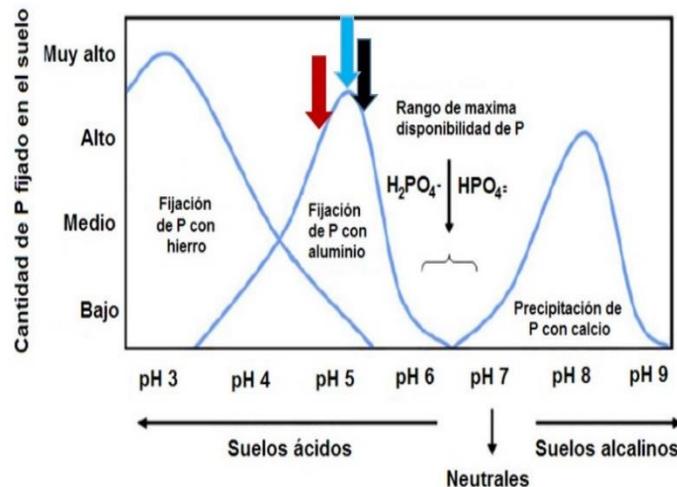
Figura 8

Relación entre el pH y el fósforo asimilable en el suelo del distrito de Ñürüm, en correspondencia con las dosis de cal aplicada (Método de la esquina de Olmstead-Tukey).



La Figura 9 muestra la dinámica del fósforo inorgánico en el suelo, e ilustra la situación de este caso: con pH inicial de 5.46, marcado en el gráfico con la flecha negra, el suelo está en una condición que cualquier aumento del pH provoca la liberación del fósforo fijado como fosfato de aluminio, sucede que por el efecto de los microorganismos con la incubación el pH bajó a 4.85 (flecha roja) punto que, aunque más ácido, como se aprecia en la Figura 9, la fijación es un poco menor. Cuando se aplica cal, el pH sube hacia la zona de máxima fijación y a los 15 días, con 4 toneladas de cal (dosis máxima aplicada) alcanza un valor de 5.23 (Flecha cian, máxima fijación por aluminio).

Figura 9
Fijación de los fosfatos en función del pH.



Para que el encalado funcione bajo esta condición de pH es necesario subir el pH en un punto a partir de la condición de siembra con riego 4.85 a 5.85, lo cual no se logra con 4 toneladas de carbonato de calcio en 15 días. Según Espinosa y Col (1999) no se debe aplicar cal sino hay

humedad en el suelo y una vez aplicada la cal se debe esperar un tiempo prudencial para que reaccione (1 a 2 meses).

Una forma general de resumir todo el trabajo se observa, usando imágenes, en la figura 10, en la misma las muestras son rostros (caras) donde las variables son representadas como diferentes partes de la cara, donde el tamaño es proporcional a la magnitud de la variable; por ejemplo, el Ca^{2+} es representado por el radio superior de la cara, la nariz representa al Mg^{2+} etc. Los datos están organizados en dos grupos, a la izquierda las muestras S1949 correspondientes al tiempo “0” y a la derecha las muestras S200 correspondientes al tiempo “15 días”, las columnas representan las repeticiones y las filas los tratamientos de cal, que aumentan hacia abajo.

Como se observa a simple vista en el grupo de tiempo 0 apenas se aprecian diferencias entre las caras; mientras en el grupo 15 días se observan diferencias entre las caras de cada tratamiento, que además van aumentando de tamaño hacia las dosis mayores, lo que se corresponde primero con el efecto del agua y el tiempo y segundo con el tratamiento de cal.

Esta forma de presentar la información ayuda a resolver la comprensión y la aplicación de los resultados, sobre todo cuando existe bajo nivel cultural de la población rural, como es el caso de Ñürüm, quedando circunscrito el problema a la búsqueda de una visualización exitosa donde el sistema de percepción visual del usuario sea estimulado para entender las relaciones y reconocer los patrones.

Aunque existen otras formas, multivariadas, de presentar la información (gráfica de estrellas, por ejemplo) la idea de usar rostros humanos se basa en que los seres humanos pueden reconocer fácilmente la cara y notar pequeños cambios sin dificultad (Chernoff H., 1973). Las caras de Chernoff son usadas para aprender lo serio y complejo en forma atrayente, partiendo desde la cartografía, ayudando a construir la síntesis experimental desde la visualización temática, como en el estudio de caso que se presenta.

Figura 10

Representación de los resultados obtenidos en el suelo del distrito de Ñürüm, a partir de las caras de Chernoff.

MATRIZ DEL EXPERIMENTO

| 0 días | | | Dosis de cal | 15 días | | | | |
|--------|----|----|--------------|---------|----|----|---|--|
| | | | 0 kg/ha | | | | Representación de datos S1949 y S200 de estudio de mejoramiento de suelos del distrito de Núrüm | |
| 1 | 2 | 3 | | 16 | 17 | 18 | | |
| | | | 500 kg/ha | | | | | Llave todo el mínimo todo bajo todo neutral todo arriba todo el máximo |
| 4 | 5 | 6 | | 19 | 20 | 21 | | |
| | | | 1000 kg/ha | | | | | |
| 7 | 8 | 9 | | 22 | 23 | 24 | | |
| | | | 2000 kg/ha | | | | | |
| 10 | 11 | 12 | | 25 | 26 | 27 | | |
| | | | 4000 kg/ha | | | | | |
| 13 | 14 | 15 | | 28 | 29 | 30 | | |

Radio hasta el esquina de la cara: **Ca**
 Tamaño vertical de la cara: **Acidez**
 Excentricidad de la cara inferior: **K**
 Posición vertical de la boca: **Fe**
 Arco de la boca: **Zn**

Ángulo de la esquina con la horizontal: **pH**
 Excentricidad de la cara superior: **P**
 Longitud de la nariz: **Mg**
 Curvatura de la boca: **Cu**
 Posición vertical de los ojos: **Mn**

CONCLUSIONES

- No se alcanzó la capacidad buffer del suelo ya que con las dosis utilizadas el pH no subió una unidad, no obstante, a los 15 días de incubación se observó una relación directa y significativa entre la dosis de cal y el pH.
- Considerando que el maíz necesita un pH superior a 5,5, que el pH de partida es de 4,85 y que el incremento de pH es de 0.000116 unidades de pH por kg de cal aplicada, en el área de estudio sería necesario aplicar más de 5.6 toneladas de cal para obtener los mejores resultados.
- Las dosis de carbonato de calcio aplicadas sólo incrementaron el calcio cambiante y el pH en presencia de humedad.
- El solo hecho de mantener el suelo a humedad de campo por 15 días hace que cambie la composición química y disminuya el pH aproximadamente en 0,5 unidades, debido presumiblemente al aumento de la actividad microbiana y a la liberación de ácido fosfórico a la solución de suelo.
- El rango de pH en que se encuentra este suelo está en la zona de máxima fijación de fósforo por aluminio (pH 5,23), por lo que la forma asimilable de este elemento (P) aumenta, tanto si se sube como si se baja el pH.
- Quince días es un tiempo insuficiente para observar efectos del encalado, por lo que, para la siembra de cultivos de ciclo corto de temporal, donde es necesario aprovechar la humedad residual, es necesario emplear fuentes de mayor actividad, que actúen más rápido como los óxidos o hidróxidos de calcio.

AGRADECIMIENTO

Se reconoce el apoyo al Centro Educativo Básico General de Cerro Pelado del (Ministerio de Educación) por el apoyo brindado, especialmente al Lic. Alberto Bósquez por su apoyo en el mantenimiento del huerto escolar en las parcelas experimentales. Agradecemos también al Dr. Abby Guerra de Grupo CALESA por facilitarnos insumos y capacitarnos en el control biológico de insectos y hongos fitopatógenos en la parcela de maíz, otoi y ñampí.

REFERENCIAS

- Barrow, N.J. & Cox, V.C. 1990. A quick and simple method for determining the titration curve and estimating the lime requirement of soil. *Aust. J. Soil Res.* 28, 685-694.
- Blake, L., Goulding, K.W.T., Mott, C.J.B. & Johnston, A.E. 1999. Changes in soil chemistry accompanying acidification over more than 100 years under woodlandygrass at Rothamsted Experimental Station, UK. *Eur. J. Soil Science*, 50:401-412.
- Burle M.L., Mielniczuck A. & Focchi S. 1997. Effect of cropping systems on soils chemical characteristics, with emphasis in soil acidification. *Plant Soil* 190:309-316.
- Califra Sanguinetti A. I., 2012. Alternativa Predictiva de la Saturación en Bases en Suelos Ácidos. Tesis presentada como requisito para obtener el título de Magíster en Ciencias Agrarias Opción Ciencias del Suelo, Universidad de La República Oriental del Uruguay, Facultad de Agronomía, Montevideo 2012.
- Chernoff H., 1973. "The Use of Faces to Represent Points in K-Dimensional Space Graphically", *Journal of the American Statistical Association*, vol. 68, no. 342, pp. 361-368, June 1973.
- Espinosa J. y Molina E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. Primera edición. International Plant Nutrition Institute. IPNI
- Fernando J. y Ramírez R. 2002. Variación de la capacidad tampón en suelos derivados de cenizas volcánicas del sur de Chile. Tesis presentada en opción al grado de Licenciado en Agronomía. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, 2002.
- IDIAP 2006. Zonificación de suelos de Panamá por niveles de nutrientes. <http://www.cich.org/Publicaciones/05/idiap-mapas-fertilidad.pdf>
- Limousin G., Tessier D. 2007. Effects of no-tillage on chemical gradients and topsoil acidification. *Soil & Tillage Research* 92:167-174.
- Millán G., Vázquez, M., Terminiello A., Santos Sbuscio D. 2010. Efecto de las enmiendas básicas sobre el complejo de cambio en algunos suelos ácidos de la región pampeana. *Ci. Suelo (Argentina)* 28:131-140.



- Oorts K., Vanlauwe B., Pleysier J., Merckx R. 2004. A new method for the simultaneous measurement of pH-dependent cation exchange capacity and pH buffering capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1578–1585.
- Pellegrini A., Lanfranco J., Millán G., Vázquez M. 2002. Efecto del tratamiento de suelos ácidos sobre el cultivo de alfalfa- XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Puerto Madryn, Argentina. *Actas*: 58.
- Pellegrini A., Lanfranco J., Millán G., Vázquez M. 2004. Calcio y magnesio en el suelo. Efecto sobre el cultivo de alfalfa. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Argentina. *Actas*: 191. ISBN 987-21419-0-8.
- Statpoint Technologies, Inc., 2014. Statgraphics ® Centurion XVII. Manual de Usuario, Impreso en Estados Unidos de América. <https://statgraphics.net/wp-content/uploads/2015/03/Centurion-XVII-Manual-Principal.pdf>
- Tang C. 1998. Factors affecting soil acidification under legumes I. Effect of potassium supply. *Plant Soil* 199:275-282.
- Tran, S. T., and W. Van Lierop. 1982. Lime requirement determination for attaining pH 5.5 and 6.0 of coarse-textured soil buffer-pH methods. *Soil Sci. Am. J.* Vol. 46.
- Van Rensburg H., Claassens A., Beukes D. 2009. Relationships between soil buffer capacity and selected soil properties in a resource-poor farming area in the Mpumalanga Province of South Africa. *South African Journal of Plant and Soil* 26:237- 243.
- Vázquez M., Piro A., Millán G., Lanfranco J. 2003. Corrección de suelos ácidos de la Pampa húmeda para la producción de alfalfa. *Revista de la Asociación Argentina de la Producción Animal* 23(2): 69 – 80. (ISSN 326-0550).
- Vázquez M., Pagani A. 2015. Calcio y Magnesio del suelo. Manejo de fertilización y enmiendas. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ed. Echeverría H., García F. INTA, Cap. 11: 317-356. 904 p.
- Villarreal José E.; Agudo Leonel; Villalaz Jhon. 2010. Clasificación de suelos de Panamá y su equivalencia. <https://www.researchgate.net/publication/301291244> **CLASIFICACION DE SUELOS DE PANAMA Y SUS EQUIVALENCIAS 2010**
- Woodruff, C.M. 1948. Testing soils for lime requirement by means of a buffered solution and the glass electrode. *Soil Sci.* 66: 53-63.
- Xu R., Zhao A., Yuan J. & Jiang J. 2012. pH buffering capacity of acid soils from tropical and subtropical regions of China as influenced by incorporation of crop straw biochars. *J Soils Sediments* 12:494–502.

Yara 2023. Suelos y Encalados. Nutrición Vegetal, Maíz. Yara Panamá S de RL 2023.
<https://www.yara.com.pa/nutricion-vegetal/maiz/suelos-y-encalado/>

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.

Zapata Hernández, R. 2004. Química de la acidez del suelo. Cali, Colombia. ISBN 958- 33-6712-5. 208 p.