

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES



INFORME TRABAJO FINAL DE CARRERA

**EFFECTOS DEL ENCALADO SOBRE RESISTENCIA A LA COMPACTACIÓN Y
PROPIEDADES FÍSICAS EN SUELOS AGRÍCOLAS DE LA PROVINCIA DE
BUENOS AIRES**

Carrera: Ingeniería Agronómica

Alumno: Boccanera Esteban

Legajo: 27238/7

DNI: 37912773

Correo electrónico: estebanb_2525@hotmail.com

Tel: 2395413932

Directora: Machetti, Natalia Elisabet.

Codirectora: García, Mirta Graciela

Fecha de entrega: 06 de noviembre de 2019

Contenido

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN	4
OBJETIVOS	9
GENERAL	9
ESPECÍFICOS	9
MATERIALES Y MÉTODOS	10
LUGAR Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS DEL ENSAYO	10
DISEÑO DEL ENSAYO	11
TRATAMIENTOS	11
VARIABLES A EVALUAR	11
ANÁLISIS ESTADÍSTICO	12
RESULTADOS Y DISCUSION	12
pH	12
DENSIDAD APARENTE	13
RETENCIÓN HÍDRICA A CAPACIDAD DE CAMPO	14
PUNTO MÁXIMO DE COMPACTACIÓN (PROCTOR) Y HUMEDAD CRÍTICA	15
MATERIA ORGÁNICA	22
LÍMITE LÍQUIDO	23
RENDIMIENTO	24
CONCLUSIONES	26
BIBLIOGRAFÍA	26
ANEXO	31

RESUMEN

Durante los últimos veinte años hubo un cambio de paradigma productivo argentino por estímulos económicos y en respuesta al fuerte incremento de la demanda mundial de alimentos. El aumento de la producción y de la frontera agropecuaria, derivó en problemáticas de degradación de los suelos, entre ellos la acidificación. En nuestro país, más de la mitad del territorio se encuentra afectado. Debido al aumento de áreas acidificadas en el mundo y a la necesidad de producir más alimentos, es fundamental entender la dinámica que explica el proceso de acidificación. Por ello se propone como hipótesis de trabajo que el agregado creciente de enmiendas cálcico-magnésicas mejora la capacidad estructurante de los suelos y las propiedades físicas que surgen de ella, lo que favorece un mejor desarrollo de las plantas. Los ensayos se realizaron en 2 suelos en el ámbito pampeano argentino, un Argiudol con pH 5,66 y un Paleudol con pH 5,44, con diseño en bloques completamente al azar con 3 repeticiones. Las variables evaluadas fueron pH, densidad aparente, retención hídrica, punto máximo de compactación, humedad crítica, materia orgánica, límite plástico y rendimiento de soja a los 19 y 21 meses posteriores al encalado según suelo. Los tratamientos fueron 0 (TY), 1000 (D1Y), y 4000 (D4Y) kg ha⁻¹ de dolomita y todos con 200 kg ha⁻¹ de yeso. Luego de 3 meses se sembró soja. En el Paleudol el pH y el rendimiento de soja presentaron incremento con la adición de enmienda. En cambio, en el Argiudol no se observó respuesta con la adición de enmienda sobre ninguna de las variables estudiadas. La ausencia de efectos de las enmiendas sobre las propiedades físicas en ambos suelos podría deberse a que el tiempo de los ensayos para evaluar este tipo de variables fue insuficiente para observar un cambio significativo.

INTRODUCCIÓN

En regiones tropicales y subtropicales la acidificación se origina en procesos genéticos naturales, los cuales provocan la pérdida de los elementos básicos contenidos en los materiales originales. Esto se debe, en la mayor parte de los casos, a materiales originales alterables de carácter ígneo básico, como por ejemplo el basalto en el Noroeste argentino, y un clima agresivo de alta temperatura y pluviosidad. En esas condiciones, dichos materiales se meteorizaron intensamente y las bases, además de gran parte del silicio, son lixiviadas (Zapata, 2004). En estos ambientes solo pueden desarrollarse especies vegetales que se adaptan a estas condiciones por su bajo requerimiento en estos elementos y tolerancia a efectos de toxicidad causados por el aluminio (Al), hierro (Fe), manganeso (Mn) e hidrógeno (H), que instauran el complejo de cambio (Vazquez & Pagani, 2015).

En regiones templadas el proceso de acidificación se genera fundamentalmente por razones antrópicas. El descenso del pH se debe a la extracción de bases por parte de los cultivos (los cuales absorben estos elementos a partir de la solución del suelo), sin la posterior reposición de nutrientes mediante fertilizantes, lo que conduce a una disminución en la saturación con bases del complejo de intercambio catiónico de los suelos (Vázquez & Rotondaro, 2005). Las bases como calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) son requeridas por las plantas en grandes cantidades para su crecimiento, el suelo las provee de acuerdo a la riqueza del material parental y el grado de meteorización, según las características climáticas y bióticas del lugar. Se encuentran adsorbidas en los coloides inorgánicos y orgánicos del suelo en equilibrio con las formas más inmediatamente asimilables en la solución edáfica, desde donde son absorbidas por las plantas y/o microorganismos e inmediatamente repuestas a la solución del suelo por intercambio catiónico para restablecer el equilibrio (desorción). Las reservas a largo plazo provienen de la mineralización de los residuos orgánicos y de la estructura mineral que los provee,

como así también se pueden perder por erosión o lixiviación. La velocidad de estos procesos está determinada por la naturaleza y composición química de los coloides del suelo, las condiciones climáticas y el manejo antrópico (Havlin et al., 1999; Mengel & Kirkby, 2000).

Es importante destacar, que el pH del suelo puede tomar valores extremos entre 3 y 10, aunque los valores más frecuentes están comprendidos en el rango de 4 a 8, siendo los que oscilan entre 5,6 a 6,5 los más convenientes para el desarrollo de varios procesos químicos y biológicos, entre ellos la provisión de nutrientes para los cultivos (Porta Casanellas et al., 1999).

Otra de las causas de la acidificación es el aumento de la aplicación de fertilizantes de alto índice de acidez, fundamentalmente los nitrogenados amoniacales o con grupo amida, como la urea (Estelrich et al., 2012). La implementación de labranzas reducidas o cero con su posterior acumulación de materia orgánica en superficie, también pueden derivar en la acidificación (Vázquez & Pagani, 2015).

Para evitar los efectos de la acidificación y garantizar la sostenibilidad del sistema productivo, se ha procedido, tradicionalmente, a la utilización de productos correctores o enmiendas básicas (calcita, dolomita, cal viva o apagada, fertilizantes cálcico-magnésicos). Estos productos que contienen Ca y/o Mg en diferentes proporciones, han dado origen a la práctica denominada encalado. Si bien el pH del suelo podría elevarse a través del agregado de otros compuestos, generalmente se emplean los cálcico/magnésicos con el objetivo de reponer estos elementos con funciones nutricionales para los cultivos, así como de estructurantes edáficos en suelos de regiones templadas, ya que mejoran la dinámica del aire y del agua (Sainz Rozas et al., 2014; Vázquez & Pagani, 2015) a partir de la formación de puentes cálcicos que favorecen la floculación de los coloides del suelo (Chan & Heenan, 1999). En el mismo sentido, J. Álvarez-Benedí & Marinero (2003) encontraron que en suelos de textura arcillosa el agregado de CaCO_3 , además de mejorar la actividad biológica,

incrementa la capacidad de agua disponible, favorece el drenaje natural del suelo y se facilita el laboreo en los suelos.

Existe un problema frecuente que condiciona la aplicación de enmiendas calcáreas que es la deriva que se produce durante la aplicación. Dada la magnitud de las dosis empleadas, cercanas o superiores a la tn ha^{-1} , es común que se empleen máquinas centrífugas. La mayor parte del mercado comercializa estas enmiendas en forma pulverulenta para favorecer su solubilización. Esto redundaría en importantes derivas, aun en condiciones de baja velocidad del viento, generando pérdidas económicas importantes y otros perjuicios relacionados. Hasta el presente sólo se ha comercializado en Argentina un producto aperdigonado constituido por dolomita pulverizada y aglutinada con linosulfonato de sodio. El costo de este producto limitó su difusión.

Por otra parte, en la siembra directa la aplicación de productos correctores sólidos de naturaleza carbonatada no tienen la posibilidad de ser incorporados a través de labranzas disminuyendo la interacción suelo-corrector (ácidos orgánicos, CO_2 , agua) y debido a esto se ha propuesto la aplicación de dolomita o caliza, en forma conjunta con yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$). El aporte de yeso conjuntamente con dolomita en cultivos de especies leguminosas, además de elevar el pH antes de que lo comience a hacer la dolomita, aporta azufre (S) (Pérez Arias, 1992). El S es un elemento con funciones afines a las del N, ya que integra la composición de varias proteínas y, por lo tanto, interviene en procesos asociados a la eficiencia de uso de la radiación y contribuye a la calidad del forraje y a la cantidad y calidad de las proteínas (Díaz Zorita & Gambaudo, 1997). En la Región Pampeana se han informado efectos positivos de la aplicación de S en ambientes de la Pampa Arenosa, con suelos profundos y de moderado contenido de materia orgánica, y en la región centro-este de Santa Fe sobre pasturas de alta producción (Fontanetto & Keller, 1999).

Según diversos autores, los efectos sobre el rendimiento de soja en suelos encalados son muy variables. Terminiello et al. (2006) y Vázquez et al. (2012) encontraron que dosis superiores a 1500 kg ha^{-1} de caliza/dolomita, si bien producen mejoras en las propiedades químicas, pueden disminuir la eficiencia de la enmienda, evaluada en producción de grano de soja o materia seca de alfalfa. Los autores asociaron este comportamiento a los aumentos en la resistencia mecánica del suelo, posiblemente originada por recristalización de los carbonatos de la propia enmienda en el espacio poroso. Esta recristalización obturaría poros de tamaño pequeño en los suelos de textura fina. Por otra parte, Caires et al. (2008a, 2008b) no encontraron respuesta significativa en el rendimiento luego del encalado en suelos marcadamente ácidos, fundamentalmente bajo siembra directa, aún en situaciones donde las enmiendas produjeron aumentos de pH, de disponibilidad de molibdeno (Mo) y en consecuencia mayor fijación biológica de nitrógeno (N). Otros autores, por el contrario, como Gambaudo et al. (2007), informaron efectos positivos de la práctica con cantidades muy reducidas de enmienda.

Alakukku et al. (2003) afirman que diversas propiedades de los suelos pueden incidir en la susceptibilidad a la compactación, entre ellos la textura, el contenido de materia orgánica, y eventualmente, el contenido y tipo de bases intercambiables. De lo dicho se desprende que el encalado modificaría la susceptibilidad a la compactación de los suelos dependiendo de sus características intrínsecas.

El término compactación se aplica a la densificación de un suelo no saturado por la reducción del volumen de aire en el espacio poroso. Puesto que la viscosidad del agua es generalmente 50-100 veces mayor que la del aire, la expulsión de aire es intrínsecamente mucho más rápida que la expulsión de agua de un suelo. Esto permite explicar que bajo condiciones de presión instantánea o de muy baja duración en el suelo, el mismo sufrirá un aumento de su densidad debido principalmente al desplazamiento del aire contenido en su espacio poroso y no del agua (Hillel, 2004).

Partiendo de una condición seca, la densidad aparente aumenta luego de ejercer una determinada presión con incrementos de humedad en el suelo hasta alcanzar una densidad máxima en un valor de humedad llamado contenido crítico de humedad, más allá del cual la densidad disminuye. Este comportamiento es fácilmente explicable, al menos cualitativamente. Un suelo seco típicamente resiste la compactación debido a su matriz rígida y su alto grado de interacción entre partículas provocando una resistencia a la fricción y a la deformación del mismo. A medida que aumenta la humedad del suelo, las películas de agua debilitan los enlaces entre partículas funcionando como un lubricante entre las mismas así pues, el suelo se vuelve más fácilmente compactable. Cuando la humedad del suelo se acerca a la saturación (entre 80 y 90 % del espacio poroso ocupado por agua), el volumen de aire de expulsión se reduce y el suelo ya no se puede compactar por el mismo esfuerzo de compactación. Desde ese punto en adelante, cualquier aumento adicional de la humedad del suelo reduce la compactabilidad (Hillel, 2004).

Para la determinación de la densidad máxima se han realizado estudios simulando la compactación, mediante pruebas de laboratorio, a partir de los ensayos Proctor (Aragón et al., 2000).

El ensayo denominado Proctor (ASTM, 1992) es una metodología empleada para evaluar la evolución de la densidad aparente cuando las muestras son sometidas a una misma presión con diferentes contenidos hídricos, lo que permite establecer el contenido crítico de humedad (CCH) a la cual se alcanza la máxima densidad Proctor (MDP). Estas determinaciones permiten estimar la compactación relativa a través de la relación entre la densidad aparente a campo y la MDP.

Componentes del suelo, y en particular la materia orgánica, pueden afectar los índices de compactación de diferente manera. Soane (1990) comprobó que los aumentos de materia orgánica dan como resultado una reducción en la compactabilidad en pruebas que emplean una carga de impacto (por ejemplo, Proctor).

Por su parte, Aragón et al. (2000) establecieron una correlación negativa entre la MDP y el contenido de materia orgánica, y entre la MDP y el CCH, es decir, demostrando una tendencia general de reducción en la MDP cuando el contenido de materia orgánica y el CCH toma valores más elevados.

En horizontes con una textura similar pero bajo diferentes sistemas de manejo, se encontró que aquellos suelos con mayores niveles de materia orgánica presentan menor susceptibilidad a la compactación. Por otro lado, también se demostró que el contenido de arcilla en el suelo influye sobre la máxima densidad Proctor alcanzada. Como conclusión podría decirse que suelos de textura más fina, con mayor contenido de arcilla y ricos en materia orgánica son menos susceptibles a la compactación que suelos de textura más gruesa y pobres en materia orgánica (A.R.Quiroga et al., 1999).

Continuar con estas evaluaciones podría contribuir al esclarecimiento del efecto del encalado en suelos acidificados de la Región Pampeana. Por ello se propone como hipótesis de trabajo que el agregado creciente de enmiendas cálcico-magnésicas mejora la capacidad estructurante de los suelos y las propiedades físicas que surgen de ella, lo que favorece un mejor desarrollo de las plantas.

OBJETIVOS

GENERAL

Evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas básicas en suelos acidificados agrícolas de la provincia de Buenos Aires, sobre parámetros físicos y su impacto en el rendimiento.

ESPECÍFICOS

Evaluar los efectos del encalado con diferentes dosis de enmienda en:

- a) pH
- b) densidad aparente
- c) retención hídrica a capacidad de campo (0,3 atm).

- d) punto máximo de compactación (Proctor) y humedad crítica.
- e) contenido de materia orgánica
- f) Límite líquido
- g) rendimiento de soja

MATERIALES Y MÉTODOS

LUGAR Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS DEL ENSAYO

Los ensayos se realizaron en suelos acidificados antrópicamente de capacidad agrícola de la Pampa Ondulada. Los sitios experimentales fueron:

a) Sitio 1: EEA Julio Hirschhorn, Argiudol típico, perteneciente a la serie Bombeador (Lanfranco, 1970), ubicado en Los Hornos, La Plata, Buenos Aires. El 7 de septiembre de 2015 se aplicó la enmienda. Se muestrearon y analizaron los efectos a los 19 meses posteriores al encalado. El 28 de diciembre de 2015 se sembró soja inoculada variedad DM 4612 (grupo 4 indeterminada) con un distanciamiento de 35 cm entre hileras y 22 semillas por metro con sembradora neumática. La cosecha se realizó en marzo de 2016.

b) Sitio 2: Don Joaquín, Paleudol típico, fina, illítica, térmica, perteneciente a la serie Etcheverry, ubicado en el partido de Magdalena, Buenos Aires. El 7 de octubre de 2015 se aplicó la enmienda. Se muestrearon y analizaron los efectos en el suelo a los 21 meses posteriores al encalado. El 15 de noviembre de 2015 se sembró soja inoculada variedad DM 4200, con un distanciamiento de 42 cm entre hileras y 16 semillas por metro lineal. La cosecha se realizó en marzo de 2016.

El pH en el Argiudol antes de incorporar las enmiendas fue de 5,66, el contenido de MO 3,93 (%) y la Dap 1,126 g/cm³. En el Paleudol antes de la incorporación de las enmiendas el pH fue de 5,44, el contenido de MO de 5,45 (%) y la Dap 0,973 g/cm³.

DISEÑO DEL ENSAYO

Diseño en Bloques Completos al Azar (DBCA) con 3 repeticiones con parcelas de 5 m x10 m (50 m²) separadas por calles de 2 m.

TRATAMIENTOS

Agregado de dosis crecientes de dolomita, con una composición de 58/60% de CaCO₃ y 38/40% de MgCO₃ con una granulometría <35 µm. El yeso tenía granulometría de 10,3 % > 1000 µm, 33,5% 1000µm-500µm; 35,5 % 500µm -210 µm; 14,2 % 210 µm-105 µm, 3,7% 105 µm-53 µm y 2,8 % <53 µm.

- Testigo: 200 kg ha⁻¹ yeso (TY)
- Dolomita 1000 kg ha⁻¹ y yeso 200 kg ha⁻¹ (D1Y)
- Dolomita 4000 kg ha⁻¹ y yeso 200 kg ha⁻¹ (D4Y)

Las enmiendas se aplicaron en septiembre de 2015, al voleo, de manera manual con incorporación mediante disco.

VARIABLES A EVALUAR

En el Argiudol a los 19 meses y en el Paleudol a los 21 meses posteriores al encalado se recolectaron 15 submuestras por parcela de cada tratamiento de 0-10 cm de profundidad.

- pH actual: por vía potenciométrica, relación suelo:agua de 1:2,5 (p:v) (SAMLA-SAGPyA, 2004)
- Densidad aparente (Dap): mediante el método del cilindro, se evaluó 0 a 0,10 m de profundidad (Blake & Hartge 1986, en SAMLA-SAGPyA 2004)
- Retención hídrica a capacidad de campo: mediante olla de Richards (Richards, 1948)
- Resistencia a la compactación: ensayo Proctor (ASTM 1992) se evaluó el aumento de la densidad aparente ante diferentes contenidos hídricos obtenidos por humedecimiento. Las muestras húmedas se compactaron colocadas en

tres capas en una cámara de volumen de $0,911 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. Cada capa de suelo recibió 25 golpes de 2,5 kg mediante la caída de un martillo de 0,305 m de altura, equivalentes a $593,7 \text{ kJ m}^{-3}$. A partir de la función polinómica y el método de mínimos cuadrados se obtuvo el contenido hídrico correspondiente a la máxima compactación, y la compactación máxima relativa de los tratamientos.

- Carbono orgánico fácilmente oxidable (COT): por vía húmeda, micrométodo según Walkley & Black (1934) modificado (SAMPLA-SAGPyA, 2004).
- Límite Líquido (LL): método de la Cazuela de Casagrande (AASHTO, 1996).
- Rendimiento en grano (R): se extrajeron 3 sub-muestras de 2 m lineales por parcela, secadas en estufa a 60°C hasta peso constante.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Todos los resultados fueron evaluados estadísticamente mediante ANOVA, previo análisis de supuestos básicos. Las diferencias entre medias se analizaron a través de test de Tukey ($p < 0,05$) con el software estadístico (StatSoft Inc., 2005)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PH

Los valores de pH en el Paleudol presentaron incremento significativo en D4Y respecto a TY de 0,8 puntos y a D1Y de 0,5 puntos ($p < 0,05$; Figura 1). En el Argiudol el pH no se modificó con la adición de enmienda, aunque se observó una tendencia positiva con el incremento de la dosis. Los resultados observados en el Paleudol coinciden con Heredia et al., (1997) quienes estudiaron la evolución del pH y el comportamiento de propiedades físico-químicas del suelo, aplicando 2500 kg ha^{-1} de dolomita sobre un Argiudol típico; la evolución del aumento que encontraron fue de 1 unidad entre el testigo y la dosis al cabo de un año. También coinciden con Torella et al., (2007) quienes tomaron muestras de suelo de un Argiudol típico, adicionaron 2000

y 4000 kg ha⁻¹ de caliza, las incubaron en una estufa de cultivo a 25°C y a humedad gravimétrica equivalente a capacidad de campo (30%) por 30 días. En las mismas encontraron variación en el pH, el testigo de 5,74 se elevó a 6,75 y 7,73 para los 2000 y 4000 kg ha⁻¹, respectivamente.

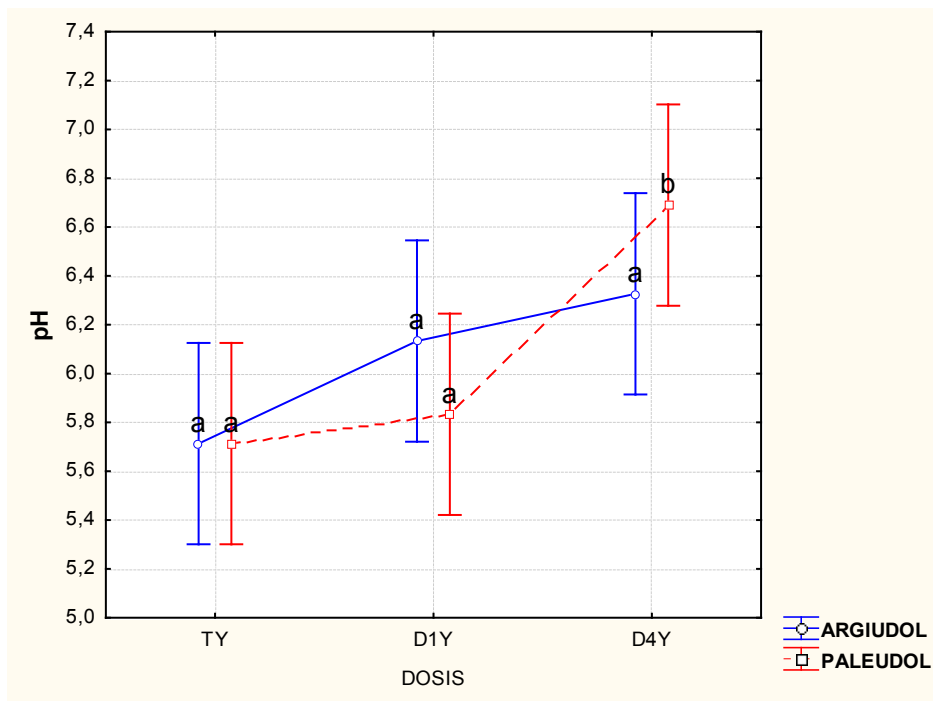


Figura 1. Valores de pH actual (1:2,5 suelo/H₂O) según tratamiento aplicado: TY=0 kg ha⁻¹, D1Y= 1000 kg ha⁻¹ D4Y= 4000 kg ha⁻¹ de dolomita con 200 kg ha⁻¹ de yeso en los 3 casos, para 2 suelos de la Región Pampeana. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para un mismo suelo.

DENSIDAD APARENTE

La Dap en el Paleudol y en el Argiudol no presentó diferencias significativas entre los tratamientos en ningún sitio experimental ($p < 0,05$), aunque se observó tendencia al incremento con D1Y respecto a TY y D4Y en los dos suelos (Figura 2). (Vázquez, 2009) evaluaron la incidencia del agregado de 1000 kg ha⁻¹ y 2000 kg ha⁻¹ de dolomita, sobre la densidad aparente de un suelo Argiudol típico de la pradera pampeana y encontraron, al igual que en este trabajo, que en ningún caso se modificó

significativamente esta variable. Esto podría deberse a que esta variable es poco sensible a cambios producidos por prácticas agrícolas en el corto plazo.

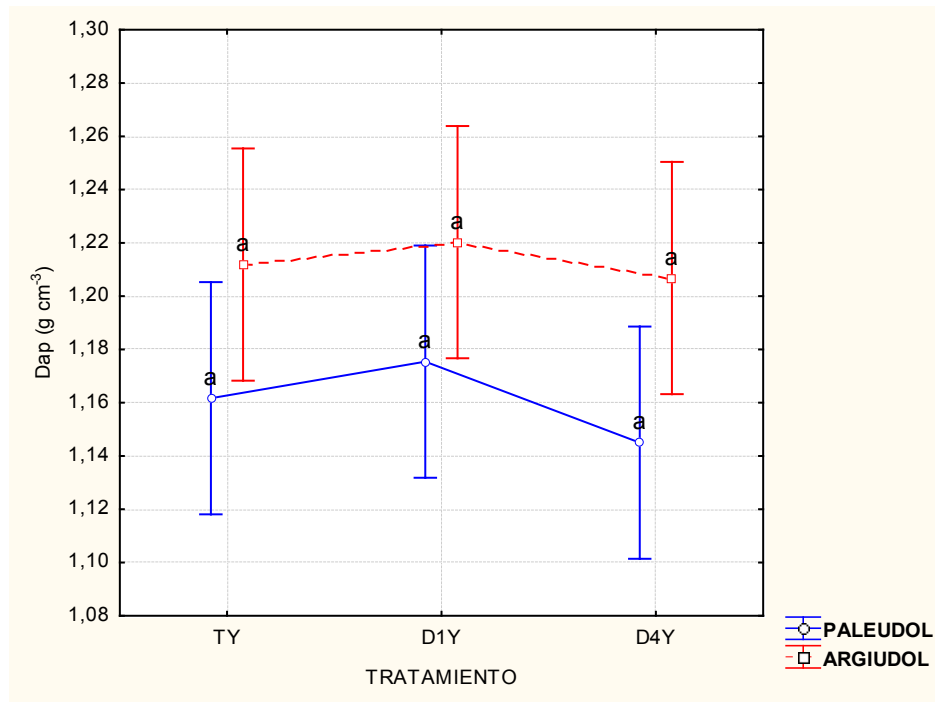


Figura 2. Densidad aparente (g cm^{-3}) según tratamiento: TY=0 kg ha^{-1} , D1Y= 1000 kg ha^{-1} D4Y= 4000 kg ha^{-1} de dolomita con 200 kg ha^{-1} de yeso en los 3 casos, para 2 suelos de la Región Pampeana. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para un mismo suelo.

RETENCIÓN HÍDRICA A CAPACIDAD DE CAMPO

La RH 0,3 atm en el Paleudol y en el Argjudol no presentó diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$; Figura 3). En el Argjudol se observó una tendencia al incremento de la RH 0,3 atm en D1Y y D4Y respecto de TY, en el Paleudol solo se observó tendencia al incremento respecto a TY en D4Y (Figura 3).

A diferencia de lo hallado en nuestro trabajo, Álvarez-Benedí & Marinero (2003) encontraron que en suelos de textura arcillosa el agregado de enmiendas básicas, además de mejorar la actividad biológica, incrementa la capacidad de agua disponible.

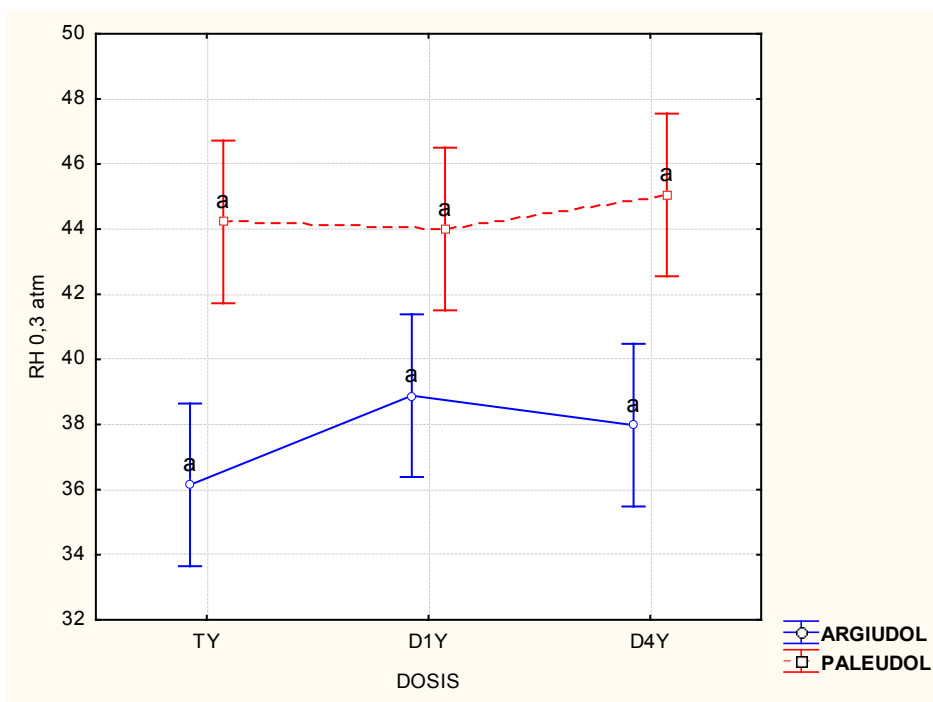


Figura 3. Retención hídrica a 0,3 atm de presión según tratamiento: TY=0 kg ha⁻¹, D1Y= 1000 kg ha⁻¹ D4Y= 4000 kg ha⁻¹ de dolomita con 200 kg ha⁻¹ de yeso en los 3 casos, para 2 suelos de la Región Pampeana. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para un mismo suelo.

PUNTO MÁXIMO DE COMPACTACIÓN (PROCTOR) Y HUMEDAD CRÍTICA

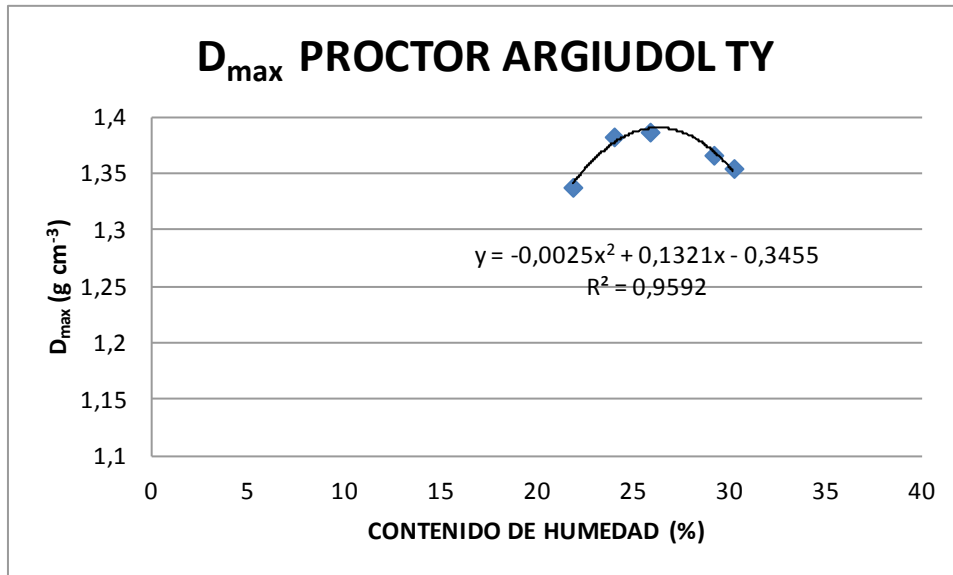
En el Argiudol, a los 19 meses posteriores del encalado, el tratamiento D1Y fue el que presentó menor valor de humedad crítica y densidad máxima Proctor a dicha humedad, mientras que TY fue el que mayor humedad crítica y densidad presentó (Tabla 1; 2 y Figura 4).

Tabla 1. Densidad máxima Proctor (D_{max}) a diferentes contenidos de humedad (CH) en el Argiudol.

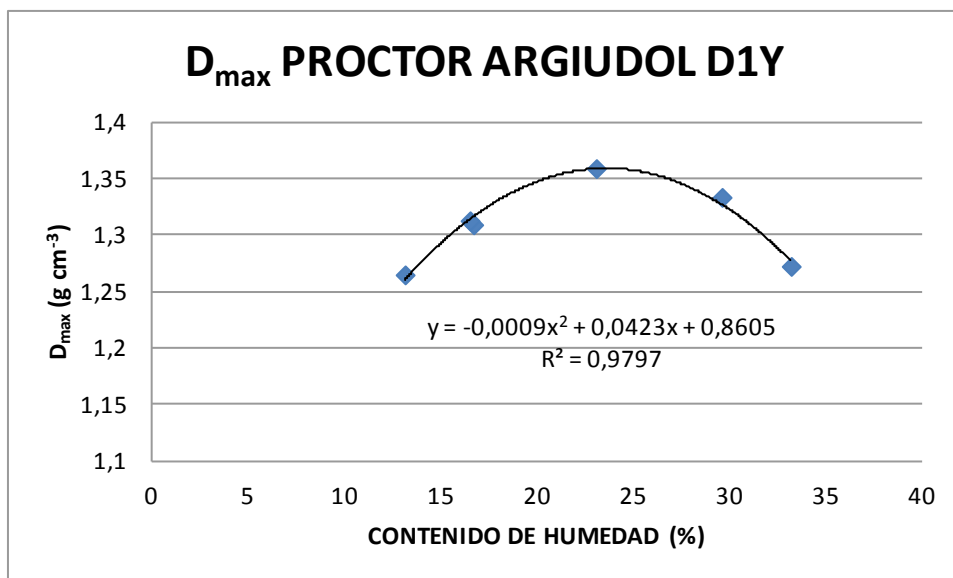
DOSIS	CH (%)	D_{max} (g cm ⁻³)
TY	21,82	1,34
TY	23,96	1,38
TY	25,83	1,39
TY	29,14	1,37
TY	30,19	1,35
D1Y	13,10	1,27
D1Y	16,66	1,31
D1Y	16,48	1,31
D1Y	23,04	1,36
D1Y	29,57	1,33
D1Y	33,16	1,27
D4Y	14,07	1,25
D4Y	19,53	1,33
D4Y	23,56	1,37
D4Y	26,96	1,39
D4Y	29,31	1,36
D4Y	32,35	1,32

Tabla 2. Contenido crítico de humedad CH al cual se genera la máxima densidad Proctor correspondiente a cada tratamiento en el Argiudol.

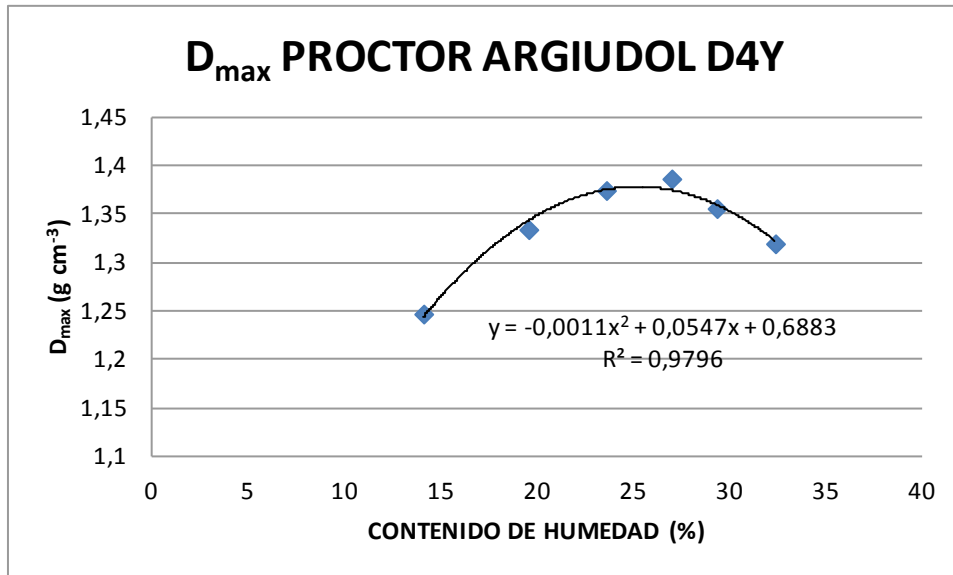
DOSIS	CH (%)	Dmax (g cm ⁻³)
TY	26,42	1,399
D1Y	23,5	1,3575
D4Y	24,86	1,368



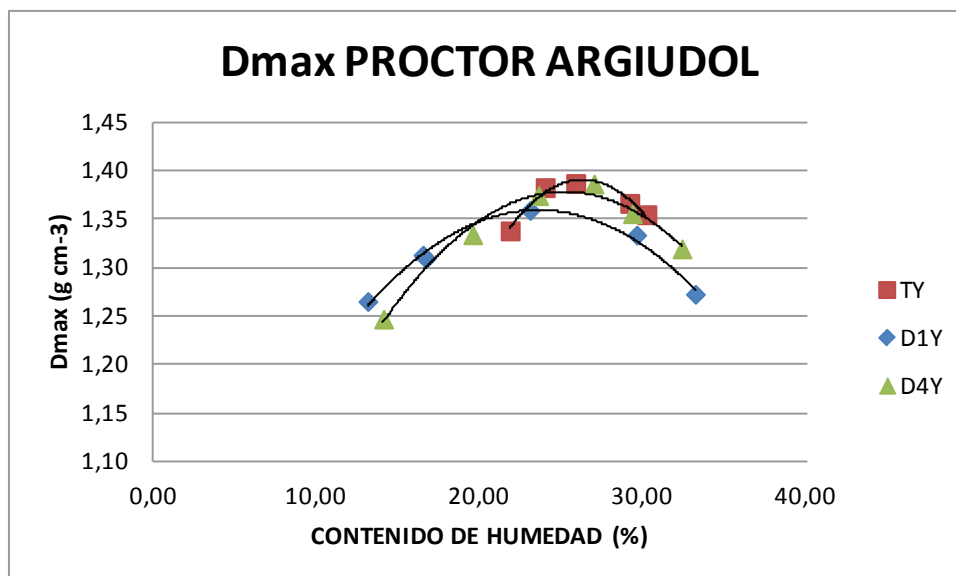
a



b



c



d

Figura 4. a, b, c y d. Densidad máxima en función de la humedad (D_{max} , g cm⁻³) evaluada a los 19 meses posteriores al encalado según tratamiento aplicado. a-T=0 kg ha⁻¹ b- D1= 1000 kg ha⁻¹ c- D4= 4000 kg ha⁻¹ de dolomita con 200 kg ha⁻¹ de yeso y d- Los tres tratamientos.

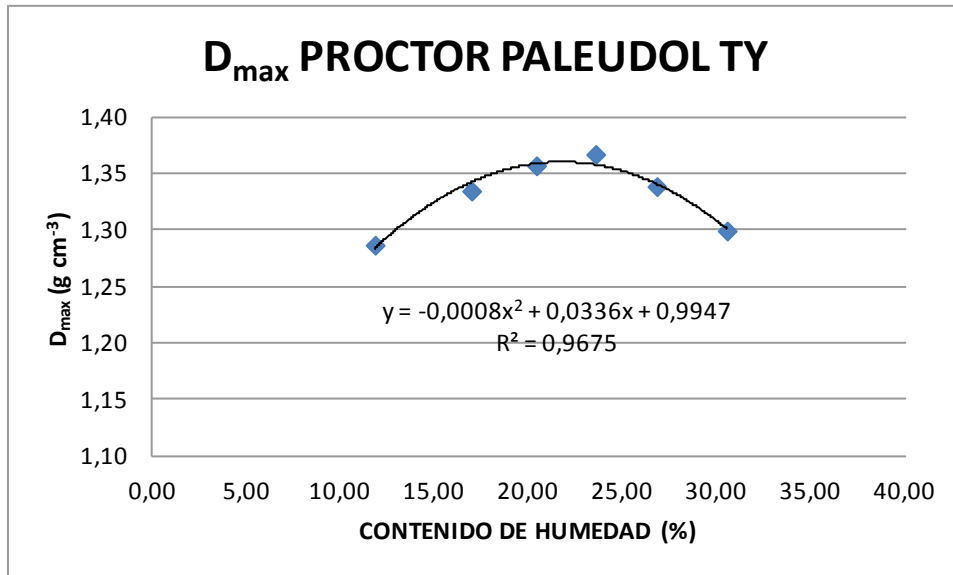
En el Paleudol, a los 21 meses posteriores del encalado, el tratamiento TY fue el que presentó menor valor de humedad crítica y D4Y el mayor valor. La mayor densidad máxima Proctor se observó en D1Y y el menor valor en D4Y (Tabla 3; 4 y Figura 5).

Tabla 3. Densidad máxima Proctor (D_{max}) a diferentes contenidos de humedad (CH) en el Paleudol.

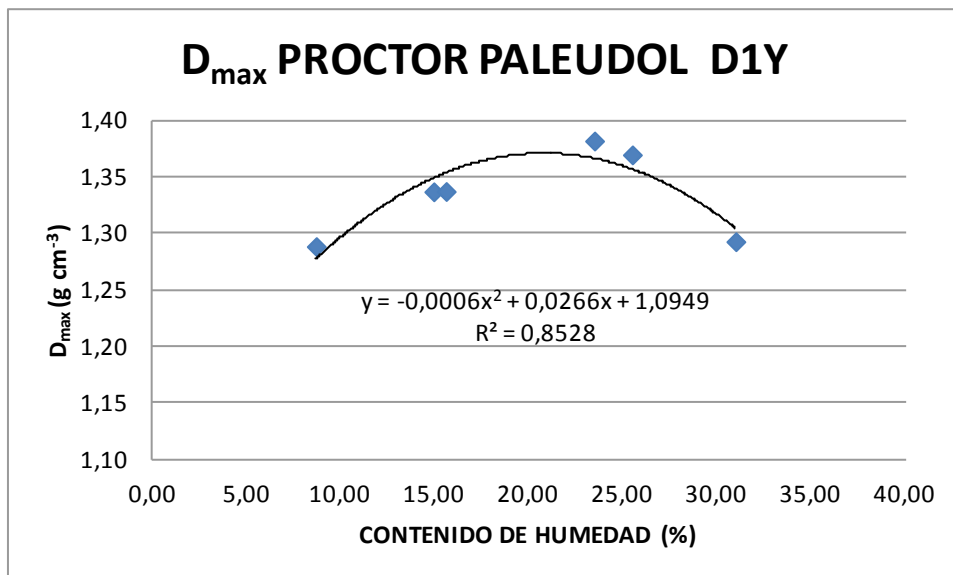
DOSIS	CH(%)	D_{max} (g cm ⁻³)
TY	11,80	1,29
TY	16,93	1,33
TY	20,37	1,36
TY	23,52	1,37
TY	26,77	1,34
TY	30,50	1,30
D1Y	8,67	1,29
D1Y	14,92	1,34
D1Y	15,58	1,34
D1Y	23,46	1,38
D1Y	25,47	1,37
D1Y	30,96	1,29
D4Y	11,22	1,14
D4Y	15,72	1,22
D4Y	20,56	1,33
D4Y	30,02	1,28
D4Y	33,91	1,26
D4Y	17,01	1,30
D4Y	31,66	1,28

Tabla 4. Contenido crítico de humedad CH al cual se genera la máxima densidad Proctor correspondiente a cada tratamiento en el Paleudol.

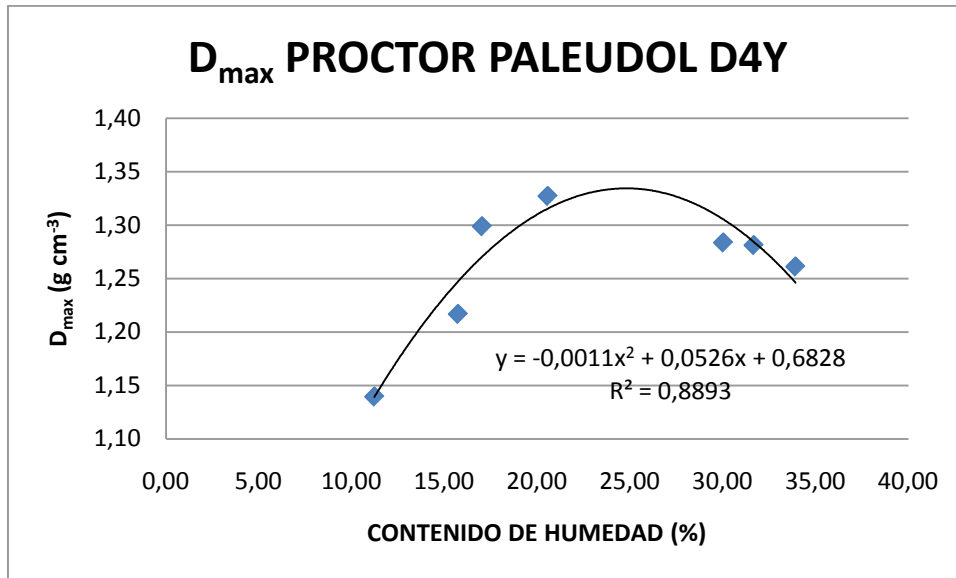
DOSIS	CH (%)	Dmax (g cm ⁻³)
TY	21	1,3475
D1Y	22,16	1,389
D4Y	23,9	1,311



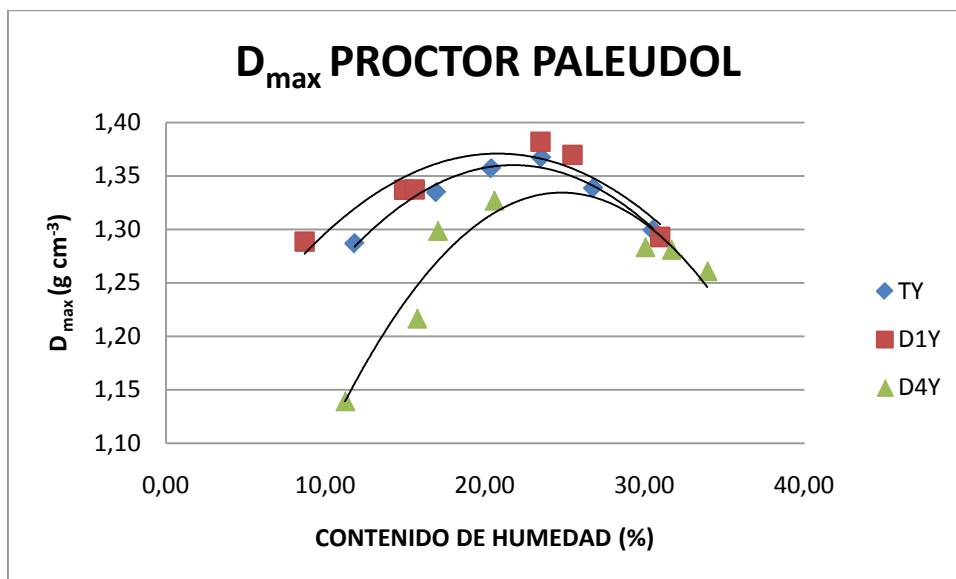
a



b



c



d

Figura 5. a, b, c y d. Densidad máxima en función de la humedad (D_{max} , $g\ cm^{-3}$) evaluada a los 21 meses posteriores al encalado según tratamiento aplicado. a- $T=0\ kg\ ha^{-1}$ b- $D1= 1000\ kg\ ha^{-1}$ c- $D4= 4000\ kg\ ha^{-1}$ de dolomita con $200\ kg\ ha^{-1}$ de yeso y d- Los tres tratamientos.

La susceptibilidad a la compactación o la vulnerabilidad que presenta un suelo a la compactación, depende de factores inherentes al suelo, clima y prácticas de manejo.

La máxima compactación que puede alcanzar un suelo está fuertemente relacionada con la presencia de partículas minerales de menor tamaño, con la retención de agua a bajos potenciales mátricos y con el contenido de materia orgánica (Díaz Zorita & Grosso, 2000). Tessier (2000) en suelos encalados con dosis de 20 t ha⁻¹ halló que la D_{max} disminuyó. Un comportamiento semejante, aunque poco acentuado debido a las menores dosis empleadas, fue el que se observó en el Argiudol con 1000 kg ha⁻¹ y en el Paleudol con 4000 kg ha⁻¹ de dolomita.

CARBONO ORGÁNICO

El COT en el Paleudol y el Argiudol, no presentó diferencias significativas entre los tratamientos en ningún sitio experimental (Figura 6). Con el incremento de la dosis se observa una tendencia negativa en el Paleudol. El encalado favorece la actividad microbiana y acelera la descomposición de la materia orgánica según algunos autores, y es por ello que lo observado se asocia a que, el encalado induce un descenso en el contenido de materia orgánica del suelo, y por lo tanto, del COT (Thompson & Troeh, 1988). En este ensayo el lapso de evaluación del contenido de COT desde la aplicación de los correctores en los ensayos sería breve para manifestar modificaciones significativas sobre el COT.

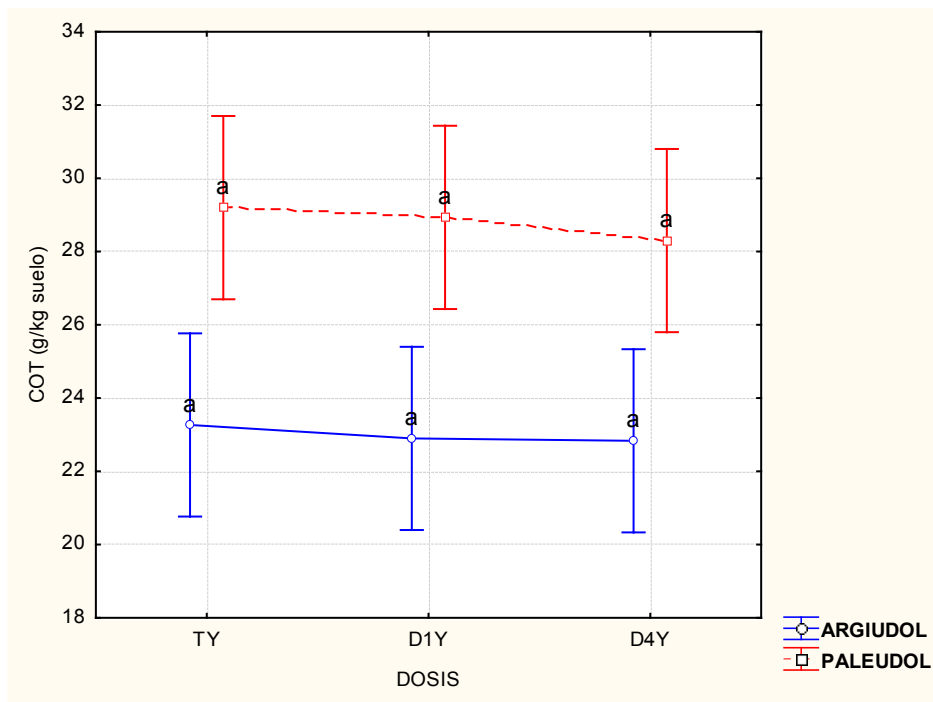


Figura 6. Contenido de carbón orgánico (g kg^{-1} de suelo) según tratamiento: TY=0 kg ha^{-1} , D1Y= 1000 kg ha^{-1} D4Y= 4000 kg ha^{-1} de dolomita con 200 kg ha^{-1} de yeso en los 3 casos, para 2 suelos de la región pampeana Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para un mismo suelo.

LÍMITE LÍQUIDO

El LL en el Argiudol y en el Paleudol evaluado no presentó diferencias significativas para las diferentes dosis de dolomita ($p < 0,05$, Figura 7). En el Argiudol si bien esta variable no se modificó con la adición de enmienda se observó que tendió a incrementarse con las dosis crecientes de dolomita. Este comportamiento se debería a la adición de Ca^{+2} y Mg^{+2} con las enmiendas, ya que los suelos saturados con Ca^{+2} y Mg^{+2} presentan mayores límites de plasticidad.

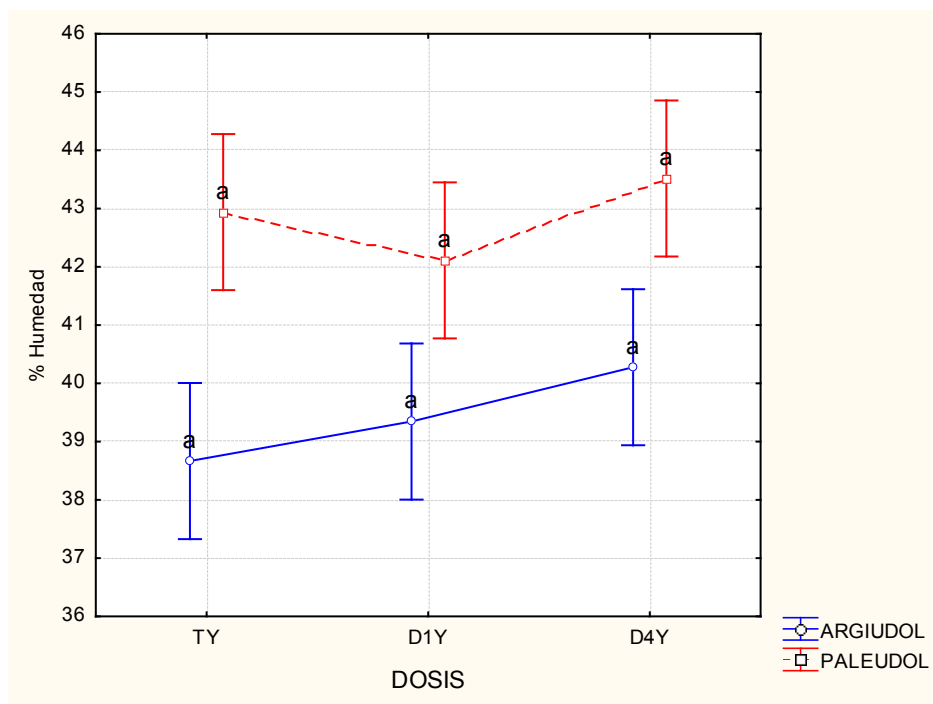


Figura 7. Límite Líquido (% de humedad) según tratamiento: TY=0 kg ha⁻¹, D1Y= 1000 kg ha⁻¹ D4Y= 4000 kg ha⁻¹ de dolomita con 200 kg ha⁻¹ de yeso en los 3 casos, para 2 suelos de la región pampeana Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas entre tratamientos para un mismo suelo.

RENDIMIENTO

Respecto a R (t ha⁻¹) en el Paleudol se presentaron diferencias significativas entre TY (3,051 t ha⁻¹) y los tratamientos D1Y (4,144 t ha⁻¹) y D4Y (4,421 t ha⁻¹), siendo el incremento de rendimiento entre TY y D4Y del 45% (1,37 t ha⁻¹). En el Argiudol no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, aunque de todas formas este ensayo siguió la tendencia del Paleudol presentando un incremento de 280 kg ha⁻¹ con D4Y respecto a D4Y (Figura 8). Ensayos realizados por otros autores obtuvieron también incrementos de rendimiento con aplicación de enmiendas. Estos incrementos fueron variables según dosis y tipo de enmienda, especie vegetal y características edafo-climáticas del sitio de ensayo. Entre ellos, Vivas y Fontanetto, (2003) verificaron en el centro de la provincia de Santa Fe, Dto. de San Justo, incrementos de rendimiento de soja del orden de 300 kg ha⁻¹, con el agregado de 100 kg ha⁻¹ de calcita

micronizada y aperdigonada (Ca= 37%). También, Vivas et al., (2001) utilizaron un fertilizante granulado con 51% de CaCO₃ y 37% de MgCO₃, aplicado en dosis de hasta 600 kg ha⁻¹ sobre cultivo de maíz en suelos del centro de Santa Fe de pH 5,4 y 5,9 y bajos contenidos de Ca. Los resultados mostraron incrementos del rendimiento cercanos a los 1000 kg ha⁻¹, con dosis de entre 400-600 kg ha⁻¹, aproximadamente. González et al., (2001) probaron el agregado de 100 kg ha⁻¹ de un granulado calcáreo dolomítico con 22% de Ca y 13% de Mg, y 50 kg ha⁻¹ de granulado de yeso con 22% de Ca y 18% de azufre (S), sobre un cultivo de trigo en San Nicolás, provincia de Buenos Aires, produciendo ligeros incrementos del rendimiento.

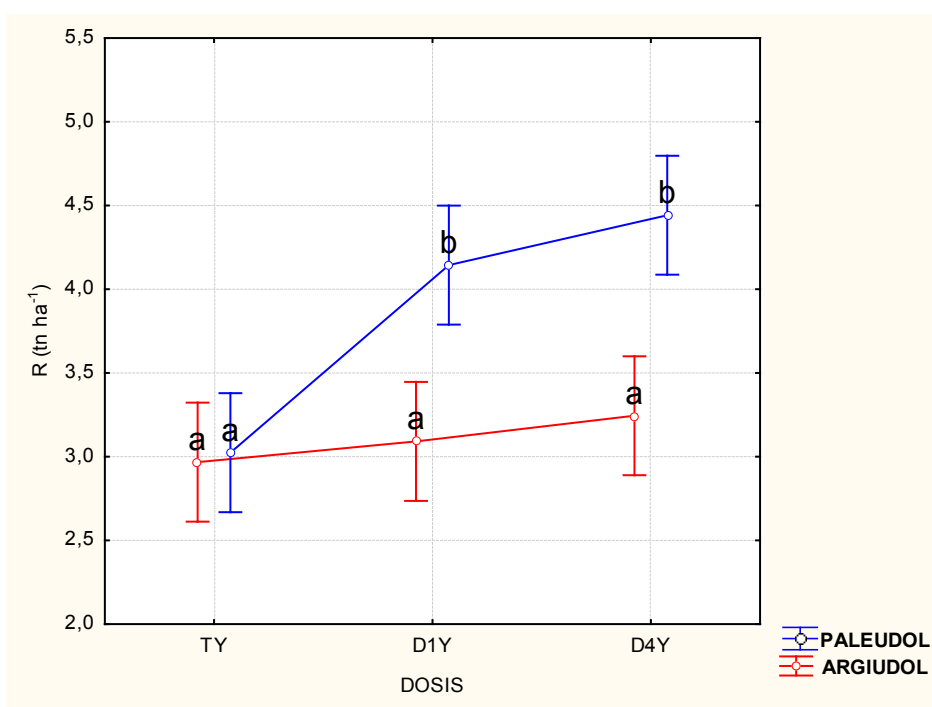


Figura 8. Rendimiento (t ha⁻¹) según: TY=0 kg ha⁻¹, D1Y= 1.000 kg ha⁻¹ D4Y= 4.000 kg ha⁻¹ de dolomita con 200 kg ha⁻¹ de yeso en los 3 casos, para 2 suelos de la Región Pampeana. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para un mismo suelo.

CONCLUSIONES

En el Paleudol el pH y el rendimiento de soja presentaron incremento con la adición de enmienda. En cambio, en el Argiudol no se observó respuesta con la adición de enmienda sobre ninguna de las variables estudiadas. Dicho comportamiento puede ser atribuido a factores limitantes del suelo y determinantes como el clima sobre el rendimiento. Respecto a la ausencia de efectos de las enmiendas sobre las propiedades físicas en ambos suelos podría deberse a que el tiempo de los ensayos para evaluar este tipo de variables fue insuficiente para observar un cambio significativo.

BIBLIOGRAFÍA

- **AASHTO T-89** (1996) Determining the liquid limit of soils. American Association of State Highway Transportation Officials
- **Alakukku L.; Weisskopf P.; Chamen W.C.T.; Tijink F.G.J.; Van Der Linden J.P.; Pires S.; Sommer C. & Spoor G.** 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review Part. 1. Machine/soil interactions. Soil and tillage research, 73: 145-160
- **Álvarez-Benedí J. & P. Marinero, 2003.** Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI.
- **Aragón, A.; M.G. García; R.R. Filgueira & A. Pachepsky.** 2000. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test; the relationship with organic carbon and water content. Soil & Tillage Research (56): 197-204.
- **ASTM.** 1992. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- **Blake G.R. & Hartge K.H.** 1986. Bulk density. Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Agronomy Monograph N° 9. Second edition, p. 363-376.

- **Caires EF; FJ Garbuio; S Churra; G Barth & JCL Correa.** 2008(a). Effects of soilacidity amelioration by surface living on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. *Eur J Agron* 28: 57-64.
- **Caires EF; PRS Pereira Filho; R Zardo Filho & IC Feldhaus.** 2008(b). Soil acidity and aluminium toxicity as affected by surface liming and cover oat residues under a no-till system. *Soil Use and Management* 24(3): 302-309.
- **Chan K.Y., & D.P. Heenan.** 1999. Lime-induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 63:1841-184.
- **Diaz-Zorita, M & G.A. Grosso.** 2000. Soil water related properties and the compactability of soils from the Pampean region of Argentina. *Soil Till. Res.* 54: 121-126.
- **Días Zorita, M.; S. Gambaudo.** 2007. Fertilización y encalado en alfalfa. En: Basigalup, D.H. *El cultivo de la alfalfa en la argentina.* Buenos Aires: INTA. Cap. 11. p 227-246. (ISBN 987-521-046-3)
- **Estelrich C., J. Ossola, L Juan, M. Vázquez & G. Millán.** 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el pH en dos suelos de la Pradera Pampeana. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16-20/4/12. Mar del Plata, Argentina. En soporte CD.
- **Fontanetto, H. & O. Keller.** 1999 . Fertilización azufrada en alfalfa. *Agromercado. Cuadernillo de Forrajeras* 30: 7-9).
- **Gambaudo, S; L Picco; A Cervetti & P Soldano.** 2007. Encalado en soja. *Experiencias de la campaña 2006/07. Información Técnica Cultivos de Verano, Campaña 2007.* EEA Rafaela, INTA. p. 183-184.
- **González B; S Gambaudo; D Bersano.; Tenorio; J Neifert & D Osenda.** 2001. 375 Enmiendas en trigo. *Revista Fertilizar* 6 (23):18-19.
- **Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L.Tisdale, & W.L. Nelson.** 1999. *Soil Fertility and Fertilizers.* 6th Edition. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. 499 p.

- **Heredia O.S, N.M. Arrigo & R. Romano Cavanagh.** 1997. Encalado: su efecto sobre las propiedades físicoquímicas de un argiudol. Rev. Facultad de Agronomía (UBA) 17 (3): 263 - 268.
- **Hillel, D.** 2004. Introduction to environmental soil physics. University of Massachusetts. Elsevier Academic Press, San Diego, CA 494 p.
- **Lanfranco J.W.** 1970. Carta de suelos de la Estación Experimental Julio Hirschhorn. Inédito
- **Mengel K.& Kirkby E.A.** 2000. Principios de Nutrición Vegetal. Ed. Instituto Internacional de la Potasa, Basilea Suiza. 4ta Ed. 1ra Ed. en español. 67 p.
- **Morales y Parada. 2005.** Apunte de Edafología. Acidez del suelo.
- **Pérez Arias, J.** 1992. Estudio de la estabilidad estructural del suelo en relación con el complejo de cambio (comportamiento de algunos suelos característicos españoles). Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Agrónomos (UPM) [antigua denominación].
- **Porta Casanellas, J.; López-Acevedo Requerín, M. & Roquero De Laburu, C.** 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. España. Mundi-Prensa.
- **Quiroga A. R., D.E. Buschiazzo, N. Peinemannb** (1999). Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas.
- **Richards, L.A.** 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. Soil Science 66(2): 105-110
- **SAGPyA** (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación Argentina). Dirección de Producción Agrícola. 2004. Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de Análisis de Suelos (SAMLA). CD-room.
- **SAMLA. 2004.** Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación Argentina. Dirección de Producción Agrícola. Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de Análisis de Suelos Agua, Vegetales y Enmiendas Orgánicas.

- Sainz Rozas H.R., E. Echeverria, P. Barbieri & M. Eyherabide.** 2014. Relevamiento y mapeo de la fertilidad en suelos agrícolas de la Región Pampeana. Fertilizar Asociación Civil. Revista N°29. p. 5-8.
- **Soane, B.D.,** 1990. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. Soil Till. Res. 16, 179-201.
- **StatSoft, Inc.** 2005. STATISTICA (data analysis software system), version 7.1. Disponible en: www.statsoft.com.
- **Terminiello A., M. Vázquez, M. García & F. Guilino.** 2006. Efecto de correctores de acidez sobre propiedades físicas de un suelo de la Pradera Pampeana. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 18-22/9. Salta, Argentina. Acta (trabajo completo): versión electrónica. Acta (resumen): 393.
- Tessier, D.** 2000. Material transmitido de forma personal a Cosentino D.J.
- **Thompson LM & R Troeh.** 1988. Los suelos y su fertilidad. Ed. Reverte 661 páginas
- **Torella JL; R Garuzzo & EC Faita.** 2007. Efecto del encalado sobre las propiedades químicas del suelo y la germinación del trébol rojo (*Trifolium pratense*). Argentina. Informaciones Agronómicas n°36. Pág. 14. 12/2007.
- **Vázquez M.** 2009. Capacitación para la recuperación de suelos degradados de establecimientos pequeños bonaerenses de Chascomús. Edición papel y CD-rom.
- **Vázquez M., A. Terminiello, A. Casciani, G. Millán, D. Cánova, P. Gelati, F. Guilino, A. Dorronzoro, Z. Nicora, L. Lamarche & García M.** 2012. Respuesta de la soja (*Glycine max* L. merr) a enmiendas básicas en algunos suelos de las provincias de Buenos Aires y Santa Fe. Revista de la Ciencia del Suelo 30(1): 43-56.
- **Vázquez M. & A. Pagani.** 2015. Calcio y Magnesio del suelo. En: Manejo de fertilización y enmiendas. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ed. Echeverría H., García F. INTA, Cap. 1: 317-356. 904 p.

- **Vázquez M. & R. Rotondaro.** 2005. Acidificación de suelos en el sur de Santa Fe y el norte bonaerense. Revista de la Asociación de Cooperativas Argentinas Acaecer 350: 26 – 32.

- **Vivas HS; H Fontanetto; R Albrecht; MA Vega & JL Hotián.** 2001. Fertilización con P y S en el doble cultivo trigo/soja. Residualidad en soja. Respuesta física y económica. Campaña 2001. INTA EEA Rafaela. Publicación Miscelánea N° 95

- **Vivas HS & H Fontanetto.** 2003. Fósforo, azufre y calcio en la producción de soja en el Dpto San Justo 2002/2003. INTA, Rafaela. Información Técnica de cultivos de verano. Campaña 2003. Publicación Miscelánea N° 100.

Walkley A. & A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37:29-38.

- **Zapata, R.D.** 2004. Química de la acidez del suelo. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

ANEXO

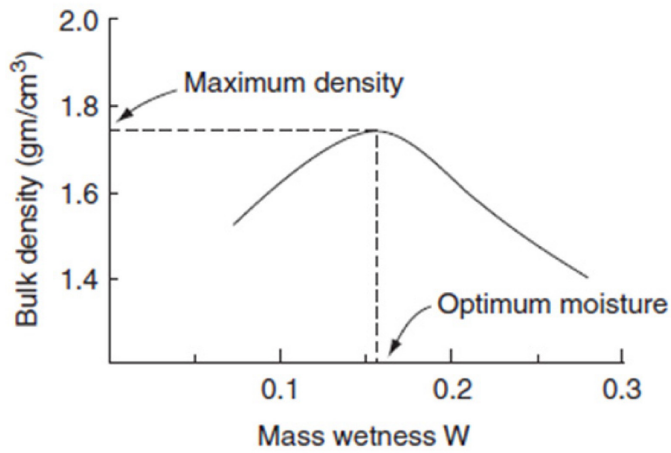


Figura 8. Gráfico modelo de ensayo Proctor, indicando puntos de máxima densidad y contenido crítico de humedad (Hillel Daniel, 2004).

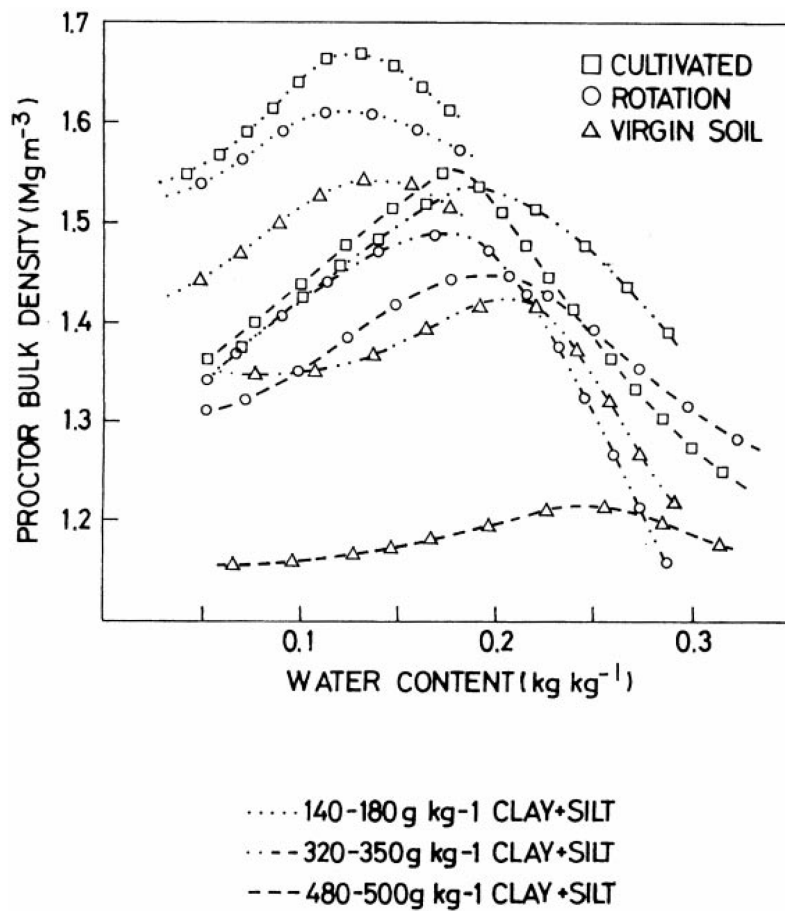


Figura 9. Ensayo Proctor en diferentes texturas de suelo con diferentes contenidos de materia orgánica (Hillel Daniel, 2004).

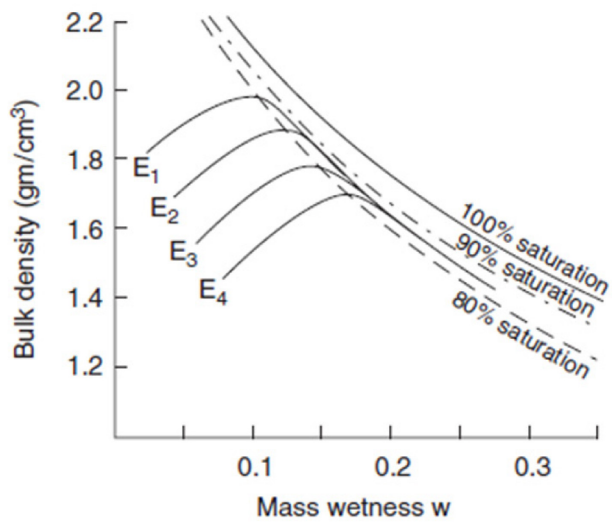


Figura 10. Ensayo Proctor vs saturación hídrica del suelo (Hillel Daniel, 2004).