

**Efectos sobre propiedades físicas de la remediación química de la acidez en suelos del ámbito templado argentino. Su incidencia en la producción vegetal.**

*Tesis presentada para optar al título de Doctora de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata*

**Natalia Elisabet Machetti**

Ingeniera Agrónoma-Universidad Nacional de La Plata-2015



Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales

Universidad Nacional de La Plata

Director de tesis

**Mabel Elena Vázquez**

Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)

Doctora en Ciencias Naturales (Universidad Nacional de La Plata)

Co-director de tesis

**Diego Julián Cosentino**

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Magister Scientiae (Universidad de Buenos Aires)

Docteur (Institut National Agronomique, París-Grignon)

“Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo, y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra situación”

***Ing. Agr. Natalia Machetti***

## **Agradecimientos**

A Pablo por acompañarme y escucharme en todo momento durante este camino

A mi hermana Jesica por hacerme confiar en mí misma

A Emilia, Juan Martín y Esteban

A mi co-director por transmitirme siempre ese optimismo que lo caracteriza y hacerme sentir que si se puede y por haber tomado el rol de director haciéndose responsable finalmente del desarrollo de esta tesis

A los evaluadores por sus aportes, el tiempo y dedicación para corregir esta tesis

Al CONICET por darme la oportunidad de atender exclusivamente a la realización de mi tesis

A la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales y a los grupos de trabajo de Física Aplicada, Manejo y Conservación de Suelos y Edafología

Al personal de la Estación Experimental Julio Hirschhorn

A la Ing. Andrea Pellegrini por su colaboración en las tareas de laboratorio, en la redacción de trabajos surgidos en esta tesis y su predisposición para ayudarme desinteresadamente en todo momento

Al Lic. Rodrigo Altamirano por su predisposición para colaborar en la realización del análisis estadístico y conclusiones

Al Dr. Daniel Bennardi por sus aportes en el área de la química analítica

A los Ing. Zacarías Nicora y Fernández Federico por su colaboración en el seguimiento de los ensayos a campo

A los alumnos, y algunos ya Ingenieros Agrónomos, Ribadulla Santiago, Bruballa Germán, Tropeano Francisco, Gutiérrez Nicolás, Giraudo Rafael y Boccanera Esteban por su ayuda en el muestreo a campo y determinaciones en laboratorio

## ÍNDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>CAPÍTULO Introducción general .....</b>	<b>1</b>
1.1	INTRODUCCIÓN.....	2
1.1.1	Incremento mundial de producción de alimentos: Cambio de modelo productivo y uso actual de la tierra en Argentina .....	2
1.1.2	Acidificación de suelos: consecuencias de una larga historia productiva y de cambios en la forma de producción .....	3
1.1.3	Consecuencias sobre suelo, plantas y microorganismos .....	6
1.1.4	Tratamiento de suelos ácidos .....	8
1.2	HIPOTESIS.....	10
1.2.1	Hipótesis 1 .....	10
1.2.2	Hipótesis 2 .....	10
1.2.3	Hipótesis 3.....	10
1.3	OBJETIVOS.....	10
1.3.1	Objetivo general .....	10
1.3.2	Objetivos específicos .....	10
1.4	MATERIALES Y MÉTODOS .....	11
1.4.1	Sitios de estudio y selección de lotes .....	11
1.4.2	Diseño experimental.....	14
1.4.3	Historia de los lotes, fecha y técnica de encalado. Siembra de los sitios experimentales.....	16
1.4.4	Análisis estadístico de los datos .....	16
1.4.5	Organización de la información obtenida para la presentación de los resultados	17
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO Evaluación de los efectos de enmiendas básicas sobre el complejo de cambio, componentes orgánicos y propiedades hidrofísicas del suelo en diferentes condiciones texturales. ....</b>	<b>18</b>
2.1	INTRODUCCIÓN ESPECÍFICA.....	19
2.1.1	Causas y consecuencias de la acidez en suelos de la Región Pampeana.....	19
2.1.2	Necesidad de corrección de la acidez y efectos en el suelo.....	20
2.2	HIPÓTESIS Y OBJETIVO ESPECIFICO 1 .....	21
2.2.1	Hipótesis.....	21
2.2.2	Objetivo .....	22
2.3	COMPLEJO DE CAMBIO Y CATIONES .....	22
2.3.1	Materiales y métodos .....	22
2.3.2	Resultados.....	23
2.3.3	Discusión, complejo de cambio .....	34
2.4	COMPONENTES ORGÁNICOS ESTABLES Y LÁBILES.....	38

2.4.1	Materiales y métodos .....	38
2.4.2	Resultados.....	39
2.4.3	Discusión propiedades orgánicas .....	46
2.5	PROPIEDADES HIDROFÍSICAS RELACIONADAS CON LA ARQUITECTURA EDÁFICA Y SU ESTABILIDAD .....	48
2.5.1	Materiales y métodos .....	48
2.5.2	Resultados.....	51
2.5.3	Discusión propiedades hidrofísicas .....	62
2.6	CONSIDERACIONES SOBRE D1 .....	65
2.7	CONCLUSIÓN.....	67
<b>3</b>	<b>Análisis de la relación entre las modificaciones de las propiedades medidas y el rendimiento de cultivos leguminosos de interés regional. ....</b>	<b>68</b>
3.1	INTRODUCCIÓN ESPECÍFICA.....	69
3.2	HIPÓTESIS Y OBJETIVO ESPECIFICO 2.....	71
3.2.1	Hipótesis.....	71
3.2.2	Objetivo .....	71
3.3	RENDIMIENTO DE ALFALFA EN EL HAPLUDOL .....	71
3.3.1	Materiales y métodos .....	71
3.3.2	Resultados del rendimiento del cultivo de alfalfa en el suelo Hapludol .....	71
3.3.3	Discusión rendimiento de alfalfa .....	73
3.4	RENDIMIENTO DE SOJA EN SUELOS ARGIUODOL Y PALEUDOL.....	74
3.4.1	Materiales y métodos .....	74
3.4.2	Resultados rendimiento cultivo de soja en el Argiudol y en el Paleudol.....	74
3.4.3	Discusión rendimiento de soja .....	81
3.5	CONCLUSIÓN.....	83
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO Evaluación del comportamiento de un Hapludol y en el rendimiento debidos al tránsito agrícola luego del encalado .....</b>	<b>84</b>
4.1	INTRODUCCIÓN ESPECÍFICA.....	85
4.2	HIPÓTESIS Y OBJETIVO ESPECIFICO 3.....	86
4.2.1	Hipótesis.....	86
4.2.2	Objetivo .....	86
4.3	MATERIALES Y MÉTODOS .....	87
4.3.1	Diseño experimental.....	87
4.3.2	Determinaciones .....	87
4.4	RESULTADOS .....	88
4.5	DISCUSIÓN.....	94
4.6	CONCLUSIÓN.....	95
<b>5</b>	<b>CAPITULO Reflexiones finales, utilidad de la información generada y posibles líneas de investigación .....</b>	<b>96</b>

5.1	SINTESIS DE LOS RESULTADOS .....	97
5.2	UTILIDAD DE LA INFORMACIÓN GENERADA .....	101
5.3	POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	102
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>103</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Caracterización del Hapludol thapto-árgico, 0-10cm de profundidad. Textura, pH, capacidad de intercambio catiónica (CIC) y cationes intercambiables (calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), sodio ( $\text{Na}^{+}$ ) y potasio ( $\text{K}^{+}$ )).....	12
Tabla 1.2 Precipitaciones mensuales registradas en el Colegio Inchausti, partido 25 de Mayo, Hapludol thapto-árgico 2014-2017. ....	12
Tabla 1.3 Caracterización del Argiudol típico (0-10cm de profundidad). Textura, pH, capacidad de intercambio catiónica (CIC) y cationes (calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), sodio ( $\text{Na}^{+}$ ) y potasio ( $\text{K}^{+}$ )). ..	13
Tabla 1.4 Precipitaciones mensuales registradas en la Estación Experimental Julio Hirschhorn, partido de La Plata, Argiudol típico, 2015-2017 (Pardi, 2017). ....	13
Tabla 1.5 Caracterización del Paleudol típico, 0-10cm de profundidad. Textura, pH, capacidad de intercambio catiónica (CIC) y cationes (calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), sodio ( $\text{Na}^{+}$ ) y potasio ( $\text{K}^{+}$ )) ..	14
Tabla 1.6 Precipitaciones registradas en el establecimiento Don Joaquín, partido de Magdalena, Paleudol típico, 2015-2017.....	14
Tabla 2.1 Resumen de los efectos de las enmiendas sobre el complejo de cambio en los tres suelos bajo estudio. D=dolomita, Y=yeso, M=meses, D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita. ....	33
Tabla 2.2 Resumen de los efectos de las enmiendas sobre componentes orgánicos del suelo en los tres suelos bajo estudio. D=dolomita, Y=yeso, M=meses, D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> y D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita.....	46
Tabla 2.3 Resumen de resultados de los efectos de las enmiendas sobre propiedades físicas en los tres suelos bajo estudio. D=dolomita, Y=yeso, M=meses, D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> , D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita. ....	62
Tabla 3.1 Resumen de los efectos de las enmiendas sobre el rendimiento de alfalfa en el Hapludol, D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita, CY= con yeso.....	73
Tabla 3.2 Resumen de los efectos de las enmiendas sobre el rendimiento de soja y sus componentes en el Argiudol y Paleudol. D=dolomita, Y=yeso.....	81
Tabla 4.1 Resumen de los efectos del tránsito y las enmiendas sobre propiedades físicas y rendimiento de alfalfa. D=dosis, Y=yeso, T=tránsito, D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita.....	94



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Distribución de valores de pH en el horizonte superficial (0 a 20 cm) de suelos <b>a</b> - prístinos (muestreados en 2011) y de suelos agrícolas ( <b>b</b> -muestreados en 2011 y <b>c</b> -2018) (Sainz Rosas, 2019).....	5
<b>Figura 1.2</b> Mapa de potencial hidrógeno (pH) en capa superficial (0-20cm). Período 2000-2016. Base de datos Laboratorio SUELOFERTIL (Herrera & Rotondaro, 2019).....	6
<b>Figura 1.3</b> Plano de ensayo Hapludol thapto-árgico.....	15
<b>Figura 1.2</b> Plano de ensayo Argiudol típico y Paleudol típico.....	15
<b>Figura 2.3.1.a</b> pH actual (1:2,5 suelo/H <sub>2</sub> O) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> y D3= 3000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg.ha <sup>-1</sup> de yeso (CY) y sin adición (SY) a los 8 y 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso-meses. Las barras representan el error estándar.....	24
<b>Figura 2.3.1.b</b> pH actual (1:2,5 suelo/H <sub>2</sub> O) en función de la dosis aplicada: 0 kg ha <sup>-1</sup> , 1000 kg ha <sup>-1</sup> , 2000 kg ha <sup>-1</sup> y 3000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita a los 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol.....	24
<b>Figura 2.3.2</b> Capacidad de intercambio catiónico (CIC, cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) en el Hapludol según tratamiento aplicado: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso (CY) y sin adición (SY) a los 8 y 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas para el factor dosis y letras mayúsculas diferentes indican diferencia significativa para el factor tiempo. Las barras representan el error estándar.....	25
<b>Figura 2.3.3.a</b> -Contenido de calcio (Ca <sup>+2</sup> , cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) <b>b</b> -magnesio (Mg <sup>+2</sup> , cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ), <b>c</b> - sodio (Na <sup>+</sup> , cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) <b>d</b> - potasio (K <sup>+</sup> , cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) y <b>e</b> - relación (Ca <sup>+2</sup> +Mg <sup>+2</sup> )/CIC según tratamiento aplicado: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1= 1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso (CY) y sin adición(SY), para 8 meses y 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso-tiempo. Las barras representan el error estándar.....	28
<b>Figura 2.3.4.a</b> pH actual (1:2,5 suelo/H <sub>2</sub> O) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> , D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso (CY) y sin adición (SY), para 7, 19 y 25 meses posteriores al encalado en el Argiudol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso-tiempo. Las barras representan el error estándar.....	29
<b>Figura 2.3.4.b</b> pH actual (1:2,5 suelo/H <sub>2</sub> O) en función de la dosis aplicada 0 kg ha <sup>-1</sup> , 1000 kg ha <sup>-1</sup> , 2000 kg ha <sup>-1</sup> , 3000 kg ha <sup>-1</sup> y 4000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita a los 25 meses posteriores al encalado en el Argiudol.....	29
<b>Figura 2.3.5</b> Contenido de calcio (Ca <sup>+2</sup> , cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) en el suelo Argiudol según tratamiento aplicado: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> , D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso (CY) y sin yeso (SY) a los 7 meses posteriores al encalado. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar. ....	30
<b>Figura 2.3.6.a</b> pH actual (1:2,5 suelo/H <sub>2</sub> O) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> , D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso (CY) y sin adición (SY) a los 9 y 22 meses posteriores al encalado en el Paleudol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso-tiempo. Las barras representan el error estándar.....	31
<b>Figura 2.3.6.b</b> pH actual (1:2,5 suelo/H <sub>2</sub> O) en función de la dosis aplicada: 0 kg ha <sup>-1</sup> , 1000 kg ha <sup>-1</sup> , 2000 kg ha <sup>-1</sup> , 3000 kg ha <sup>-1</sup> y 4000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita a los 22 meses posteriores al encalado en el Paleudol.....	31
<b>Figura 2.3.7</b> Capacidad de intercambio catiónico (CIC, cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> , D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso (CY) y sin adición (SY) 9 meses posteriores al encalado en el Paleudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar. ....	32

<b>Figura 2.3.8</b> Contenido de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ , $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) según tratamiento aplicado: T=0 $\text{kg ha}^{-1}$ , D1= 1000 $\text{kg ha}^{-1}$ , D2= 2000 $\text{kg ha}^{-1}$ , D3= 3000 $\text{kg ha}^{-1}$ y D4= 4000 $\text{kg ha}^{-1}$ de dolomita con adición de 200 $\text{kg ha}^{-1}$ de yeso (CY) y sin adición (SY) 9 meses posteriores al encalado en el Paleudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar.....	32
<b>Figura 2.3.9</b> Contenido de potasio (K, $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) según tratamiento aplicado: T=0 $\text{kg ha}^{-1}$ , D1= 1000 $\text{kg ha}^{-1}$ , D2= 2000 $\text{kg ha}^{-1}$ , D3= 3000 $\text{kg ha}^{-1}$ y D4= 4000 $\text{kg ha}^{-1}$ de dolomita con adición de 200 $\text{kg ha}^{-1}$ de yeso (CY) y sin adición (SY) 9 meses posteriores al encalado en el Paleudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar.....	33
<b>Figura 2.3.10</b> pH actual (1:2,5 suelo/H <sub>2</sub> O) en función de la dosis aplicada: 0 $\text{kg ha}^{-1}$ , 1000 $\text{kg ha}^{-1}$ , 2000 $\text{kg ha}^{-1}$ y 3000 $\text{kg ha}^{-1}$ de dolomita en el Hapludol a los 20 meses y 4000 $\text{kg ha}^{-1}$ en el Argiudol a los 25 meses y en el Paleudol a los 22 meses. Se incluyen el r <sup>2</sup> y las funciones lineales de cada suelo.....	35
<b>Figura 2.4.1</b> Carbono orgánico total (COT, g C $\text{kg}^{-1}$ suelo) <b>a-</b> según tratamiento aplicado: T=0 $\text{kg ha}^{-1}$ , D1=1000 $\text{kg ha}^{-1}$ , D2=2000 $\text{kg ha}^{-1}$ y D3=3000 $\text{kg ha}^{-1}$ de dolomita con adición de 200 $\text{kg ha}^{-1}$ de yeso (CY) y sin adición (SY) a los 8 y 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso-tiempo. Las barras representan el error estándar. <b>b-</b> correlación con la CIC .....	41
<b>Figura 2.4.2</b> Fracción gruesa (FG, g C $\text{kg}^{-1}$ suelo) según tratamiento aplicado: T=0 $\text{kg ha}^{-1}$ , D1=1000 $\text{kg ha}^{-1}$ , D2=2000 $\text{kg ha}^{-1}$ y D3=3000 $\text{kg ha}^{-1}$ de dolomita con adición de 200 $\text{kg ha}^{-1}$ de yeso (CY) y sin adición (SY) a los 8 y 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso-meses. Las barras de error representan el error estándar.....	41
<b>Figura 2.4.3</b> Fracción fina (FF, g C $\text{kg}^{-1}$ suelo) según tratamiento aplicado: T=0 $\text{kg ha}^{-1}$ , D1=1000 $\text{kg ha}^{-1}$ , D2=2000 $\text{kg ha}^{-1}$ y D3=3000 $\text{kg ha}^{-1}$ de dolomita con adición de 200 $\text{kg ha}^{-1}$ de yeso (CY) y sin adición (SY) a los 8 y 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción yeso-meses. Las barras de error representan el error estándar. ....	42
<b>Figura 2.4.4</b> Carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COM, g C $\text{kg}^{-1}$ suelo) según tratamiento aplicado: T=0 $\text{kg ha}^{-1}$ , D1=1000 $\text{kg ha}^{-1}$ , D2=2000 $\text{kg ha}^{-1}$ y D3=3000 $\text{kg ha}^{-1}$ de dolomita con adición de 200 $\text{kg ha}^{-1}$ de yeso y sin adición, a los 8 y 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas para dosis. ....	42
<b>Figura 2.4.5</b> Correlación glomalininas totales (GT, mg $\text{g}^{-1}$ suelo) y carbono orgánico total (COT g $\text{kg}^{-1}$ suelo) a los 8 meses posteriores al encalado en el Hapludol.....	43
<b>Figura 2.4.6</b> Carbono orgánico total (COT, g C $\text{kg}^{-1}$ suelo) según tratamiento aplicado: T=0 $\text{kg ha}^{-1}$ , D1=1000 $\text{kg ha}^{-1}$ , D2=2000 $\text{kg ha}^{-1}$ , D3=3000 $\text{kg ha}^{-1}$ y D4=4000 $\text{kg ha}^{-1}$ de dolomita con adición de 200 $\text{kg ha}^{-1}$ de yeso y sin adición, a los 7 meses posteriores al encalado en el Argiudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar. ....	44
<b>Figura 2.4.7</b> Fracción fina (FF, g C $\text{kg}^{-1}$ suelo) según tratamiento aplicado TCY=0 $\text{kg ha}^{-1}$ , D1CY=1000 $\text{kg ha}^{-1}$ y D4CY=4000 $\text{kg ha}^{-1}$ de dolomita con adición de 200 $\text{kg ha}^{-1}$ de yeso a los 19 meses posteriores al encalado en el Argiudol. Letras diferentes indican diferencias significativas para dosis. Las barras representan el error estándar.....	44
<b>Figura 2.4.8</b> Carbono orgánico total (COT, g C $\text{kg}^{-1}$ suelo) <b>a-</b> según tratamiento aplicado: T=0 $\text{kg ha}^{-1}$ , D1=1000 $\text{kg ha}^{-1}$ , D2=2000 $\text{kg ha}^{-1}$ , D3=3000 $\text{kg ha}^{-1}$ y D4=4000 $\text{kg ha}^{-1}$ de dolomita con adición de 200 $\text{kg ha}^{-1}$ de yeso (CY) y sin adición (SY), a los 9 meses posteriores al encalado en el Paleudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar. <b>b-</b> Correlación carbono orgánico total (COT, g C $\text{kg}^{-1}$ suelo) Capacidad de intercambio catiónico ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) .....	45
<b>Figura 2.5.1</b> Infiltración básica (Ib) según tratamiento aplicado: TCY=0 $\text{kg ha}^{-1}$ , D1CY=1000 $\text{kg ha}^{-1}$ , D2CY=2000 $\text{kg ha}^{-1}$ y D3CY=3000 $\text{kg ha}^{-1}$ de dolomita con adición de 200 $\text{kg ha}^{-1}$ de yeso a los 12 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar.....	51
<b>Figura 2.5.2</b> Densidad aparente 0-10 cm (Dap g $\text{cm}^{-3}$ ) según tratamiento aplicado: T=0 $\text{kg ha}^{-1}$ , D1=1000 $\text{kg ha}^{-1}$ , D2=2000 $\text{kg ha}^{-1}$ y D3=3000 $\text{kg ha}^{-1}$ de dolomita sin yeso (SY) y con adición de 200	

- kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) a los 12, 16 y 29 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre para la interacción dosis-yeso-meses. Las barras representan el error estándar. ....52
- Figura 2.5.3** Resistencia a la penetración (RP 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm y 30-40 cm, MPa) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita sin yeso (SY) (figura izquierda) y con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) (figura derecha) a los 8 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre dosis.....53
- Figura 2.5.4** Resistencia a la penetración (RP 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm y 30-40 cm, MPa) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) evaluada a los 12 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar. ....53
- Figura 2.5.5** Diámetro medio ponderado (DMP, mm) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita **a-** sin yeso (SY) y con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) con pre-tratamiento humectación rápida (HR) evaluada a los 8 meses posteriores al encalado. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar. **b-** con pre-tratamiento HR, degradación mecánica (DM), humectación lenta (HL) y promedio en los tratamientos sin yeso (SY) evaluado a los 8 meses posteriores al encalado. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis para un mismo pre-tratamiento **c-** evaluado a los 8 y 24 meses posteriores al encalado con pre-tratamiento HR. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción yeso-meses. ....55
- Figura 2.5.6.** Infiltración básica (Ib, cm h<sup>-1</sup>) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha<sup>-1</sup> con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso evaluada a los 19 meses posteriores al encalado en el Argiudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar. ....55
- Figura 2.5.7** Retención hídrica a 30 kPa (RH 30 kPa) según tratamiento aplicado T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup>, D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha<sup>-1</sup> sin yeso (SY) y con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) evaluada a los 7, 19 y 26 meses posteriores al encalado en el Argiudol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso. Las barras representan el error estándar. ....56
- Figura 2.5.8** Densidad aparente (Dap, g cm<sup>-3</sup>) según tratamiento aplicado: **a-**T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup>, D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha<sup>-1</sup> sin yeso y con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso evaluada a los 7 meses posteriores al encalado en el Argiudol. **b-** TCY=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1CY=1000 kg ha<sup>-1</sup> y D4CY=4000 kg ha<sup>-1</sup> con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso evaluada a los 7 y 19 meses posteriores al encalado. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-tiempo. En a y b las barras representan el error estándar.....57
- Figura 2.5.9.** Resistencia a la penetración (RP 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm y 30-40 cm, MPa) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2= 2000 kg ha<sup>-1</sup>, D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita sin yeso (SY) (figura izquierda) y con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) (figura derecha) evaluada a los 12 meses posteriores al encalado en el Argiudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras horizontales representan el error estándar. ....57
- Figura 2.5.10** Densidad máxima en función de la humedad (D<sub>max</sub>, g cm<sup>-3</sup>) evaluada a los 7 meses posteriores al encalado según tratamiento aplicado. TCY=0 kg ha<sup>-1</sup>; D1CY=1000 kg ha<sup>-1</sup> y D4CY=4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso en el Argiudol. Se incluyen las funciones de los tres tratamientos. ....58
- Figura 2.5.11** Límite líquido (% de humedad) evaluado a los 7 meses posteriores al encalado según tratamiento aplicado TCY=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1CY=1000 kg ha<sup>-1</sup> y D4CY=4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso en el Argiudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis de dolomita. Las barras representan el error estándar.....59
- Figura 2.5.12** Infiltración básica (Ib, cm h<sup>-1</sup>) según tratamiento aplicado: TCY=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1CY=1000 kg ha<sup>-1</sup> y D4CY=4000 kg ha<sup>-1</sup> con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso evaluada a los 12 meses posteriores

al encalado en el Paleudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar.....	59
<b>Figura 2.5.13</b> Resistencia a la penetración (RP 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm y 30-40 cm, Pa) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> , D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita sin yeso (SY) (figura izquierda) y con adición de 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso (CY) (figura derecha) evaluada a los 10 meses posteriores al encalado. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis.....	60
<b>Figura 2.5.14</b> Densidad máxima en función de la humedad ( $D_{max}$ , g cm <sup>-3</sup> ) evaluada a los 7 meses posteriores al encalado según tratamiento aplicado. TCY=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1CY=1000 kg ha <sup>-1</sup> y D4CY=4000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita con 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso en el Paleudol. Se incluyen las funciones en el gráfico.....	61
<b>Figura 2.5.15</b> Límite líquido (% de humedad) evaluado a los 7 meses posteriores al encalado según tratamiento aplicado TCY=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1CY=1000 kg ha <sup>-1</sup> y D4CY=4000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita con 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis de dolomita. ....	61
<b>Figura 2.5.16 a</b> -Capacidad de intercambio catiónico (CIC, cmolc kg <sup>-1</sup> ), <b>b</b> -Carbono orgánico total (COT, g C kg <sup>-1</sup> suelo), <b>c</b> -Infiltración básica (Ib, cm h <sup>-1</sup> ) <b>d</b> - Diámetro medio ponderado (DMP, mm) <b>e</b> - Retención Hídrica ( <b>e1</b> -30kPa, <b>e2</b> -50kPa, <b>e3</b> -1030kPa y <b>e4</b> -1520kPa) en el Hapludol según tratamiento aplicado: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita con 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso (CY) y sin yeso (SY) a los 8 y 20 meses posteriores al encalado. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas para el factor dosis y letras mayúsculas diferentes en CIC, donde también se evaluó a los 20 meses, indican diferencia significativa para el factor tiempo. Las barras representan el error estándar.....	67
<b>Figura 3.3.1</b> Rendimiento alfalfa (MS acumulada (Mg ha <sup>-1</sup> )) <b>a</b> - según tratamiento aplicado: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-meses <b>b</b> - según tratamiento aplicado: sin yeso (SY) y con adición de 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso (CY) evaluado. Letras diferentes indican diferencias significativas para el factor yeso. En los dos casos las barras representan el error estándar. ....	73
<b>Figura 3.4.1 a, b, c, d</b> Suelo Argiudol. Componentes del rendimiento de soja y rendimiento (t ha <sup>-1</sup> ) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita sin yeso (SY) y con adición de 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso (CY). Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar. ....	77
<b>Figura 3.4.2</b> Suelo Paleudol. Componentes del rendimiento de soja y rendimiento (t ha <sup>-1</sup> ) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita sin yeso (SY) y con adición de 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso (CY). <b>a, b y c</b> - Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre dosis. <b>a y b</b> -letras mayúsculas diferentes indican diferencias para el factor yeso. <b>d, e, f y g</b> - letras diferentes indican diferencias para la interacción dosis-yeso. En todas las figuras las barras representan el error estándar. ....	81
<b>Figura 4.1</b> Plano de ensayo Hapludol Thapto Árgico .....	87
<b>Figura 4.2</b> Infiltración básica (Ib, cm h <sup>-1</sup> ) según tratamientos aplicados: TCY=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1CY=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2CY=2000 kg y D3CY=3000 kg ha <sup>-1</sup> con adición de 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso, y ST (sin tránsito) y CT (con tránsito). Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar. ....	89
<b>Figura 4.3</b> Densidad aparente (Dap g cm <sup>-3</sup> ) según tratamientos aplicados: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> sin yeso (SY) y con adición de 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso (CY), ST (sin tránsito) y CT (con tránsito) <b>a</b> -evaluada a los 12 meses posteriores al encalado. Letras diferentes indican diferencias significativas para dosis <b>b</b> -16 meses posteriores al encalado. Letras diferentes indican diferencias significativas para dosis. Las barras representan el error estándar. ....	90
<b>Figura 4.4.a, b, c, d</b> Resistencia a la penetración (RP, MPa) según tratamientos aplicados: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg y D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> con adición de 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso (CY), y sin tránsito (ST) y con tránsito (CT) evaluada a los 12 meses posteriores al encalado. De 0-10 y de 30-40 cm de profundidad letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas para dosis. De 10-20 cm de profundidad letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas para la interacción	

dosis pasadas. De 20-30cm letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas para tránsito.....	91
<b>Figura 4.5</b> Diámetro medio ponderado (DMP, mm) según tratamientos aplicados: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg y D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> sin yeso (SY) y con adición de 200 kg ha <sup>-1</sup> de yeso (CY), y sin tránsito (ST) y con tránsito (CT) evaluada a los 12 meses posteriores al encalado. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas para dosis. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias para la interacción yeso-pasadas. ....	92
<b>Figura 4.6</b> Rendimiento alfalfa (MS acumulada (Mg ha <sup>-1</sup> )) <b>a-</b> según tratamiento aplicado con tránsito(CT) y sin tránsito (ST). Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción meses-tránsito. <b>b-</b> según tratamiento aplicado: T=0 kg ha <sup>-1</sup> , D1=1000 kg ha <sup>-1</sup> , D2=2000 kg ha <sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha <sup>-1</sup> de dolomita con tránsito (CT) y sin tránsito (ST). Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-tránsito. En los dos casos las barras representan el error estándar. ....	93
<b>Figura 5.1</b> Efectos del encalado sobre el suelo y rendimiento de alfalfa en un Hapludol con diferentes dosis de dolomita y tránsito agrícola. ....	99
<b>Figura 5.2</b> Efectos del encalado con diferentes dosis de dolomita sobre el suelo y rendimiento de soja en un Argiudol, ....	99
<b>Figura 5.3</b> Efectos del encalado con diferentes dosis de dolomita sobre el suelo y rendimiento de soja en un Paleudol. ....	100

## **RESUMEN**

### **Efectos sobre propiedades físicas de la remediación química de la acidez en suelos del ámbito templado argentino. Su incidencia en la producción vegetal.**

La región pampeana argentina padece acidificación en algunos suelos por su historia productiva y tecnología aplicada en las últimas décadas, derivando en consecuencias negativas sobre algunos cultivos de cosecha. Experiencias de encalado realizadas en las provincias de Buenos Aires y Santa Fe mostraron efectos positivos sobre el aumento de pH de suelo y la saturación de bases teniendo mejorando las propiedades físicas y el rendimiento. El objetivo de esta tesis fue evaluar en tres suelos del ámbito templado argentino (Hapludol, Argiudol y Paleudol) la incidencia de diferentes prácticas de encalado sobre propiedades físicas, físico-químicas y químicas, sobre el rendimiento de especies de interés regional, y sobre la tolerancia generada ante procesos de compactación. A partir de mediciones a campo y determinaciones en laboratorio, se analizó el impacto de diferentes dosis y combinaciones de enmiendas en el tiempo sobre el complejo de cambio y cationes, componentes orgánicos y propiedades hidrofísicas relacionadas con la arquitectura edáfica. Se determinó el rendimiento de soja y alfalfa para establecer una relación con las variables analizadas. En los tres suelos el pH aumentó conforme a las dosis y dichos efectos se incrementaron con el tiempo. En el Hapludol la menor dosis de enmienda produjo un aumento en la capacidad de intercambio catiónico asociado a la materia orgánica, generando mejoras en las variables físicas. En el Argiudol y Paleudol se observaron mejoras en las propiedades hidrofísicas y estructurales, vinculadas a incrementos de cationes intercambiables, con mayores dosis de enmiendas que en el Hapludol. El rendimiento de alfalfa en el Hapludol se incrementó con todas las dosis de dolomita y yeso. El rendimiento de soja en el Argiudol y Paleudol no se modificó con la adición de enmienda. Los beneficios que generaron las enmiendas en el Hapludol le confirieron tolerancia a los procesos de compactación a la estructura del suelo y al rendimiento.

**Palabras clave:** dolomita, arquitectura edáfica, acidificación del suelo

## **ABSTRACT**

### **Effects on physical properties of the chemical remediation of acidity in soils of the Argentine temperate area. Its impact on plant production.**

Due to agriculture production and applied technology in las decades, the Argentine Pampean region suffers soil acidification, resulting in negative consequences on some cash crops. Liming experiments carried out in Buenos Aires and Santa Fe provinces showed positive effects on soil pH and base saturation, having beneficial effects on soil physical properties and yield. The goal of this thesis was to evaluate in three soils of the argentine temperate area (Hapludol, Argiudol and Paleudol), the impact of different liming practices on soil physical, physical-chemical and chemical properties, on the performance of soybean and alfalfa, and on the tolerance generated before compaction processes. Based on field measurements and laboratory determinations, the impact of different doses and combinations of amendments over time on the exchange complex and cations, organic components and hydrophysical properties related to the edaphic architecture was analyzed. The yield of legume species was determined to establish a relationship with the variables analyzed. In the three soils the pH increased according to the doses and these effects increased over time. In Hapludol, the lower dose of amendment produced an increase in the cation exchange capacity associated with organic matter, generating improvements in the physical variables. In Argiudol and Paleudol, improvements were observed, linked to increases in exchangeable cations, on hydrophysical and structural properties with higher doses than in Hapludol. The alfalfa yield in the Hapludol increased with all doses of dolomite and gypsum. The soybean yield in Argiudol and Paleudol did not change with the addition of amendment. The benefits generated by the amendments in the Hapludol enhanced soil tolerance to compaction processes through better structure and yields.

**Keywords:** dolomite, soil architecture, soil acidification

# **1 CAPÍTULO**

## **Introducción general**



## 1.1 INTRODUCCIÓN

### 1.1.1 Incremento mundial de producción de alimentos: Cambio de modelo productivo y uso actual de la tierra en Argentina

Según FAO (2017), el incremento de la producción alimentaria y el crecimiento económico se han conseguido muchas veces a costa del ambiente natural. En el mundo las sociedades han cambiado debido a los pasos que han dado la tecnología, la rápida urbanización y las innovaciones en los sistemas productivos. La demanda de alimentos está cambiando hacia un mayor consumo de carne y productos lácteos, así como otros alimentos de producción intensiva, lo que tiene serias repercusiones en el uso sostenible de los recursos naturales. El consumo de cereales, semillas oleaginosas y caña de azúcar para la producción de biocombustibles también ha aumentado.

Si bien la producción agrícola creció más del triple entre 1969 y 2015, debido en parte a las tecnologías de la Revolución Verde que mejoraron la productividad, y a la expansión significativa del uso de la tierra, el agua y otros recursos naturales para fines agrícolas, para cubrir la demanda en 2050, FAO estima que la agricultura tendrá que producir casi un 50% más de alimentos, forraje y biocombustible de los que producía en 2012 (FAO, 2017).

Existe actualmente una creciente preocupación mundial por alcanzar una agricultura sustentable. Ello se debe a: a) que los recursos de tierras arables son finitos; b) problemas crecientes y generalizados de degradación de suelos; c) necesidad de preservar el recurso suelo para su utilización a largo plazo; d) efectos sobre el cambio climático y e) crecimiento de la población de los países en desarrollo.

El incremento en la demanda mundial de alimentos y las nuevas tecnologías impulsaron a la transformación del modelo agrícola argentino. En los años setenta comienza su expansión el cultivo de soja, incidiendo sobre el desempeño de otras actividades agrícolas y ganaderas. Internacionalmente se presentaba un nuevo paradigma mundial, originado en Estados Unidos por el ingeniero agrónomo Norman Ernest Borlaug (1970), cuyo objetivo era mitigar el hambre en el mundo mediante el uso de nuevas variedades de cultivos, creadas por mejoramiento genético, ya sea por cruzamientos naturales o modificadas genéticamente por medio de la biotecnología (organismos genéticamente modificados o transgénicos). (Su metodología se fundamentaba en el aumento de los rendimientos por unidad de superficie. Este hito histórico mundial, fue denominado "Revolución Verde" (Grillo & Rengifo, 1990; Ceccon, 2008; Barrera, 2011).

El proceso de sojización que comenzó a mediados de los 70 determinó en Argentina que en veinte años esta actividad se ubicara como el cultivo con mayor superficie implantada,

pasando de menos de 40 mil hectáreas a más de 5 millones a comienzos de los noventa. La ganadería, actividad de bajo dinamismo, mostró desde entonces una tendencia decreciente de la evolución de las existencias y de la producción de carne vacuna, contrariamente a lo sucedido con la agricultura. La consolidación de los cambios tecnológicos impulsados a lo largo de las décadas previas y la adopción del nuevo paquete tecnológico vinculado a las semillas transgénicas, condujeron a que desde mediados de los noventa el ritmo de expansión del cultivo de soja se acelerara fuertemente. La competencia por el uso del suelo implicó que el cultivo de soja desplazara otras actividades como cultivos regionales y ganadería de las zonas productivas más importantes hacia regiones marginales. Este desplazamiento se debe a que durante varios años las ganancias por la producción sojera han sido tan diferenciales que muchos productores, aun sabiendo el daño que el monocultivo podía generar en el suelo, siguieron produciéndola continuamente y a que la posibilidad de rotación se hace más remota cuando buena parte de los suelos productivos se trabajan bajo la forma del arriendo (Reboratti, 2010).

El proceso de sojización no fue igual en todo el país. Según un relevamiento de la cobertura del suelo (secuencia de cultivos) realizado por Caride et al., 2012 en suelos Argiudoles de la Pampa Ondulada (1.294.488 ha) en el periodo 2000-2005 utilizando Landsat 5 TM e imágenes Landsat 7 ETM + se observó que en el 54% de la superficie analizada se realizaba agricultura continua. De dicha superficie el 19 % se encontró destinado a la secuencia soja-trigo/soja-maíz (recomendada para la zona bajo análisis) y el 14 % a monocultivo de soja.

Ante este panorama se prevé que el rinde promedio de Argentina de soja alcance un nuevo récord de 3,35 t ha<sup>-1</sup> al cierre del ciclo 2019, permitiendo acumular un volumen final de 56 millones de toneladas (Bolsa de cereales, 2019).

Actualmente la Argentina es el tercer productor mundial de soja, el primer exportador mundial de aceite y el segundo de harina de soja. Este cultivo representa el rubro de exportación de mayor incidencia en el producto bruto agropecuario del país, y el mayor generador de divisas. Ocupa una amplia zona ecológica que se extiende desde los 23° (en el extremo norte del país) a los 39° de latitud sur, concentrándose principalmente en la Región Pampeana. Santa Fe, Córdoba y Buenos Aires representan las provincias de dicha región con mayor producción por área sembrada y magnitud de rendimientos.

### **1.1.2 Acidificación de suelos: consecuencias de una larga historia productiva y de cambios en la forma de producción**

La acidificación de los suelos responde tanto a causas naturales como antrópicas, dentro de las primeras la lixiviación de bases intercambiables por infiltración de agua (FAO, 2004).es el proceso natural de mayor incidencia en la acidificación. Este proceso depende de

la naturaleza químico-mineralógica, la alterabilidad de los minerales presentes y la textura del suelo (Vázquez & Pagani, 2015).

La Región Pampeana en la actualidad padece fenómenos de acidificación antrópica (Gelati & Vázquez, 2007; Iturri et al. 2011; García & Vázquez, 2012; INTA Balcarce y la Asociación Fertilizar, 2019) debido a su larga historia productiva; a la transformación de planteos mixtos de sistemas productivos en agricultura intensiva con reemplazo de cultivos tradicionales como maíz (*Zea mays* L.) por soja, trayendo como consecuencia una menor incorporación de residuos post-cosecha; a la mayor exportación de bases a través de la producción agrícola y pecuaria ya sea por los rendimientos por unidad de superficie como por las especies utilizadas (Lemenih et al., 2004; García & Vázquez, 2012); a la intensificación de la agricultura en general; al empleo de germoplasma de alto potencial de rendimiento y al incremento en el uso de fertilizantes nitrogenados de alto índice de acidez (Liebig et al., 2002; Vázquez & Pagani, 2015) los cuales alcanzaron en 2017, 1 989 004 Mg a nivel nacional (CIAFA, 2018).

La elevada tasa de extracción de nutrientes básicos que no fue repuesta en igual magnitud, está generando un proceso de degradación que pone en peligro la sustentabilidad de los suelos (Cruzate & Casas, 2017).

También estaría contribuyendo al proceso de acidificación la implementación de labranzas reducidas o cero con su posterior acumulación de materia orgánica en superficie (Vázquez & Pagani, 2015). Según Nelson y Oades (1998) la materia orgánica en suelos alcalinos produce disminución de pH debido a la mineralización del nitrógeno, del azufre y del fósforo orgánicos, a la disociación de ligandos orgánicos y a la hidratación del CO<sub>2</sub> producido en su descomposición. Bajo siembra directa esta situación puede estar afectada también por la alta tasa de fertilización nitrogenada generalmente utilizada en estos planteos productivos (Iturri, 2015), siendo difícil discriminar ambos efectos.

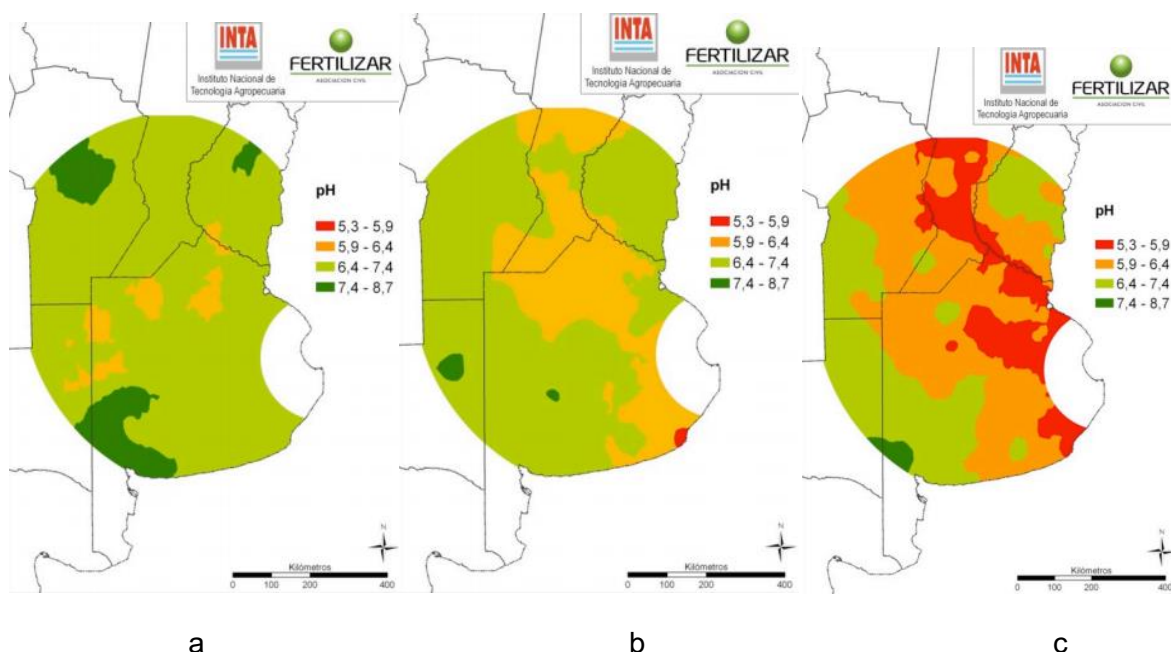
Algunos estudios han demostrado la importancia creciente, en el ámbito agropecuario, de la deposición de elementos atmosféricos acidificantes provenientes de la actividad industrial y otras fuentes de contaminación (Crossen et al. 2009; Noyes et al., 2009; Duan et al., 2016). Debido a los cambios y a la intensificación del uso de la tierra algunos investigadores han realizado estudios acerca de la magnitud de las áreas afectadas por el proceso de acidificación.

Sainz Rosas (2019) observó a partir de 570 muestras georreferenciadas sobre lotes prístinos y cultivados que en 40 a 50 años de agricultura el pH se redujo en promedio 0,32 unidades. Los mismos lotes que fueron muestreados en 2011 (0-20cm) volvieron a

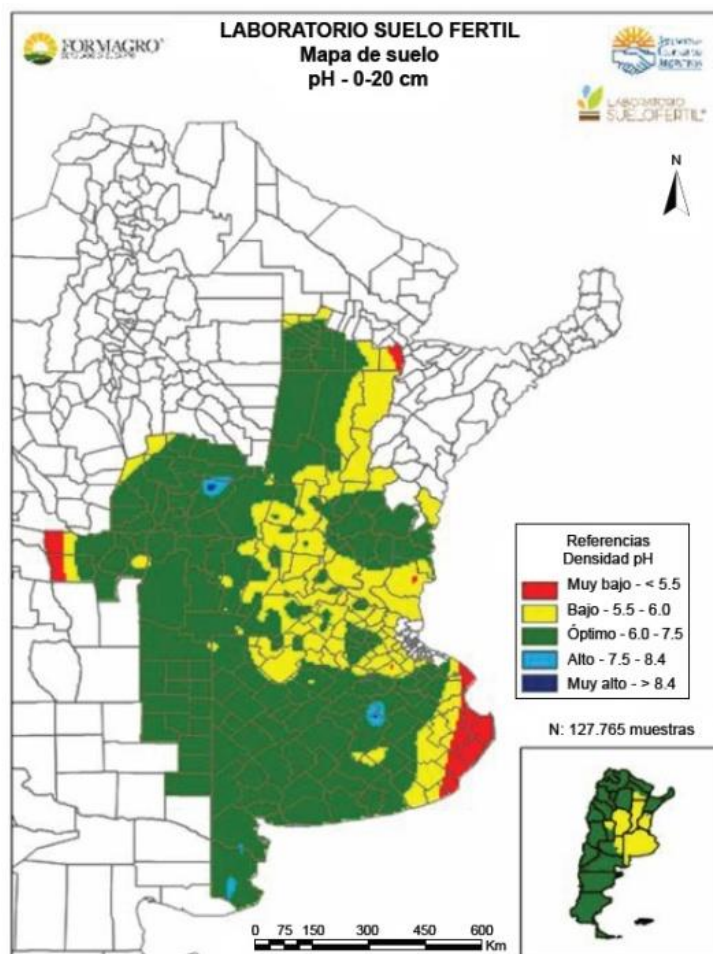
muestrearse en 2018, y se comprobó que en los últimos 7 años de agricultura el pH se redujo en promedio 0,21 unidades (Figura 1.1.a, b y c).

Herrera & Rotondaro (2019) realizaron una caracterización general de la fertilidad de los suelos pampeanos en base a datos de análisis de suelos llevados a cabo desde el 2000 hasta el 2015 inclusive (16 años) por el Laboratorio SUELOFERTIL, perteneciente a la Asociación de Cooperativas Argentinas (ACA), comprendiendo más de 500 localidades distribuidas en las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba, Entre Ríos y La Pampa (Figura 1.2). Observaron valores bajos de pH (menores a 6,0), límite crítico para varias especies de relevancia regional, principalmente en el área núcleo de producción de granos: NE y N de Buenos Aires, S de Santa Fe, SE de Córdoba y O de Entre Ríos. Si se comparan estos resultados con los de Sainz Rozas et al. (2011), puede deducirse que el área con pH inferior a 6,0 en el centro y este de la Región Pampeana, se ha extendido.

En buena parte, esto podría deberse a la mayor extracción de bases (calcio, magnesio y potasio), no solo por mayor nivel de producción sino también por la mayor historia de actividad agrícolas sobre los suelos de esta región (Cruzate & Casas 2017).



**Figura 1.1** Distribución de valores de pH en el horizonte superficial (0 a 20 cm) de suelos **a**- prístinos (muestreados en 2011) y de suelos agrícolas (**b**-muestreados en 2011 y **c**-2018) (Sainz Rosas, 2019).



**Figura 1.2** Mapa de potencial hidrógeno (pH) en capa superficial (0-20cm). Período 2000-2016. Base de datos Laboratorio SUELOFERTIL (Herrera & Rotondaro, 2019).

Estudios realizados por Carrizo et al. (2011) y por Sainz Rosas (2011) en la región central de Santa Fe y norte de Buenos Aires indicaron que los suelos manifiestan una significativa pérdida de bases intercambiables y un progresivo descenso en los valores de pH, alcanzando en algunos casos valores inferiores a 6. Vázquez & Rotondaro (2005) informaron que el 68,7 y 75,7% de las 2000 muestras analizadas para las campañas 2000/01 a 2004/05, en las zonas sur de Santa Fe y norte de Buenos Aires, respectivamente, manifestaron valores de pH <5,9, evidenciando la gravedad de la situación para las áreas mencionadas. Otras evaluaciones pusieron de manifiesto situaciones semejantes en el sur de Córdoba y Santa Fe (García & Vázquez, 2012). Estudios más recientes determinaron que la agricultura produjo un descenso significativo en los valores de pH, en promedio, de 0,35 unidades, es decir una caída del 5% respecto de sus niveles iniciales, incidiendo sobre la disponibilidad de los micronutrientes (INTA, 2016).

### 1.1.3 Consecuencias sobre suelo, plantas y microorganismos

La acidez edáfica es considerada como una de las principales limitantes para la producción agropecuaria a nivel mundial, afectando en forma directa al crecimiento de las

plantas como resultado de la restricción del desarrollo radicular (Barceló & Poschenrieder, 2002). En forma indirecta incide negativamente en la disponibilidad de nutrientes, siendo una de las mayores limitaciones de la baja productividad en los suelos ácidos (Rahman et al., 2018); en el incremento de elementos fitotóxicos, en la actividad microbiana y hasta en las condiciones físicas de los suelos (Zapata, 2004). El pH es usado comúnmente como indicador de esta propiedad y por lo tanto está asociado directa o indirectamente al crecimiento y la producción de los cultivos (Nicoldi et al. 2008).

Si bien la acidez, desde el punto de vista estrictamente químico, está constituida por sistemas con  $\text{pH} < 7$ , desde el punto de vista productivo, los perjuicios en el crecimiento de las plantas se producen a diferentes niveles de pH según los sistemas suelo-clima-planta (Vázquez & Pagani, 2015).

Desde el punto de vista del desarrollo vegetal, la acidificación deriva en múltiples consecuencias. Algunas de ellas son de naturaleza directa, como las deficiencias de nutrientes secundarios básicos, debido a una disminución de la reserva de calcio (Ca) y magnesio (Mg), y alteración de la dinámica de otros nutrientes, como N, fósforo (P) y molibdeno (Mo) (Vázquez & Pagani, 2015). De manera indirecta, en condiciones de pH inferior a 5,5 se producen toxicidades como la de aluminio (Al), manganeso (Mn) y hasta el propio hidrógeno (H) en situaciones extremas (FAO, 2015). Millán et al. (2010) verificaron por primera vez en el ámbito de la Región Pampeana argentina el aumento de niveles de Al intercambiable. Sin embargo, los autores califican los valores hallados como inferiores a los considerados tóxicos. Paralelamente, señalan las ventajas de la reducción de la solubilidad del elemento, comprobada en este mismo ámbito, cuando los suelos son tratados con enmiendas básicas.

Las leguminosas son las especies más afectadas, entre ellas, soja, alfalfa (*Medicago sativa* L.) y otros tréboles forrajeros. La implantación, la perdurabilidad y el rendimiento de estas especies están seriamente condicionados por el proceso de acidificación creciente, especialmente en suelos de textura gruesa dentro de la región (Vivas, 2004; Vázquez et al., 2010).

Las leguminosas requieren Mo, microelemento vital para el proceso de fijación simbiótica de N. El Mo aumenta su disponibilidad a medida que se eleva el pH del suelo (Chico Ruíz, 2016), por lo tanto, si el suelo contiene suficiente cantidad de este elemento, el encalado corrige esta deficiencia e incide indirectamente en la provisión de N.

Desde el punto de vista microbiológico, esta problemática afecta la composición de la flora y genera disminución en su actividad para la mayor parte de las especies (Renella et al 2007; Rousk et al. 2010a; 2010b).

El proceso de acidificación también tiene consecuencias indirectas sobre algunas propiedades físicas, tanto estacionarias como dinámicas (estabilidad estructural, aparición de impedancias mecánicas y dinámica del agua) (Alburquerque et al., 2003; Vázquez et al., 2009).

#### 1.1.4 Tratamiento de suelos ácidos

Para la corrección de la acidez se han usado, tradicionalmente, productos correctores o enmiendas, tales como calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), cal viva ( $\text{CaO}$ ) o apagada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), entre otros (Sadeghian Khalajabadi & Díaz Marín, 2020). Estos productos que contienen  $\text{Ca}^{+2}$  y/o  $\text{Mg}^{+2}$  en diferentes proporciones, han dado origen a la práctica denominada encalado. Mientras que en situaciones de deficiencia particular de estos elementos puede utilizarse fertilización cálcica y/o magnésica, siendo los productos utilizados, en general, derivados de los minerales mencionados (Vázquez & Pagani, 2015; IRAM 22451).

La aplicación de estos materiales produce dos efectos, por un lado, suministra  $\text{Ca}^{+2}$  y/o  $\text{Mg}^{+2}$ , y por otro eleva el pH, neutralizando el  $\text{H}^+$  del suelo. 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 su incorporación en calidad de cationes estructurantes, mejorando la dinámica del aire y el agua del suelo, incidiendo, a su vez, en la actividad microbiológica del mismo (Vázquez & Pagani; 2015).

Para agregar  $\text{CaCO}_3$  puede utilizarse caliza o calcita, la cual contiene alrededor de 40% de  $\text{CaCO}_3$  o conchilla molida, que cuenta con un porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  mayor al 90%. Si junto al  $\text{CaCO}_3$  se desea aportar  $\text{Mg}^{+2}$ , puede utilizarse dolomita, la que posee alrededor de 21% de  $\text{CaCO}_3$  y 13% de  $\text{MgCO}_3$ .

Además de la importancia de la elección del tipo de enmienda a utilizar y su forma de aplicación, se ha comprobado que la dosis del corrector juega un rol muy importante en la eficiencia de la práctica. Vázquez et al. (2012) encontraron en suelos de Buenos Aires y Santa Fe que dosis superiores a  $1500 \text{ kg ha}^{-1}$ , 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, a causa, probablemente, de aumentos en la resistencia mecánica del suelo, originada por recristalización de los carbonatos de la propia enmienda en el espacio poroso, según los autores.

La capacidad reguladora o buffer de un suelo se define como la cantidad de ácido o base necesaria para cambiar su pH en una unidad (Sá Mendonça et al., 2006). Esta propiedad se debe a la habilidad de los pares conjugados ácido-base presentes, de transferir protones entre ellos; pares que pueden estar tanto en la solución como en los sólidos edáficos (Van Rensburg et al., 2009) y puede ser utilizada para evaluaciones cuantitativas del requerimiento

de correctores básicos, ya que mayor capacidad buffer indica mayor cantidad de enmienda necesaria para neutralizar la acidez del suelo bajo similares valores de pH actual (Xu et al., 2012; Wang et al., 2015). Es por este motivo que diferentes tipos de suelos transitan estos procesos de acidificación y recuperación con diferente dinámica y velocidad. Así suelos gruesos, con baja saturación de bases y escasa materia orgánica, ante impactos semejantes, se acidifican más rápido que suelos arcillosos de alta saturación y elevado contenido de materia orgánica, pero también pueden corregirse con menores dosis de enmiendas (Van Rensburg et al., 2009)

En siembra directa la aplicación de productos correctores sólidos de naturaleza carbonatada constituye un problema, ya que no existe la posibilidad de la incorporación de los mismos a través de labranzas. La baja solubilidad natural de estos productos, magnificada por la falta de interacción suelo-corrector (ácidos orgánicos, CO<sub>2</sub>, agua) reduce notablemente la eficacia de la práctica. Algunos investigadores (Salvada Wadt et al., 1999; Farina et al., 2000; Amaral et al., 2004; Vázquez et al., 2013) han propuesto la aplicación de dolomita o caliza, en forma conjunta con yeso (CaSO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O).

El yeso tiene la ventaja de poseer mayor solubilidad, pudiendo así constituir un suministro inicial de Ca<sup>+2</sup> generando la floculación de las arcillas, en tanto se produce la disolución paulatina de los carbonatos para aumentar el pH. Paralelamente, varios autores han indicado que los rendimientos de los cultivos leguminosos se pueden incrementar significativamente con la aplicación de yeso (CaSO<sub>4</sub>), debido al aporte adicional de azufre, un nutriente muy exigido por estas especies (Torres Duggan et al., 2012, García Lamothe, 2017). Esto sugiere que la eficiencia de la aplicación superficial de las enmiendas en planteos de siembra directa, podría estar asociada más a la forma de aplicación que a la decisión de adoptar la práctica, la elección del producto o su dosis. La mayor parte de los autores citados han empleado columnas de suelo no disturbado para el estudio de la dinámica del movimiento de las bases, producto de las enmiendas aplicadas, verificando dinámicas particulares en cada sistema de evaluación, de acuerdo con variables edáficas y a la naturaleza del producto aplicado.

La elección del producto, su dosis, forma de aplicación y periodicidad de la misma, son variables que dependen de las características propias de cada sistema "suelo-clima-tecnología productiva". En el ámbito de las regiones templadas, particularmente la Región Pampeana argentina, existe un desarrollo incipiente del conocimiento de este fenómeno, sus implicancias y consecuencias, por lo que el tratamiento de los suelos afectados es muy reducido y generalmente sobre bases poco científicas, en muchos casos prescritos por las empresas comercializadoras de estos insumos (Vázquez & Pagani, 2015).



Es trascendente diagnosticar las problemáticas relacionadas a la acidez antrópica en cada ambiente con características edafo-climáticas particulares y cultivos susceptibles a la problemática, a los fines de desarrollar técnicas de recuperación calibradas que se adapten a cada uno de los cultivos afectados y sistemas de labranzas utilizados.

## **1.2 HIPOTESIS**

### **1.2.1 Hipótesis 1**

La aplicación de enmiendas cálcico-magnésicas y yeso al suelo produce efectos opuestos sobre las propiedades hidrofísicas y estructurales superficiales debido a que incrementa el contenido de cationes intercambiables favoreciendo la agregación, pero estimula la mineralización de la materia orgánica. En los suelos de texturas más finas estos efectos se manifiestan con mayores dosis de enmiendas, por tener mayor capacidad reguladora.

### **1.2.2 Hipótesis 2**

El aporte de correctivos cálcicos al suelo aumentará el rendimiento de los cultivos leguminosos si se cumple un tiempo mínimo entre el encalado y la siembra, según la especie a implantar.

### **1.2.3 Hipótesis 3**

En suelos ácidos el agregado de enmiendas básicas disminuirá el impacto negativo del tránsito de maquinaria sobre el rendimiento de los cultivos, debido a mejorar las propiedades hidrofísicas y estructurales superficiales.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo general**

Evaluar la incidencia del agregado de correctivos cálcicos sobre el complejo de cambio y la agregación de suelos pampeanos acidificados por la agricultura y sobre el rendimiento cuando es afectado por el tránsito agrícola.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

#### *1.3.2.1 Objetivo específico 1*

Evaluar los efectos de diferentes dosis y tipos de enmiendas básicas en suelos de diferente textura sobre:

- a- el complejo de cambio
- b- componentes orgánicos estables y lábiles

- c- propiedades hidrofísicas relacionadas con la arquitectura edáfica y su estabilidad.

#### 1.3.2.2 *Objetivo específico 2*

Analizar la relación entre las modificaciones de las propiedades medidas y el rendimiento de cultivos leguminosos de interés regional.

#### 1.3.2.3 *Objetivo específico 3*

Evaluar los cambios superficiales en el comportamiento físico del suelo y en el rendimiento debidos al tránsito agrícola, luego de la aplicación de correctivos cálcicos.

## 1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 1.4.1 Sitios de estudio y selección de lotes

El estudio se realizó en tres sitios con diferentes tipos de suelos en la provincia de Buenos Aires. Los suelos seleccionados fueron un Hapludol tpto-árgico, un Argiudol típico y un Paleudol típico. La historia de los lotes se detalla en el apartado 1.4.3

Se realizó una caracterización textural y química de cada suelo hasta los 10 cm de profundidad. Las determinaciones realizadas fueron:

- textura: método de la pipeta de Robinson (Gee & Bauder, 1986)
- pH actual: se evaluó por vía potenciométrica, con una relación 1:2,5 de suelo: agua, El pH del suelo, es una medida elemental para caracterizarlo y refleja, en forma aproximada, la actividad de los iones hidrógenos (H<sup>+</sup>) de la solución del suelo (factor intensidad), los que tienen un efecto marcado sobre la fertilidad del mismo (disponibilidad de nutrimentos vegetales). (SAMLA, 2004).
- materia orgánica (MO): a partir de la determinación del carbono orgánico fácilmente oxidable por Walkley y Black (1934) micrométodo propuesto por Richter (1981) (SAMLA 2004), aplicando el factor de conversión 1,724 (Van Bemmelen, 1890) que asume un 58% de C dentro de la MO (Rosell et al., 2001).
- capacidad de intercambio catiónico bufferada (CIC): Se evaluó por el método del acetato de amonio 1 N pH 7. La evaluación de la CIC se efectuó por micro destilación (Richter, M. 1980)
- cationes intercambiables: método de extracción con cloruro de amonio 1M Determinación de calcio (Ca<sup>+2</sup>) y magnesio (Mg<sup>+2</sup>) por quelatometría con EDTA, (SAMLA, 2004) y sodio (Na<sup>+</sup>) y potasio (K<sup>+</sup>) por fotometría de llama (Black, 1965 en SAMLA, 2004).



#### 1.4.1.2 *Argiudol*

El suelo de tipo Argiudol típico, familia arcillosa fina illítica térmica estudiado se encuentra en la Estación Experimental Julio Hirschhorn (FCAYF, UNLP), partido de La Plata, y pertenece a la serie Bombeador (Lanfranco, 1988). La serie Bombeador se halla ubicada en una lomada con pendientes inferiores al 1%.

La caracterización química y textural del Argiudol Típico al inicio del ensayo se presenta en Tabla 1.3 y las precipitaciones registradas durante el ensayo se muestran en la Tabla 1.4.

**Tabla 1.3** Caracterización del Argiudol típico (0-10cm de profundidad). Textura, pH, capacidad de intercambio catiónica (CIC) y cationes (calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), sodio ( $\text{Na}^{+}$ ) y potasio ( $\text{K}^{+}$ )).

Textura 0-10cm	Franco limoso (A 4,8%; L 68,3%; a 26,9%)
pH	5,6
MO ( $\text{g kg suelo}^{-1}$ )	39,4
CIC ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	20,2
$\text{Ca}^{+2}$ ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	10,2
$\text{Mg}^{+2}$ ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	2,3
$\text{Na}^{+}$ ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	1
$\text{K}^{+}$ ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	1,2

**Tabla 1.4** Precipitaciones mensuales registradas en la Estación Experimental Julio Hirschhorn, partido de La Plata, Argiudol típico, 2015-2017 (Pardi, 2017).

Precipitaciones (mm)	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
2015	162	72	35	45	28	41	61	157	48	68	130	39	885
2016	67	72	105	161	68	33	175	40	51	102	68	133	1074
2017	111	101	57	79	132	3	104	101	105	95	24	104	1015

#### 1.4.1.3 *Paleudol*

El Paleudol típico, familia fina illítica térmica se encuentra en el Establecimiento Don Joaquín (UNLP), partido de Magdalena, y pertenece a la serie Etcheverry (GeoINTA, 2019). La serie Etcheverry se encuentra representada por un suelo muy oscuro y profundo, de aptitud agrícola-ganadera, que se encuentra en una planicie extensa en la que se definen varios cursos y arroyos tributarios del río Samborombón, en posición de loma, en la "Subregión Pampa Ondulada baja", algo pobremente drenado, se ha formado a partir de sedimentos loésicos franco limosos, no alcalino, con pendientes de 0,5-1 %.

La caracterización química y textural del Paleudol Típico al inicio del ensayo se presenta en Tabla 1.5 y las precipitaciones registradas durante el ensayo se muestran en la Tabla 1.6.

**Tabla 1.5** Caracterización del Paleudol típico, 0-10cm de profundidad. Textura, pH, capacidad de intercambio catiónica (CIC) y cationes (calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), sodio ( $\text{Na}^{+}$ ) y potasio ( $\text{K}^{+}$ ))

Textura 0-10cm	Franco-limoso (A 15 %; L 60 %; a 25%)
pH	5,65
MO ( $\text{g kg suelo}^{-1}$ )	54,5
CIC ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	24,7
$\text{Ca}^{+2}$ ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	12,1
$\text{Mg}^{+2}$ ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	3,4
$\text{Na}^{+}$ ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	2,4
$\text{K}^{+}$ ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	1,1

**Tabla 1.6** Precipitaciones registradas en el establecimiento Don Joaquín, partido de Magdalena, Paleudol típico, 2015-2017.

Precipitaciones (mm)	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
2015	122	10	16	36	104	68	52	20	0	35	72	25	560
2016	94	151	54	164	75	20	172	27	53	84	94	121	1109
2017	94	94	49	65	109	0	124	216	146	102	12	90	1101

#### 1.4.2 Diseño experimental

El diseño experimental en los tres sitios de ensayo fue diseño de parcelas divididas con estructura de parcelas en bloques al azar con 3 repeticiones. Las parcelas experimentales fueron de 5 x 10 m, separadas por calles de 2 m.

En los tres suelos bajo estudio el  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  se encontraban en niveles medios, con excepción del Hapludol donde el nivel de  $\text{Mg}^{+2}$  fue bajo. La relación  $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$  en el Hapludol fue alta debido a dicha deficiencia de  $\text{Mg}^{+2}$ , mientras que en el Argiudol y el Paleudol se encontraba dentro del rango óptimo (INTA, 1989). La enmienda seleccionada fue dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), que además de incrementar el pH adicionó  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  al suelo, incrementando el nivel de  $\text{Mg}^{+2}$  en el Hapludol y manteniendo la relación  $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$  en el Argiudol y Paleudol.

En el Hapludol los tratamientos estuvieron constituidos por distintas dosis equivalentes (la masa que se adicionó estuvo en función de la superficie de la parcela para alcanzar las

dosis por ha) a 0, 1000, 2000 y 3000 kg ha<sup>-1</sup> de enmienda carbonatada (dolomita) (T, D1, D2, D3), con 0 (SY: sin yeso; TSY, D1SY, D2SY D3SY) y 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CaSO<sub>4</sub>2H<sub>2</sub>O) (CY: con yeso; TCY, D1CY, D2CY, D3CY) (Figura 1.3). El cultivo leguminoso evaluado en este suelo fue alfalfa. Para cumplir con el objetivo específico 3 el arreglo factorial incluyó el factor “intensidad de tránsito” (sin tránsito (ST) y con 5 pasadas de tractor (CT)) y el diseño experimental fue diseño de subparcelas divididas en bloques al azar con 3 repeticiones. Las pasadas ocupaban dos huellas (una por cada rueda del tractor) en cada parcela como se observa en la figura 1.3. Se utilizaron tractores o máquinas agrícolas que alcancen al menos los límites de 4 Mg eje<sup>-1</sup> capaz de producir compactación en un suelo húmedo a una profundidad de al menos 30 cm en un solo pasaje tal como indican Hakansson y Reeder (1994). Según los autores la incidencia de la compactación en la parte superior del suelo se debe tanto a la presión de contacto con el suelo y a la carga por eje.

BLOQUE I		BLOQUE II		BLOQUE III	
CON YESO	SIN YESO	CON YESO	SIN YESO	CON YESO	SIN YESO
T	T	D1000	D1000	D3000	D3000
D2000	D2000	D3000	D3000	D2000	D2000
D3000	D3000	T	T	D1000	D1000
D1000	D1000	D2000	D2000	T	T

**Figura 1.3** Plano de ensayo Hapludol fhapto-árgico.

----- Huellas 5 pasadas de tractor

En el Argiudol y en el Paleudol los tratamientos estuvieron constituidos por las mismas dosis que en el Hapludol y se adicionó un tratamiento con dosis equivalente a 4000 kg ha<sup>-1</sup> (D4) de enmienda carbonatada (dolomita), con 0 (D4SY) y 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (D4CY) (Figura 1.4). El cultivo leguminoso evaluado en estos ensayos fue soja (*Glycine max* L Merr.).

BLOQUE I		BLOQUE II		BLOQUE III	
CON YESO	SIN YESO	CON YESO	SIN YESO	CON YESO	SIN YESO
T	T	D4000	D4000	D3000	D3000
D2000	D2000	D1000	D1000	D2000	D2000
D3000	D3000	D3000	D3000	D4000	D4000
D4000	D4000	T	T	D1000	D1000
D1000	D1000	D2000	D2000	T	T

**Figura 1.2** Plano de ensayo Argiudol típico y Paleudol típico.

En los 3 ensayos la dolomita poseía una composición de 58/60% de CaCO<sub>3</sub> y 38/40% de MgCO<sub>3</sub> con una granulometría <35 µm. El yeso tenía granulometría de 10,3 % > 1000 µm,

33,5% 1000 $\mu$ m-500 $\mu$ m; 35,5 % 500 $\mu$ m -210  $\mu$ m; 14,2 % 210  $\mu$ m-105  $\mu$ m, 3,7% 105  $\mu$ m-53  $\mu$ m y 2,8 % <53  $\mu$ m.

### **1.4.3 Historia de los lotes, fecha y técnica de encalado. Siembra de los sitios experimentales**

#### *1.4.3.1 Hapludol*

En el Hapludol desde el año 2008 al 2011 el suelo se encontraba cultivado con pastura perenne de alfalfa, cebadilla (*Bromus unioloides* K.) y festuca (*Festuca arundinacea* L.). En la campaña 2011/12 se cultivó soja de forma convencional, en 2012/13 se realizó trigo/soja 2<sup>da</sup> bajo siembra directa y en los años 2013/14 se sembró maíz para silo bajo siembra directa. Las enmiendas se aplicaron el 7 de mayo de 2014 al voleo y posteriormente se realizaron dos pasadas de disco, una de rastra y rolo. En mayo de 2014 se sembró alfalfa variedad WL 1058, de forma convencional, con una densidad de 18 kg ha<sup>-1</sup> y distancia entre hileras de 21 cm. Se fertilizó a la siembra con 100 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato monoamónico. En junio de 2014 se realizaron los pasajes de maquinaria para inducir el proceso de compactación.

#### *1.4.3.2 Argiudol*

El Argiudol fue utilizado, previamente al ensayo, con fines experimentales alternando su uso con cultivos de trigo y maíz de forma poco intensiva. Las enmiendas se aplicaron el 7 de septiembre de 2015 al voleo con pasadas de disco y rastra a los 10 días posteriores. Se realizó control químico de malezas con glifosato 2-4D y 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. No se fertilizó con P (en el suelo se encontró un nivel inicial de 13,5 ppm considerándose suficiente para los fines del ensayo) y durante el cultivo no se realizaron labores de control mecánicas ni químicas.

#### *1.4.3.3 Paleudol*

En el Paleudol el suelo no fue roturado durante los 6 años previos al ensayo. Las enmiendas se aplicaron al voleo el 7 de octubre de 2015 y en los dos meses siguientes se realizaron dos pasadas de disco y dos de rolo. 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 y se realizó una fertilización fosforada con 50 kg ha<sup>-1</sup> de súper fosfato triple. En diciembre de 2015 se aplicó herbicida, y en enero y febrero de 2016 se realizaron aplicaciones para control de chinche.

### **1.4.4 Análisis estadístico de los datos**

Todos los resultados de las variables medidas fueron evaluados estadísticamente conforme a los diseños utilizados (ANOVA) y cuando se encontraron diferencias significativas las medias se compararon a través de comparaciones múltiples (Tukey,  $p < 0,05$ ) (Statistica, 2005).

Previo al análisis de los datos, se realizaron las pruebas de homogeneidad de las varianzas y normalidad. En los casos donde no se cumplieron estos supuestos se realizaron las transformaciones correspondientes. Si la heterogeneidad, a partir de las transformaciones, no pudo ser corregida se realizó un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis (Statistica, 2005).

#### **1.4.5 Organización de la información obtenida para la presentación de los resultados**

Los resultados de los efectos sobre el suelo y el rendimiento que produce el encalado según dosis y combinación de enmienda se presentarán en los siguientes 3 capítulos.

En el capítulo 2 se cumplirá con el *objetivo 1*, evaluándose los efectos del encalado, según dosis, combinación de enmienda y tiempo, sobre propiedades químicas, orgánicas y físicas del suelo. Posteriormente, se realizará un análisis comparativo entre dichos efectos según las condiciones texturales de los sitios de ensayo.

En el capítulo 3 se cumplirá con el *objetivo 2*, evaluándose los efectos según dosis y combinación de enmienda sobre el rendimiento (alfalfa y soja) y componentes (soja) de especies leguminosas.

En el capítulo 4 se cumplirá con el *objetivo 3*, evaluándose el efecto del tránsito agrícola sobre las propiedades físicas en un suelo encalado con diferentes dosis y combinaciones de enmiendas y sobre el rendimiento

En el capítulo 5 se presentan las *reflexiones finales, utilidad de la información generada y posibles líneas de investigación*.



**2 CAPÍTULO Evaluación de los efectos de enmiendas básicas sobre el complejo de cambio, componentes orgánicos y propiedades hidrofísicas del suelo en diferentes condiciones texturales.**

## 2.1 INTRODUCCIÓN ESPECÍFICA

### 2.1.1 Causas y consecuencias de la acidez en suelos de la Región Pampeana

En la región central argentina se encuentra ubicada la denominada región pampeana, la cual abarca las provincias de Buenos Aires, y parte de La Pampa, Santa Fe, Córdoba y Entre Ríos. Dicha región es una zona de clima templado húmedo a sub-húmedo y los suelos pertenecen mayormente al orden Molisol (Panigatti, 2010). En general estos suelos tienen buenas condiciones para la agricultura, con un horizonte superficial con 2 a 3,5% de materia orgánica y son más desarrollados y con texturas más finas al este (Gelati & Vázquez, 2007). Estos suelos en su estado original, tenían elevada fertilidad dado que derivan de un material de tipo sedimentario conocido como loess pampeano (Zárate, 2003).

En los últimos años la Región Pampeana, ha manifestado acidificación de suelos sujetos a producción agropecuaria prolongada. Si bien existen causas naturales de este proceso, por tratarse de una región templada húmeda/subhúmeda, la misma padece el fenómeno, especialmente por su historia antigua y reciente de producción, la que habría provocado la acidificación en mayor o en menor medida de algunos suelos, al punto de comprometer la posibilidad de desarrollar ciertas especies, particularmente leguminosas (García & Vázquez, 2012).

De acuerdo a estudios realizados en la región, el origen de la acidez en los suelos con aptitud agrícola, se debería principalmente a la extracción de nutrientes básicos de la capa arable por los cultivos realizados (Gelati & Vázquez, 2007). En esta región se incrementaron los rendimientos por unidad de superficie y el área bajo agricultura se expandió, principalmente debido al avance del cultivo de soja, el cual se caracteriza por tener altos requerimientos de nutrientes básicos. En el país el área sembrada con soja alcanza un total de 17 259 260 ha y su mayoría se localiza en la región pampeana (MINAGRI, 2019). En adición a esto, en Argentina la práctica de fertilización con nitrógeno (N) y fósforo (P) ha sido ampliamente adoptada, pero, la reposición de otros nutrientes como calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ) y potasio ( $\text{K}^{+}$ ) es nula o escasa (Sainz Rozas et al., 2013).

Otro de las principales causas de acidificación es el amplio uso de fertilizantes nitrogenados en los sistemas agrícolas alrededor del mundo, particularmente en los suelos bajo siembra directa (Mora et al. 2004). El consumo de los fertilizantes nitrogenados en Argentina durante la campaña 2017/2018 fue de 2 033 182 Mg (Fertilizar, 2018). La urea, fertilizante nitrogenado de mayor uso en Argentina, por cada mol de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) proveniente de cada N amídico libera dos moles de protones ( $\text{H}^+$ ) en el proceso de nitrificación (Chien et al., 2008). Si bien la Urea es el fertilizante nitrogenado más empleado, es conocido

el mayor poder acidificante de otros fertilizantes nitrogenados como el sulfato de amonio (Chien et al., 2001).

La acidificación es un fenómeno que se cataliza progresivamente, pues la reducción de pH trae como consecuencia disminución en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) por reducción de cargas variables negativas de los coloides y en consecuencia menores posibilidades de retener las bases reducidas existentes sinergizando el proceso (Millán et al., 2010).

Desde el punto de vista nutricional los suelos con problemas de acidez además de presentar disminución en los contenidos de  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{K}^{+}$ , presentan disminución en la disponibilidad de nutrientes para las plantas como P y N y micronutrientes como el Mo.

Otro efecto adverso de la acidificación es que disminuye la capacidad de retención de agua y nutrientes en los suelos y reduce la actividad biótica (Kinraide, 2003).

Sobre las propiedades físicas las consecuencias se producen debido, principalmente, a la falta de Ca, catión que actúa sobre las partículas de arcilla y humus, produciendo la coagulación de ambos coloides. Según Osorno (2012) la presencia de calcio en la caliza fosfatada puede tener una influencia importante en la formación de los agregados del suelo y en los procesos de descomposición y mineralización de la materia orgánica.

### **2.1.2 Necesidad de corrección de la acidez y efectos en el suelo**

Los materiales utilizados como alcalinizantes o correctivos de acidez son principalmente carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio y/o magnesio. El carbonato doble de calcio y magnesio ( $\text{CaCO}_3 \text{MgCO}_3$ ) se denomina dolomita (Barber, 1984).

El encalado al estimular la producción vegetal, aumenta la exportación de nutrientes y los residuos de cosecha se descomponen con mayor velocidad en suelos con mayores concentraciones de calcio que en suelos con menores concentraciones (McCay et al., 2013). Las adiciones moderadas de  $\text{Ca}^{+2}$  pueden beneficiar los procesos microbianos en el suelo (Lawrence et al., 2016). Otros autores mencionan que, en esta condición, el mayor retorno de biomasa vegetal al suelo incrementa las fracciones orgánicas que benefician la estructura (Manna, 2006).

Los residuos de cultivos tienen una acción agregante e inciden en el aumento de la estabilidad estructural de los suelos debido a la liberación de carbohidratos solubles (CHS), derivados principalmente de plantas y microorganismos edáficos (Cheshire, 1979; Gregorich et al., 1994), al carbono orgánico particulado (COP) (Gale et al., 2000), y a la actividad fúngica (Wright et al., 1999; Bossuyt et al., 2001) u otros microorganismos. Los CHS representan la principal fuente de energía y nutrientes para la microflora del suelo, e intervienen en la

agregación del mismo (Tisdall & Oades, 1982) y son utilizados como indicador temprano y sensible de cambios del COS ya que tales cambios no son detectados por fracciones menos lábiles o recalitrantes (Gregorich et al., 1994; Jolivet et al., 2006). Prácticas de manejo que incrementen el rendimiento y la actividad biológica, como el encalado, modificarán los contenidos del COP, los CHS y las glomalinas (GT), producto de las micorrizas arbusculares.

Además de los efectos que el encalado produce sobre la materia orgánica con consecuencias sobre la estructura, en fases iniciales posteriores a su aplicación, por el contrario, la enmienda puede dar lugar a la dispersión de las arcillas, pero la agregación progresa cuando la tasa de solubilización se incrementa, debido a la liberación de  $\text{Ca}^{+2}$  (Chaplain et al., 2011). Los cationes  $\text{Ca}^{+2}$  modifican positivamente la estructura del suelo al provocar la coagulación de los coloides, disminuyen la dispersión del complejo adsorbente y facilitan la formación de agregados estables (Benito et al., 1991). Por lo tanto, los efectos positivos y negativos pueden ocurrir en un mismo suelo en escalas de tiempo distintas, como resultantes de cambios en la materia orgánica, por un lado, y el poder estructurante de los cationes divalentes agregados, por el otro (Chan & Heenan, 1998).

Paralelamente, así como el encalado actúa sobre los procesos de dispersión/floculación es de esperar que influyan en la resistencia mecánica y la estabilidad estructural del suelo (Chaplain et al., 2011). Variaciones en la estructura afectan la aireación, la velocidad de infiltración y a la permeabilidad (Villar & Ferrer, 2005)

Los mismos factores que afectan la estabilidad estructural también inciden en la susceptibilidad a la compactación, entre ellos la textura, el contenido de materia orgánica, y eventualmente, el contenido y tipo de bases intercambiables (Chaplain et al., 2011). Los efectos del encalado sobre estos factores pueden ser puestos de manifiesto cuantificando la resistencia a la compactación. Una forma de evaluar esa resistencia es a través de la relación entre la evolución de la densidad máxima y el contenido de humedad crítico a la que esta se produce a igual presión ejercida, información brindada por el ensayo Proctor (ASTM, 1992).

Debido a que anticiparse a los efectos del encalado en el suelo resulta complejo por ser el resultado de la interacción de cambios químicos, biológicos y físicos no esclarecidos aún, es necesario conocer dichos efectos en diferentes condiciones edafo-climáticas para calibrar dosis y tipo de enmienda.

## **2.2 HIPÓTESIS Y OBJETIVO ESPECIFICO 1**

### **2.2.1 Hipótesis**

La aplicación de enmiendas cálcico-magnésicas y yeso al suelo produce efectos opuestos sobre las propiedades hidrofísicas y estructurales superficiales debido a que incrementa el contenido de cationes intercambiables favoreciendo la agregación, pero

estimula la mineralización de la materia orgánica. En los suelos de texturas más finas estos efectos se manifiestan con mayores dosis de enmiendas, por tener mayor capacidad reguladora.

### 2.2.2 Objetivo

Evaluar los efectos de diferentes dosis y tipos de enmiendas básicas en suelos de diferente textura sobre:

- d- el complejo de cambio
- e- componentes orgánicos estables y lábiles
- f- propiedades hidrofísicas relacionadas con la arquitectura edáfica y su estabilidad.

## 2.3 COMPLEJO DE CAMBIO Y CATIONES

### 2.3.1 Materiales y métodos

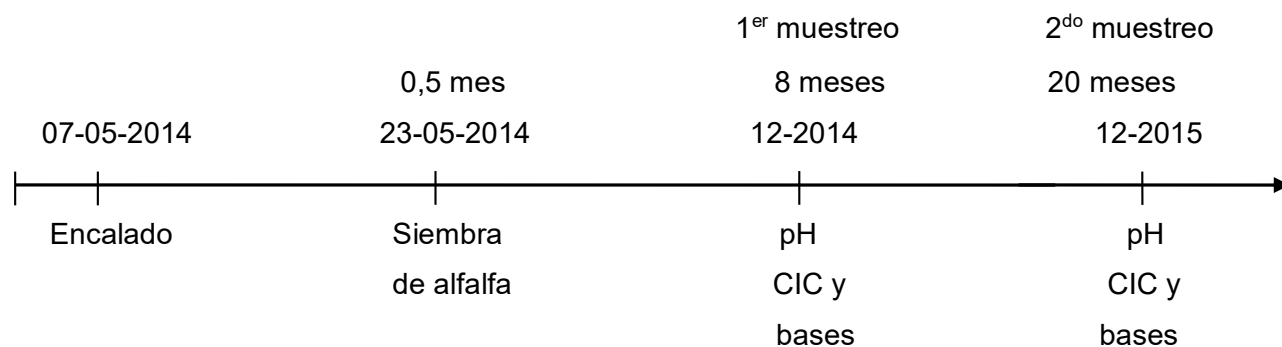
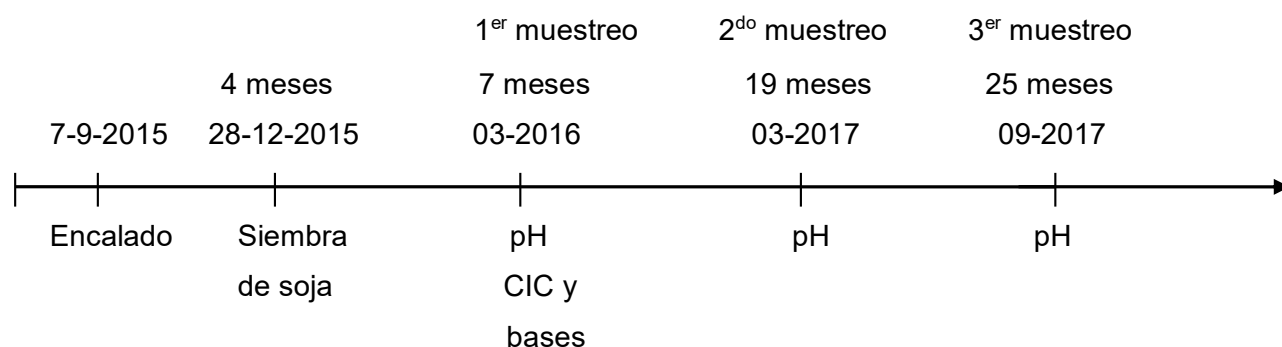
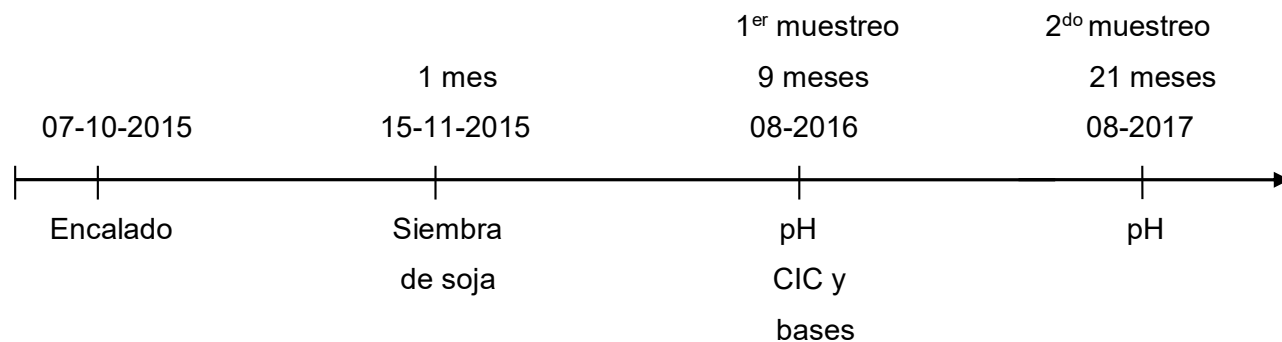
#### 2.3.1.1 Determinaciones

- pH actual: se evaluó por vía potenciométrica, con una relación 1:2,5 de suelo: agua, El pH del suelo, es una medida elemental para caracterizarlo y refleja, en forma aproximada, la actividad de los iones hidrógenos ( $H^+$ ) de la solución del suelo (factor intensidad), los que tienen un efecto marcado sobre la fertilidad del mismo (disponibilidad de nutrimentos vegetales).
- capacidad de intercambio catiónico bufferada (CIC): Se evaluó por el método del acetato de amonio 1 N pH 7. La evaluación de la CIC se efectúa por micro destilación (Richter, M. 1980).
- cationes intercambiables: método de extracción con cloruro de amonio 1M Determinación de calcio ( $Ca^{+2}$ ) y magnesio ( $Mg^{+2}$ ) por quelatometría con EDTA, y sodio ( $Na^+$ ) y potasio ( $K^+$ ) por fotometría de llama (Black, 1965).

Todas las metodologías se encuentran citadas en SAMLA (2004).

#### 2.3.1.2 Muestreo del suelo

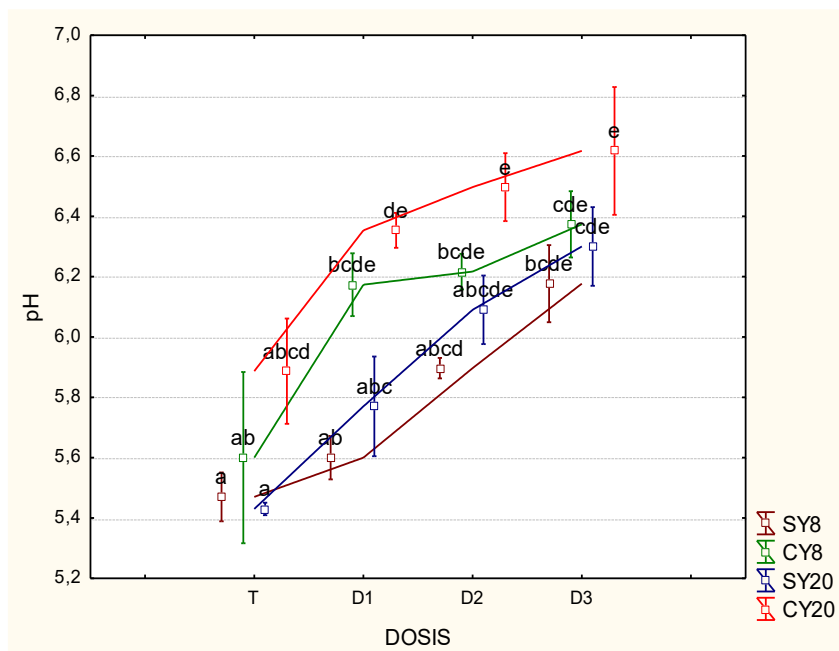
En cada sitio de ensayo y en distintos momentos posteriores al encalado, se recolectaron 15 submuestras por parcela de cada tratamiento de 0-10 cm de profundidad. Entre la toma de la primera y la segunda muestra transcurrió un año en los tres suelos estudiados.

*Hapludol**Argjudol**Paleudol***2.3.2 Resultados****2.3.2.1 Hapludol**

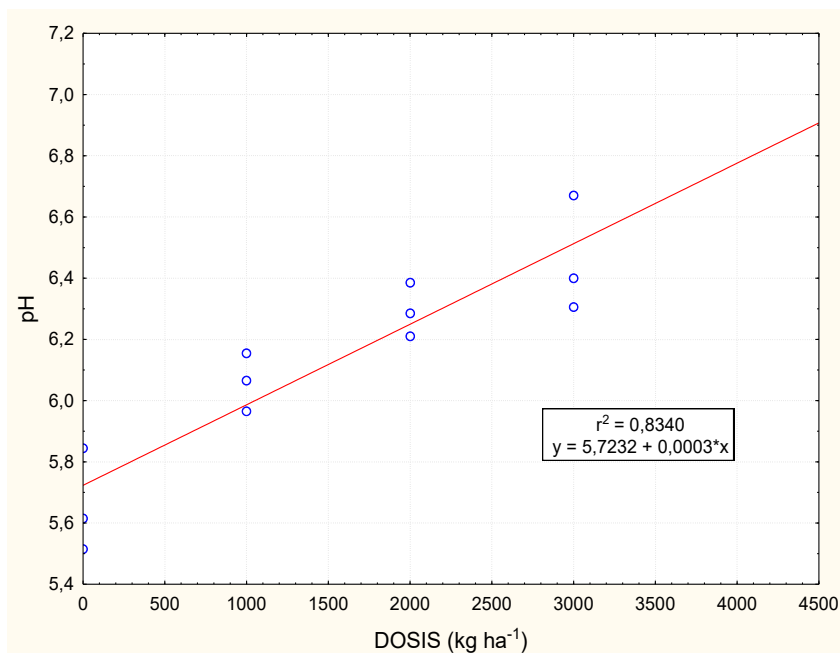
Las variables pH,  $Mg^{+2}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$  y la relación  $(Ca^{+2}+Mg^{+2})/CIC$  presentaron heterogeneidad de varianzas para la interacción dosis-yeso-tiempo, la cual no pudo ser corregida a partir de transformaciones, por lo tanto, se procedió a realizar un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis para dichas variables.

El pH a partir del análisis no paramétrico presentó diferencia significativa para la interacción dosis-yeso-meses ( $p < 0,05$ ). A los 8 y 20 meses los tratamientos D1CY, D2CY, D3CY y D3SY presentaron mayor pH que el TSY para cada tiempo. El incremento de pH en el tratamiento D3 fue independiente de la adición de yeso y del tiempo, el pH en el tratamiento

D2 CY a los 20 meses fue mayor que D2 SY a los 8 meses y el tratamiento D1 presentó mayor pH en los tratamientos D1 CY a los 20 meses que D1 SY a los 8 y 20 meses. Por lo tanto, en las menores dosis de enmienda el tiempo transcurrido y la adición de yeso son factores condicionantes del incremento de pH (Figura 2.3.1.a). La regresión dosis-pH fue significativa y positiva a los 20 meses posteriores al encalado ( $p < 0,01$ ) (Figura 2.3.1.b).

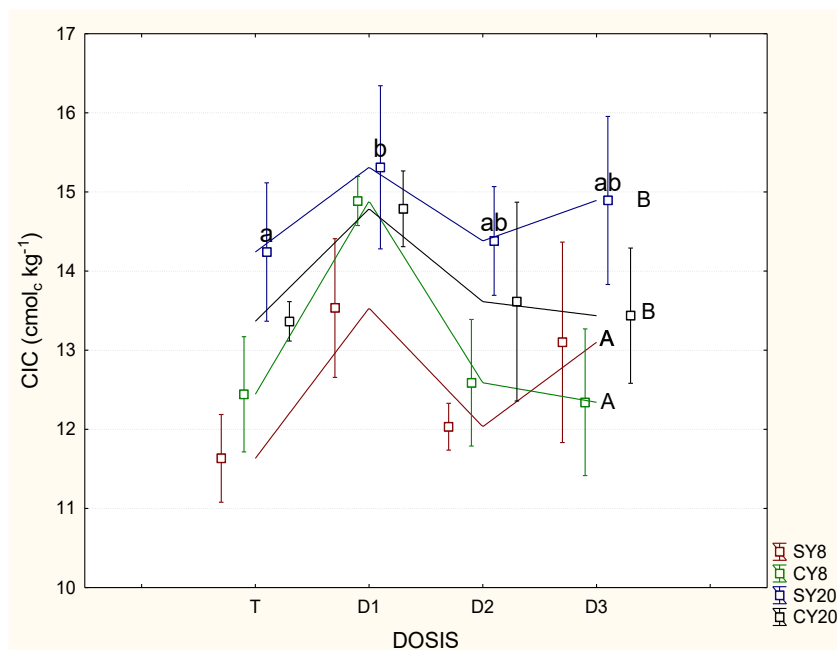


**Figura 2.3.1.a** pH actual (1:2,5 suelo/H<sub>2</sub>O) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup> y D3= 3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg.ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) y sin adición (SY) a los 8 y 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso-meses. Las barras representan el error estándar.



**Figura 2.3.1.b** pH actual (1:2,5 suelo/H<sub>2</sub>O) en función de la dosis aplicada: 0 kg ha<sup>-1</sup>, 1000 kg ha<sup>-1</sup>, 2000 kg ha<sup>-1</sup> y 3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita a los 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol.

La CIC presentó incremento significativo en D1 respecto a T (Figura 2.3.2.). En todos los tratamientos a los 20 meses presentó incremento respecto a los 8 meses posteriores al encalado ( $p < 0,05$ ).



**Figura 2.3.2** Capacidad de intercambio catiónico (CIC,  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) en el Hapludol según tratamiento aplicado: T=0  $\text{kg ha}^{-1}$ , D1=1000  $\text{kg ha}^{-1}$ , D2=2000  $\text{kg ha}^{-1}$  y D3=3000  $\text{kg ha}^{-1}$  de dolomita con adición de 200  $\text{kg ha}^{-1}$  de yeso (CY) y sin adición (SY) a los 8 y 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas para el factor dosis y letras mayúsculas diferentes indican diferencia significativa para el factor tiempo. Las barras representan el error estándar.

El contenido de  $\text{Ca}^{+2}$  con la adición de enmiendas presentó interacción entre los factores dosis, yeso y tiempo ( $p < 0,05$ ). El tratamiento con mayor contenido de  $\text{Ca}^{+2}$  fue D3CY evaluado a los 20 meses posteriores del encalado, diferenciándose de TSY evaluado a los 8 meses posteriores al encalado en un incremento de 40,6% pero no se diferenció del TSY en el mismo tiempo (Figura 2.3.3.a).

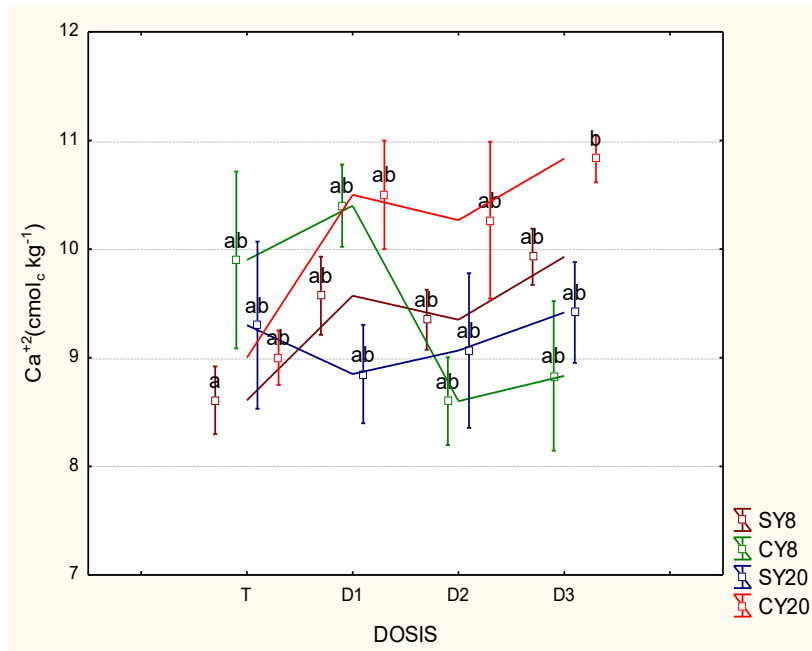
El contenido de  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}) / \text{CIC}$  a partir del análisis no paramétrico presentó diferencia significativa para la interacción dosis-yeso-tiempo ( $p < 0,05$ ).

El  $\text{Mg}^{+2}$  presentó mayor contenido en el tratamiento D3CY respecto a TSY y TCY a los 8 meses, mientras que a los 20 meses no se observó diferencias entre tratamientos (Figura 2.3.3.b). Respecto al  $\text{Na}^+$  la adición de dolomita y yeso no generó diferencias dentro de cada tiempo de muestreo respecto a TSY (Figura 2.3.3.c). Por lo tanto, en ambas variables, las diferencias observadas entre tiempos se encuentran asociadas a efectos estacionales y de manejo, y no a las enmiendas.

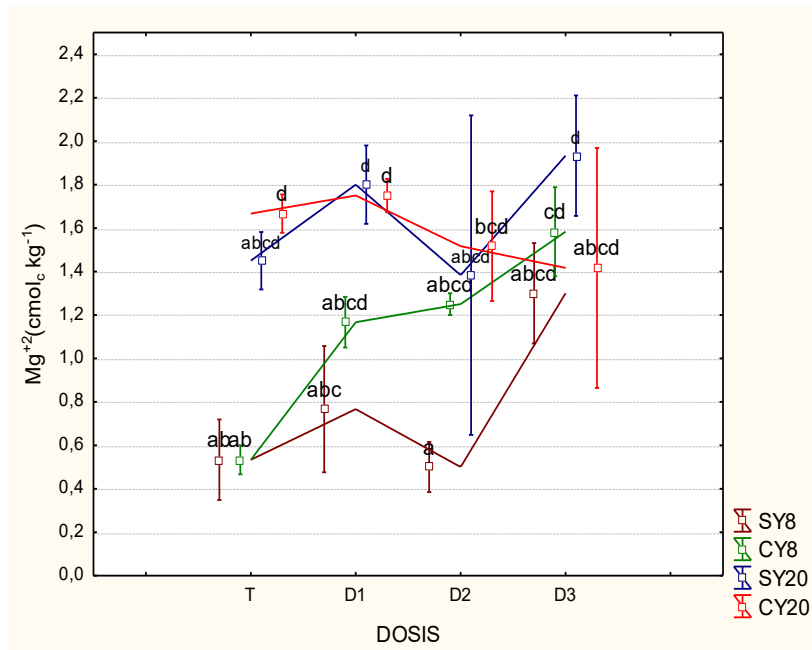
El contenido de  $\text{K}^+$  a los 8 meses fue menor en los tratamientos CY respecto a los SY, mientras que a los 20 meses no se observó diferencias para este factor. Dentro del factor yeso y tiempo analizado la dosis de dolomita no presentó diferencias (Figura 2.3.3 d).



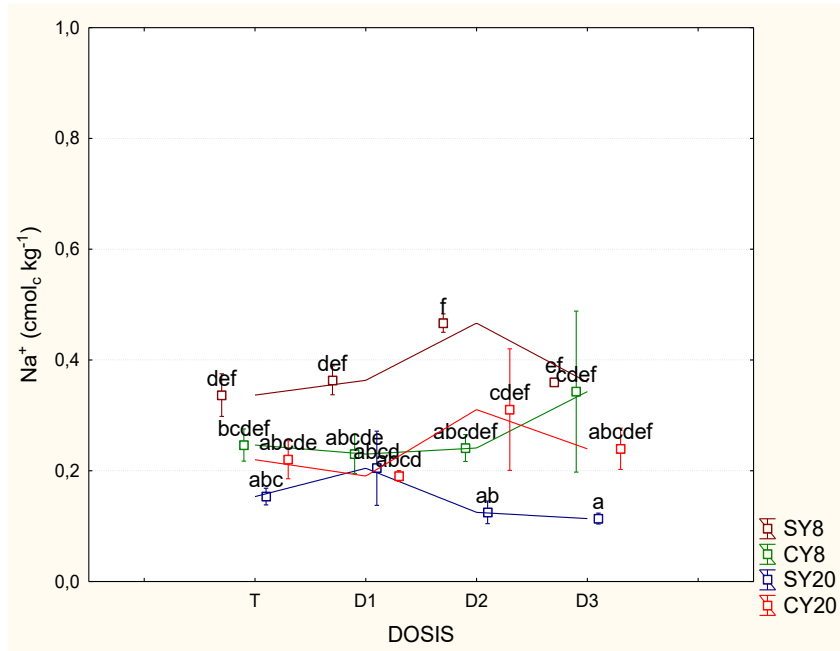
En la relación  $(Ca^{+2}+Mg^{+2})/CIC$  a los 8 meses los tratamientos TCY y D3CY presentaron mayor relación que TSY, mientras que a los 20 meses este incremento se observó para D2CY y D3CY (Figura 2.3.3.e).



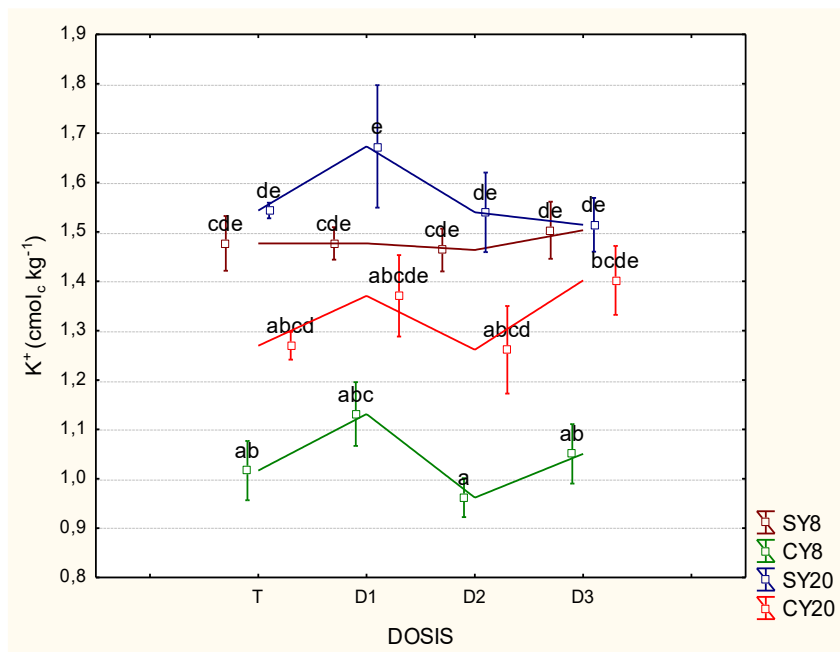
a



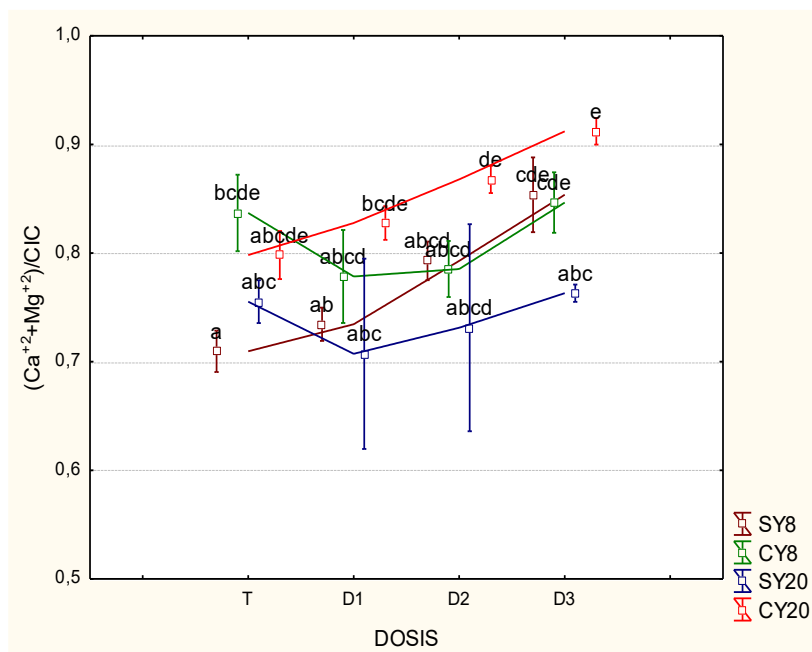
b



c



d



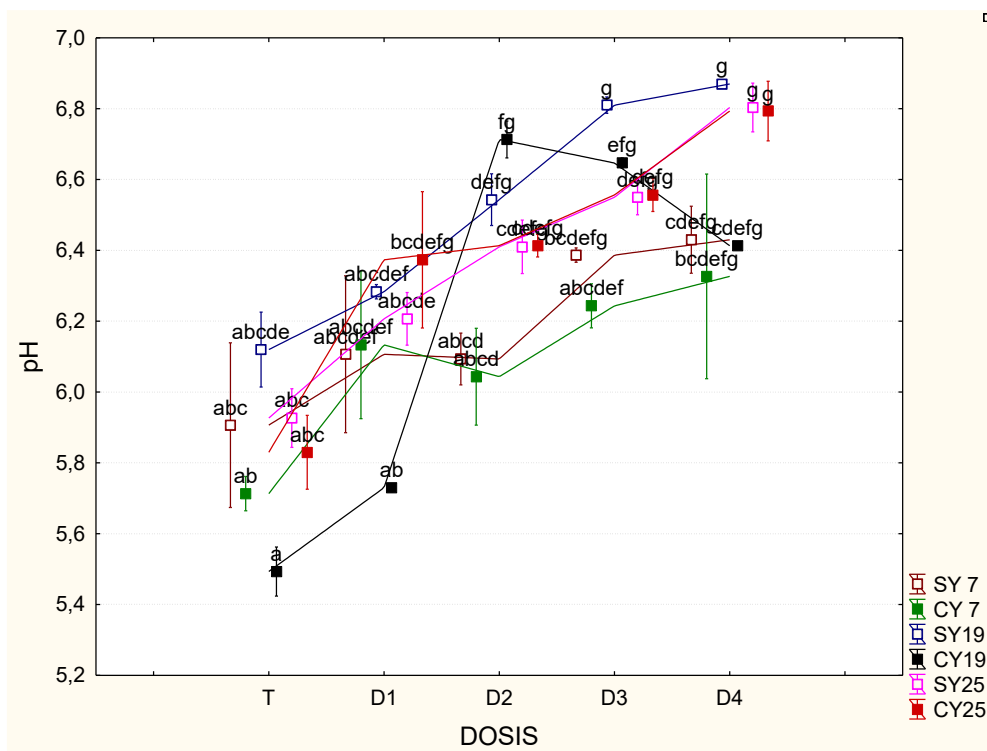
e

**Figura 2.3.3.** a-Contenido de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) b-magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ), c- sodio ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) d- potasio ( $\text{K}^+$ ,  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) y e- relación  $(\text{Ca}^{+2}+\text{Mg}^{+2})/\text{CIC}$  según tratamiento aplicado: T=0  $\text{kg ha}^{-1}$ , D1= 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ , D2=2000  $\text{kg ha}^{-1}$  y D3=3000  $\text{kg ha}^{-1}$  de dolomita con adición de 200  $\text{kg ha}^{-1}$  de yeso (CY) y sin adición(SY), para 8 meses y 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso-tiempo. Las barras representan el error estándar.

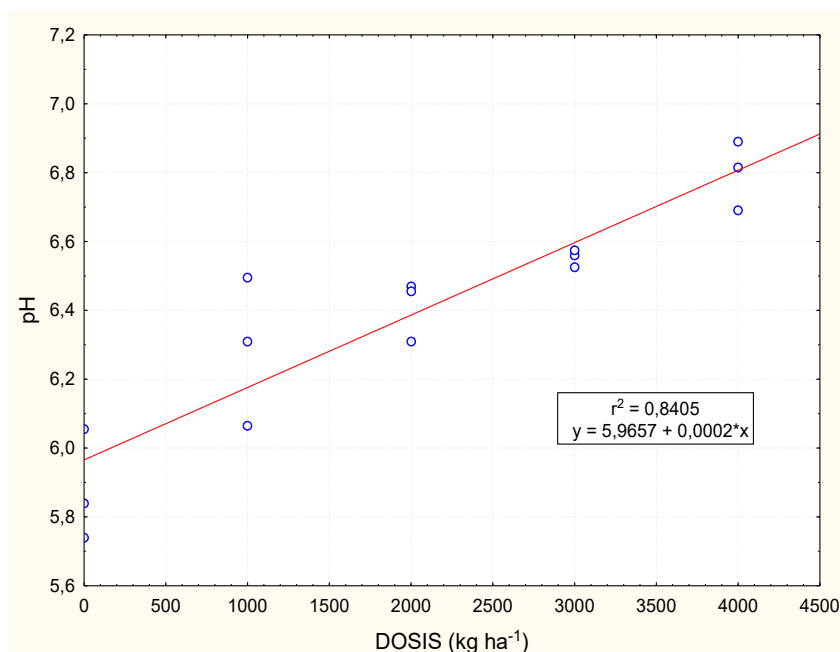
### 2.3.2.2 Argiudol

El pH presentó heterogeneidad de varianzas para la interacción dosis-yeso-tiempo, la CIC, el contenido de  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Na}^+$  y la relación  $(\text{Ca}^{+2}+\text{Mg}^{+2}) / \text{CIC}$  presentaron heterogeneidad de varianzas para la interacción dosis-yeso. La heterogeneidad de varianzas en ningún caso pudo ser corregida a partir de transformaciones, por lo tanto, se procedió a realizar un análisis no paramétrico Kruskal-Wallis.

El pH a partir del análisis no paramétrico presentó diferencia significativa para la interacción dosis-yeso-meses ( $p < 0,05$ ). A los 7 meses ningún tratamiento presentó diferencia significativa respecto al TSY, a los 19 meses los tratamientos D2CY, D3SY, D4SY y a los 25 meses D3 y D4 CY y SY presentaron mayor pH que el TSY. El tratamiento D2 CY a los 19 meses fue mayor que SY y CY a los 7 meses, D3 SY a los 19 meses fue mayor que CY a los 7, mientras que el incrementó en D4 fue independiente de la adición de yeso y momento de muestreo. Por lo tanto, los incrementos de pH en las dosis intermedias se encuentran relacionados al momento de muestreo, observándose los mayores valores de pH a los 19 meses (Figura 2.3.4.a). La regresión dosis-pH fue significativa y positiva a los 25 meses posteriores al encalado ( $p < 0,01$ ) (Figura 2.3.4.b)



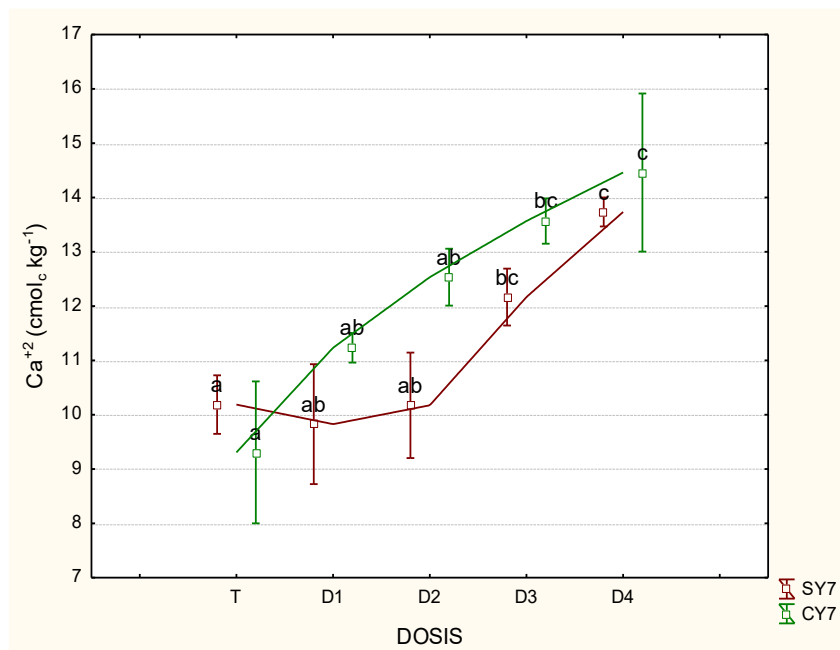
**Figura 2.3.4.a** pH actual (1:2,5 suelo/H<sub>2</sub>O) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup>, D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) y sin adición (SY), para 7, 19 y 25 meses posteriores al encalado en el Argiudol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso-tiempo. Las barras representan el error estándar.



**Figura 2.3.4.b** pH actual (1:2,5 suelo/H<sub>2</sub>O) en función de la dosis aplicada 0 kg ha<sup>-1</sup>, 1000 kg ha<sup>-1</sup>, 2000 kg ha<sup>-1</sup>, 3000 kg ha<sup>-1</sup> y 4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita a los 25 meses posteriores al encalado en el Argiudol.

A partir del análisis no paramétrico se observó que la CIC no presentó respuesta ante el agregado de dolomita y yeso ( $p < 0,05$ ).

El  $\text{Ca}^{+2}$  presentó incremento progresivo con la adición de dosis crecientes de dolomita ( $p>0,05$ ). El tratamiento D4 mostró mayor contenido de  $\text{Ca}^{+2}$  que T, D1 y D2, con un incremento del 44,6%, 33,9% y 24,22%, respectivamente. Por otra parte, el tratamiento D3 se incrementó en un 32,3% respecto a T (Figura 2.3.5).



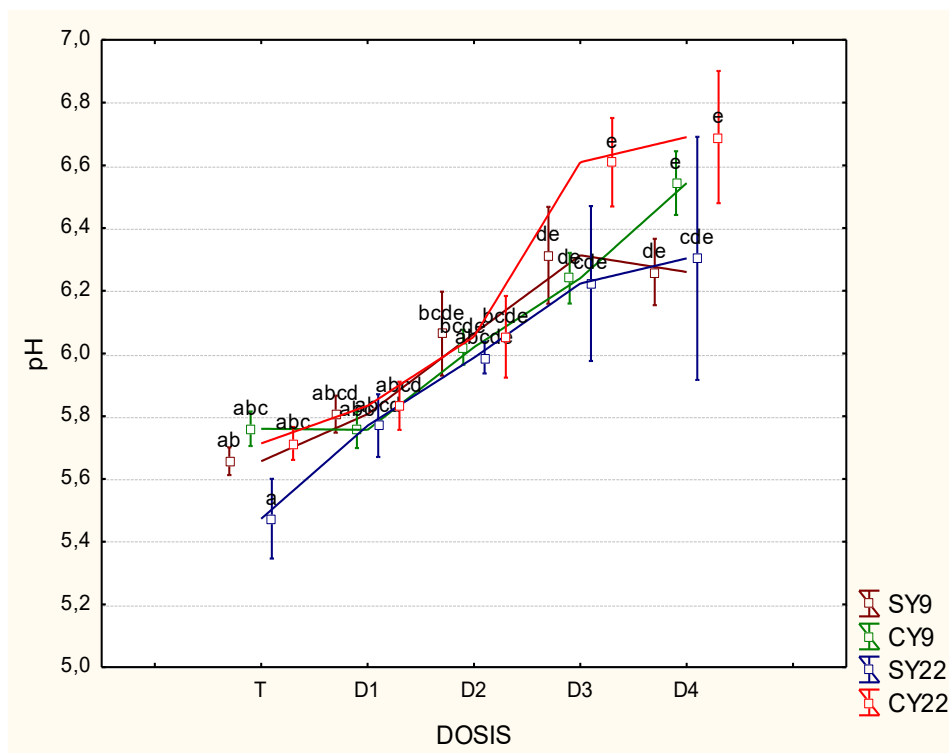
**Figura 2.3.5** Contenido de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) en el suelo Argiudol según tratamiento aplicado: T=0  $\text{kg ha}^{-1}$ , D1=1000  $\text{kg ha}^{-1}$ , D2=2000  $\text{kg ha}^{-1}$ , D3=3000  $\text{kg ha}^{-1}$  y D4=4000  $\text{kg ha}^{-1}$  de dolomita con adición de 200  $\text{kg ha}^{-1}$  de yeso (CY) y sin yeso (SY) a los 7 meses posteriores al encalado. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar.

A los 7 meses el  $\text{Mg}^{+2}$ , el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y la relación  $(\text{Ca}^{+2}+\text{Mg}^{+2})/\text{CIC}$ , no presentaron respuesta ante el agregado de dolomita y yeso ( $p<0,05$ ).

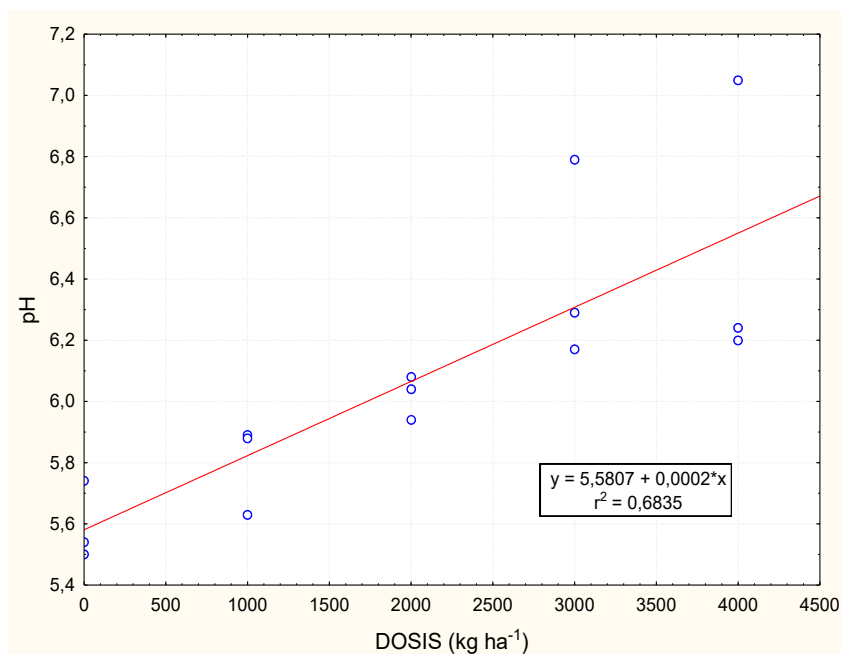
### 2.3.2.3 Paleudol

El pH presentó heterogeneidad de varianzas para la interacción dosis-yeso-tiempo, y el contenido de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  para la interacción dosis-yeso, las cuales no pudieron ser corregidas a partir de transformaciones, por lo tanto, se procedió a realizar un análisis no paramétrico Kruskal-Wallis. El contenido de  $\text{Na}^+$  presentó heterogeneidad de varianzas para la interacción dosis yeso y fue corregida a partir de la transformación logaritmo decimal.

El pH a partir del análisis no paramétrico presentó diferencia significativa para la interacción dosis-yeso-meses ( $p<0,05$ ). A los 9 y 22 meses los tratamientos D3 y D4 SY y CY presentaron incremento de pH respecto a TSY. A los 22 meses D2CY también presentó aumento de pH respecto a TSY. En cada dosis no se observaron diferencias para el factor yeso y momento de muestreo (Figura 2.3.6.a). La regresión del pH en función de la dosis fue significativa positiva a los 22 meses posteriores al encalado ( $p<0,01$ ) (Figura 2.3.6.b)

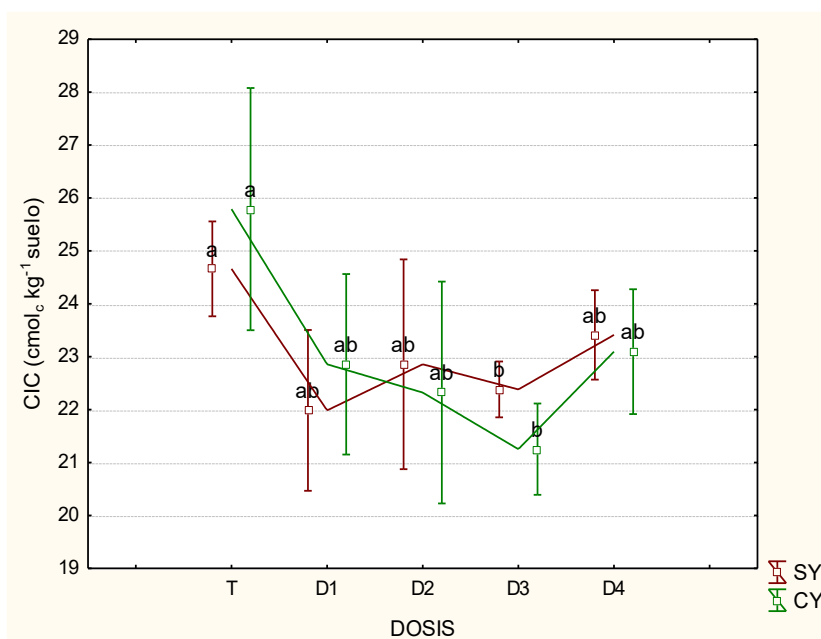


**Figura 2.3.6.a** pH actual (1:2,5 suelo/H<sub>2</sub>O) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup>, D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) y sin adición (SY) a los 9 y 22 meses posteriores al encalado en el Paleudol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso-tiempo. Las barras representan el error estándar.



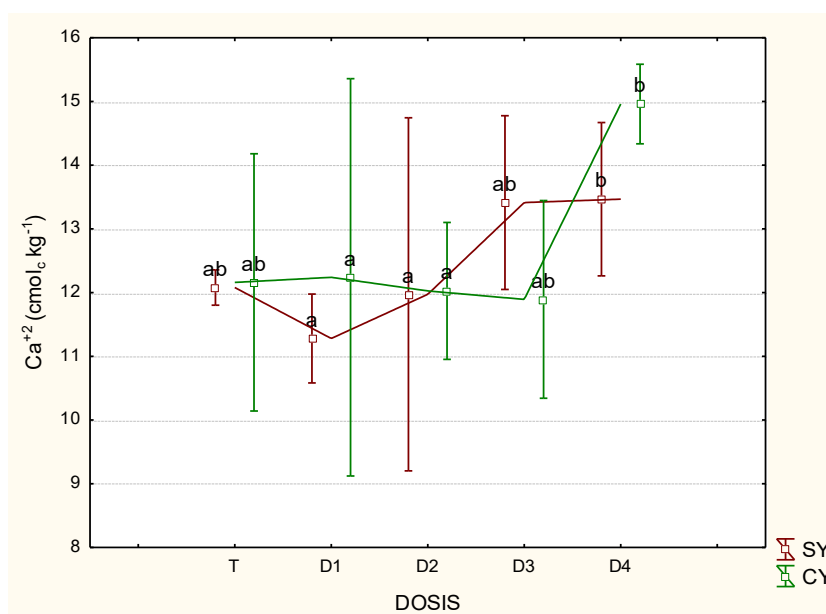
**Figura 2.3.6.b** pH actual (1:2,5 suelo/H<sub>2</sub>O) en función de la dosis aplicada: 0 kg ha<sup>-1</sup>, 1000 kg ha<sup>-1</sup>, 2000 kg ha<sup>-1</sup>, 3000 kg ha<sup>-1</sup> y 4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita a los 22 meses posteriores al encalado en el Paleudol.

La CIC presentó disminución significativa con la adición de dolomita ( $p < 0,05$ ). En el tratamiento D3 la CIC disminuyó 13,6% respecto a T. La prueba de contrastes no mostró diferencias entre T y el resto de las dosis. La adición de yeso no modificó la CIC (Figura 2.3.7).



**Figura 2.3.7** Capacidad de intercambio catiónico (CIC,  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) según tratamiento aplicado: T=0  $\text{kg ha}^{-1}$ , D1=1000  $\text{kg ha}^{-1}$ , D2=2000  $\text{kg ha}^{-1}$ , D3=3000  $\text{kg ha}^{-1}$  y D4=4000  $\text{kg ha}^{-1}$  de dolomita con adición de 200  $\text{kg ha}^{-1}$  de yeso (CY) y sin adición (SY) 9 meses posteriores al encalado en el Paleudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar.

A partir del análisis no paramétrico se observó que el contenido de  $\text{Ca}^{+2}$  si bien fue mayor en D4 respecto a D1 y D2 en un 21% y 18% respectivamente, no se diferenció de T ( $p < 0,05$ ). El  $\text{Ca}^{+2}$  no se modificó con la adición de yeso ( $p < 0,05$ ) (Figura 2.3.8).

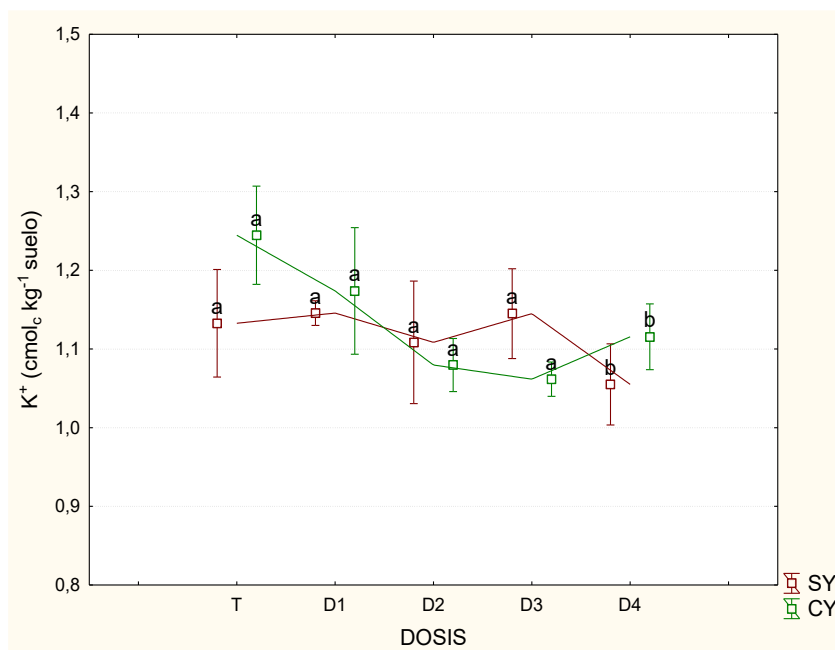


**Figura 2.3.8** Contenido de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) según tratamiento aplicado: T=0  $\text{kg ha}^{-1}$ , D1= 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ , D2= 2000  $\text{kg ha}^{-1}$ , D3= 3000  $\text{kg ha}^{-1}$  y D4= 4000  $\text{kg ha}^{-1}$  de dolomita con adición de 200  $\text{kg ha}^{-1}$  de yeso (CY) y sin adición (SY) 9 meses posteriores al encalado en el Paleudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar.

El contenido de  $Mg^{+2}$ , a partir del análisis no paramétrico, no se vio modificado con la adición de dolomita y yeso ( $p < 0,05$ ).

El contenido de  $Na^+$  presentó heterogeneidad de varianzas, la cual pudo ser corregida mediante transformaciones. A partir del análisis de los datos transformados se observó que el  $Na^+$  no se modificó con el agregado de dolomita y yeso.

El contenido de  $K^+$  disminuyó significativamente ( $p < 0,08$ ) en D4 respecto a T (Figura 2.3.9).



**Figura 2.3.9** Contenido de potasio ( $K$ ,  $cmol_c kg^{-1}$ ) según tratamiento aplicado: T=0  $kg ha^{-1}$ , D1= 1000  $kg ha^{-1}$ , D2= 2000  $kg ha^{-1}$ , D3= 3000  $kg ha^{-1}$  y D4= 4000  $kg ha^{-1}$  de dolomita con adición de 200  $kg ha^{-1}$  de yeso (CY) y sin adición (SY) 9 meses posteriores al encalado en el Paleudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar.

La relación  $(Ca^{+2}+Mg^{+2})/CIC$  no se diferenciaron con los tratamientos ( $p < 0,05$ ).

#### 2.3.2.4 Resumen de los resultados del complejo de cambio

**Tabla 2.1** Resumen de los efectos de las enmiendas sobre el complejo de cambio en los tres suelos bajo estudio. D=dolomita, Y=yeso, M=meses, D1=1000  $kg ha^{-1}$ , D3=3000  $kg ha^{-1}$  y D4=4000  $kg ha^{-1}$  de dolomita.

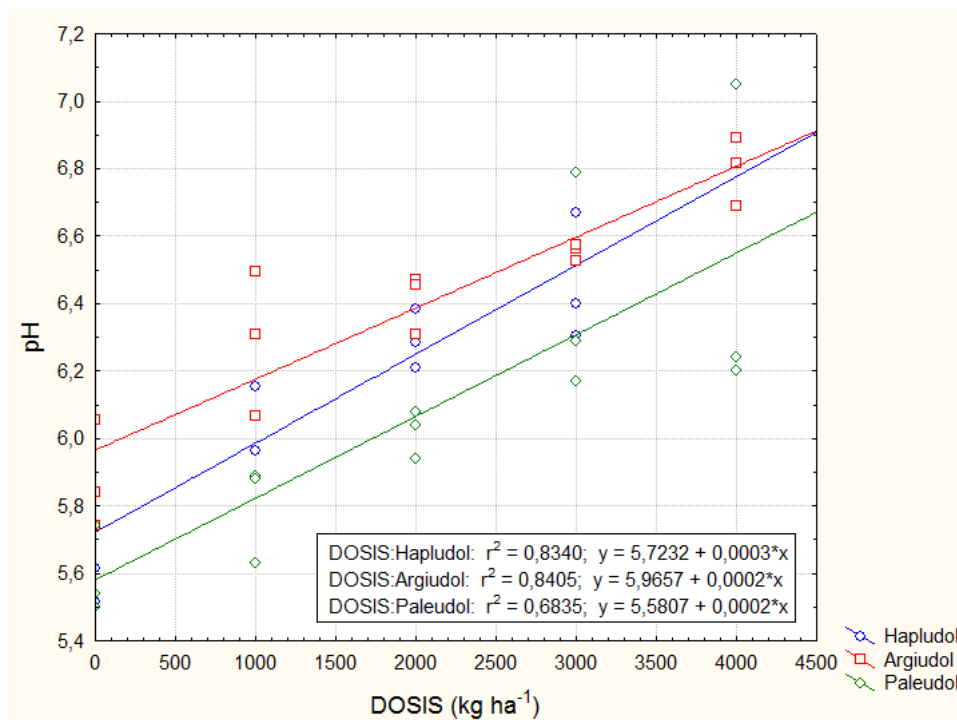
CATIONES DE CAMBIO	Hapludol	Argiudol	Paleudol
pH	DxYxM	DxYxM	DxYxM
CIC	D1↑ 20M↑	=	D3↓
$Ca^{+2}$	DxYxM	D↑	D4↑
$Mg^{+2}$	DxY↑	=	=
$Na^+$	DxYxM	=	=
$K^+$	Y↓	=	D4↓
$(Ca^{+2}+Mg^{+2})/CIC$	DxY↑	=	=



### 2.3.3 Discusión, complejo de cambio

En los tres suelos el incremento de pH observado con la adición de dolomita se debe a que el ion carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) incorporado en la dolomita se hidroliza, produce iones  $\text{OH}^-$ , los cuales se combinan con los  $\text{H}_3\text{O}^+$  en exceso y forman  $\text{H}_2\text{O}$  (Espinoza & Molina, 1999). En el caso del Hapludol donde se sembró alfalfa el pH se incrementó alcanzando el rango óptimo sugerido de 6,5-7,5 para el desarrollo de dicho cultivo (García & Vázquez, 2012; Vázquez & Pagani, 2015). Tanto en el Argiudol como en el Paleudol se sembró soja y el encalado permitió alcanzar el rango óptimo de 6-7 para su desarrollo (Vázquez, 2007). Estos incrementos de pH obtenidos con la adición de enmiendas coinciden con lo hallado por numerosos autores en la región Pampeana (Millán, 2010; Carrizo, 2014).

La capacidad reguladora o buffer de un suelo se define como la cantidad de ácido o base necesaria para cambiar su pH en una unidad (Sá Mendonça et al., 2006) y depende del contenido y tipo de acidez, presencia de sales, cantidad y tipo de arcillas y materia orgánica, y del pH inicial que tiene el suelo (Van Rensburg et al., 2009; Wang et al., 2015). Por lo tanto, mayor capacidad buffer indica mayor cantidad de enmienda necesaria para neutralizar la acidez del suelo bajo similares valores de pH actual (Xu et al., 2012; Wang et al., 2015). Los sitios bajos estudio si bien presentaban diferente contenido de arcilla y materia orgánica inicial, (Figura 2.3.10) no mostraron diferentes respuestas ante el incremento de pH por unidad de enmienda ( $p < 0,05$ ) adicionada en la última medición realizada. Esto podría deberse a que la diferencia en el contenido y grado de humificación de la materia orgánica y la variabilidad mineralógica entre estos Molisoles no fueron suficientes para mostrar diferentes respuestas al agregado de enmiendas básicas.



**Figura 2.3.10** pH actual (1:2,5 suelo/H<sub>2</sub>O) en función de la dosis aplicada: 0 kg ha<sup>-1</sup>, 1000 kg ha<sup>-1</sup>, 2000 kg ha<sup>-1</sup> y 3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita en el Hapludol a los 20 meses y 4000 kg ha<sup>-1</sup> en el Argiudol a los 25 meses y en el Paleudol a los 22 meses. Se incluyen el r<sup>2</sup> y las funciones lineales de cada suelo.

En el Hapludol se observó para las menores dosis que la adición de yeso y el tiempo transcurrido incrementaron el pH. El efecto del yeso sobre el incremento del pH se debe a que una vez aplicado se disocia en Ca<sup>2+</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, el Ca<sup>2+</sup> reemplaza cationes en la fase de intercambio y puede liberar a la solución del suelo H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> (Espinoza & Molina, 1999). A partir de la liberación de H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> se favorecería la disolución del Ca CO<sub>3</sub> y del Mg CO<sub>3</sub> adicionados como dolomita (Millán et al., 2010). El azufre (S) de los SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> es tomado por las plantas y disminuye así su efecto de ácido fuerte.

El incremento de pH con la adición de enmienda en el tiempo también se observó en el Argiudol y Paleudol, este efecto se debió a que los productos carbonatados poseen baja solubilidad (Sherman & Barak, 2000) lo que determina efectos en el suelo relativamente lentos respecto de sales sulfatadas o de otro tipo (uno a varios meses, hasta años según la granulometría).

En este estudio la CIC en ninguno de los tres sitios presentó un incremento progresivo con el pH y por lo tanto con la dosis. Coincidiendo con mis resultados, Pellegrini et al. (2015) determinaron la capacidad de intercambio bufferada (CIC) y no bufferada (CICnb) en suelos encalados con diferentes dosis de enmienda y ninguno de los métodos mostró un incremento de la CIC por los tratamientos ni discriminar el efecto de la dosis. Los resultados que se obtuvieron indicaron que ni la capacidad de intercambio catiónico ni la saturación básica, bufferada o no bufferada, tendrían capacidad diagnóstica de la residualidad del agregado de

enmiendas básicas, mientras que el pH actual 1:2,5, sí fue capaz de discriminar las dosis de encalado. La CIC, además, presentó un comportamiento diferencial entre los tres suelos bajo estudio. En el Hapludol la mayor CIC a los 8 y 20 meses se observó solamente en los tratamientos donde se adicionó la menor dosis y se relacionó significativamente con el contenido de carbono orgánico total (analizado a continuación en el apartado 2.4). Así, la CIC se encontraría más relacionada con un efecto de la enmienda sobre la dinámica de la humificación y mineralización de la materia orgánica que con las arcillas. No están completamente definidos los efectos del encalado sobre el contenido de materia orgánica debido a que produciría efectos contrarios. Por un lado, la aplicación de enmiendas mejora la respuesta a la aplicación de fertilizantes en suelos ácidos, debido a que mejora la exploración de las raíces y permite que la planta absorba los nutrientes de los fertilizantes aplicados al suelo, incrementando los rendimientos del cultivo, por lo tanto, la cantidad de residuos y posterior balance de materia orgánica (León, 1998). Sin embargo, como ya se mencionó, otros autores han demostrado que el encalado produciría mayor actividad microbiana y con ello aumentaría la mineralización de la materia orgánica lábil (Roth & Pavan, 1991; Baldock et al., 1994).

En el Argiudol la CIC a los 7 meses no se vio modificada con la adición de la enmienda, debido a que este suelo presenta mayor contenido de arcillas y materia orgánica en superficie que el Hapludol, confiriéndole mayor capacidad buffer (Zapata Hernández, 2004). En el Paleudol a los 9 meses la disminución de la CIC con adición de 3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita podría ser consecuencia de la disminución del CO por una estimulación de la mineralización al igual que en el Hapludol (Capítulo 2.4).

El contenido de calcio (Ca<sup>+2</sup>) en el Argiudol a los 7 meses y en el Paleudol a los 10 meses fue máximo con la mayor dosis. Que los aumentos en el contenido de Ca<sup>+2</sup> en el Paleudol no fueran progresivos con el aumento de la dosis, coincide con lo mencionado anteriormente por Pellegrini et al. (2015), quien destacó la falta de capacidad de diagnóstico de la residualidad del agregado de enmiendas básicas por parte de la capacidad de intercambio catiónico y la saturación básica. En el Argiudol, en cambio, el contenido de Ca<sup>+2</sup> se incrementó conforme al aumento de la dosis y también con la adición de yeso. Ya se mencionó que el yeso, además de incorporar Ca<sup>+2</sup>, favorece la solubilización de los carbonatos agregados y con ello aumenta el contenido de Ca<sup>+2</sup> en el suelo (Millán et al., 2010).

El incremento del contenido de magnesio (Mg<sup>+2</sup>) en el Hapludol a los 8 meses estuvo ligado a la mayor dosis y al efecto de la adición del yeso sobre la dolomita, mientras que a los 20 meses los efectos parecen estar asociados a factores estacionales, ya que no hay respuesta a las enmiendas. En el Argiudol y Paleudol el Mg<sup>+2</sup> no presentó diferencias con la adición de enmiendas. La ausencia de incrementos de Mg<sup>+2</sup> en estos dos suelos podría

deberse a que, según Edmeades (1980) hay suelos que tienen preferencia de selectividad para  $\text{Ca}^{+2}$  en relación al  $\text{Mg}^{+2}$ . Según Sumner et al. (1978) el encalado causa fijación de  $\text{Mg}^{+2}$ , conversión de  $\text{Mg}^{+2}$  intercambiable a formas no intercambiables a pH ligeramente por encima de 6. Por otra parte, los autores mencionan que dada la preferencia de los sitios de intercambio por el  $\text{Ca}^{+2}$ , grandes cantidades de  $\text{Ca}^{+2}$  suministradas a partir de la enmienda hacen que el  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{K}^{+}$  se desplacen del complejo de intercambio, lo que aumenta el potencial de pérdida por lixiviación. Por lo tanto, en el Hapludol el incremento de  $\text{Mg}^{+2}$  en el corto tiempo se asociaría a un desbalance  $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$  inicial ya mencionados, mientras que en los otros dos sitios el efecto de la dolomita fue diferente sobre el contenido de  $\text{Mg}^{+2}$  por no hallarse dicho desbalance. El desplazamiento del  $\text{K}^{+}$  del complejo de intercambio mencionado por los autores, se observó en el Paleudol con las mayores dosis de dolomita.

Si bien la liberación del  $\text{Ca}^{+2}$  de la enmienda es capaz de reemplazar al sodio, disminuyendo su nivel en la solución edáfica (Sharma, 1986; Costa & Godz, 1999) en ninguno de los tres sitios se halló dicha disminución. Esto podría deberse a los bajos contenidos de este elemento en estos suelos (en el Hapludol  $<0,5 \text{ cmolc kg}^{-1}$ , Argiudol  $<1 \text{ cmolc kg}^{-1}$  y Paleudol  $<3 \text{ cmolc kg}^{-1}$ ).

Pellegrini et al. 2005, utilizaron la relación  $\text{Ca}^{+2}/\text{CIC}$  y  $\text{Mg}^{+2}/\text{CIC}$  para analizar la proporción y el efecto que cada uno de estos cationes ocupa en la CIC con el encalado, pero debido a que la dolomita aporta ambos, utilizamos la relación  $(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/\text{CIC}$ . Tanto en el testigo como en los tratamientos con enmiendas estos cationes ocupaban la mayor proporción de las bases, 78-85%, 85-92% y 75-86% en el Hapludol, Argiudol y Paleudol respectivamente. La relación  $(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/\text{CIC}$  sólo se vió modificada en el Hapludol, ya que en la dosis  $3000 \text{ kg ha}^{-1}$  de dolomita, se aportan  $1043,5 \text{ kg}$  de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ , lo que representa  $65217,4 \text{ cmolc}$ , y teniendo en cuenta la Dap, equivale a 44,1 % de la CIC en el Hapludol, mientras que la misma masa aportada en el Argiudol y Paleudol representa una proporción mucho menor, 28,7 % y 26,5 % de la CIC respectivamente. La saturación de bases sobre CIC (SB/CIC) en el Hapludol alcanzó el 100% con la dosis de  $3000 \text{ kg ha}^{-1}$  de dolomita, mientras que en el Argiudol y Paleudol fue del 88% y 91% respectivamente. En el Argiudol la SB/CIC con la aplicación de  $4000 \text{ kg ha}^{-1}$  de dolomita fue del 100%, mientras que en el Paleudol, con el mayor contenido de materia orgánica, alcanzó el 84%. Estos valores dejan en evidencia el impacto del aporte de la misma cantidad de bases según la CIC de cada suelo.

La adición de enmiendas, según la dosis, tipo de suelo y contenido de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  iniciales, incrementó el contenido de  $\text{Ca}^{+2}$  y/o  $\text{Mg}^{+2}$ , y en el Paleudol, donde el  $\text{Ca}^{+2}$  aumentó, disminuyó el K. El contenido de  $\text{Mg}^{+2}$  solo se incrementó en el Hapludol, donde inicialmente se encontraba en deficiencia. Este comportamiento podría estar evidenciando que la

respuesta de cationes, como  $Mg^{+2}$  y  $K^+$ , con la adición de enminedas dependerá de su contenido inicial de en el suelo y del  $Ca^{+2}$  aportado con dicha enmienda.

## 2.4 COMPONENTES ORGÁNICOS ESTABLES Y LÁBILES

### 2.4.1 Materiales y métodos

#### 2.4.1.1 Determinaciones

- Carbono orgánico total (COT): determinación por Walkley y Black (1934) micrométodo propuesto por Richter. (1981) (SAMPLA 2004), según recomendaciones de Métodos Analíticos del Instituto Nacional de Edafología y Agrobiología “José M. Albareda” (1973), España, y de lo sugerido por The Laboratory Methods and Data Exchange Programme (1988) en sus procedimientos LABEX para análisis de suelos. El carbono es oxidado con una mezcla de  $K_2Cr_2O_7$  y  $H_2SO_4$  concentrado y el exceso de dicromato se titula con reductor ferroso. Este método al no oxidar completamente a la materia orgánica sino a la fracción más lábil, se afectó por 0,82.

En el Argiudol a los 19 meses y en el Paleudol a los 21 meses esta determinación se realizó sobre los tratamientos testigo, con adición de  $1000\text{ kg ha}^{-1}$  y  $4000\text{ kg ha}^{-1}$  con yeso (TCY, D1CY y D4CY).

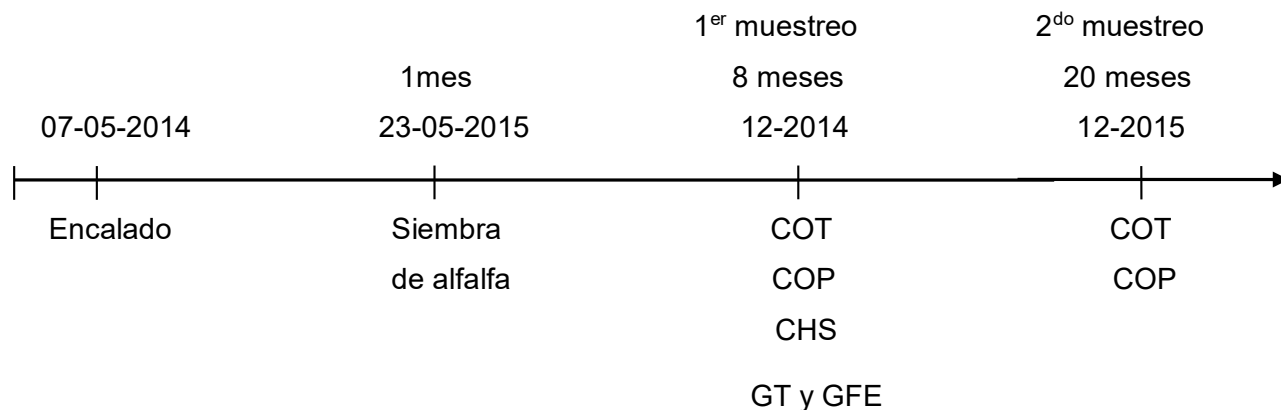
- Carbono orgánico particulado (COP) por separación física en dos fracciones de  $2000-105\ \mu\text{m}$  (fracción gruesa, FG) y  $105-53\ \mu\text{m}$  (fracción fina, FF). La fracción  $< 53\ \mu\text{m}$  constituye el COM (carbono orgánico asociado a la fracción mineral) (Galantini, 2005). En el Argiudol a los 19 meses y en el Paleudol a los 9 meses esta determinación se realizó sobre los tratamientos testigo, con adición de  $1000\text{ kg ha}^{-1}$  y  $4000\text{ kg ha}^{-1}$  con yeso (TCY, D1CY y D4CY).
- Carbohidratos solubles (CHS) (Brink et al., 1960)
- Glomalinas totales (GT) y fácilmente extractables (GFE) (Wright & Upadhyaya, 1998)

#### 2.4.1.2 Muestreo del suelo

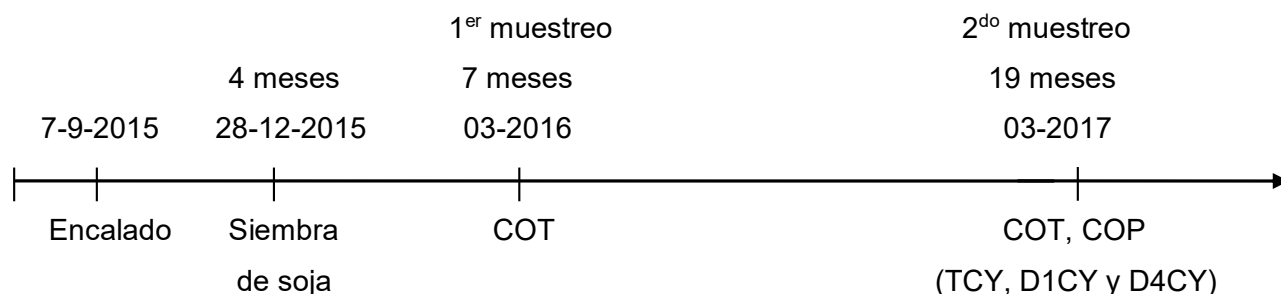
En cada sitio de ensayo y en distintos momentos posteriores al encalado, se recolectaron 15 sub-muestras por parcela de cada tratamiento (tres muestras del mismo tratamiento por muestreo debido a que los ensayos tenían tres bloques) de 0-10 cm de profundidad.

Las muestras fueron tomadas posteriormente al encalado y se determinó:

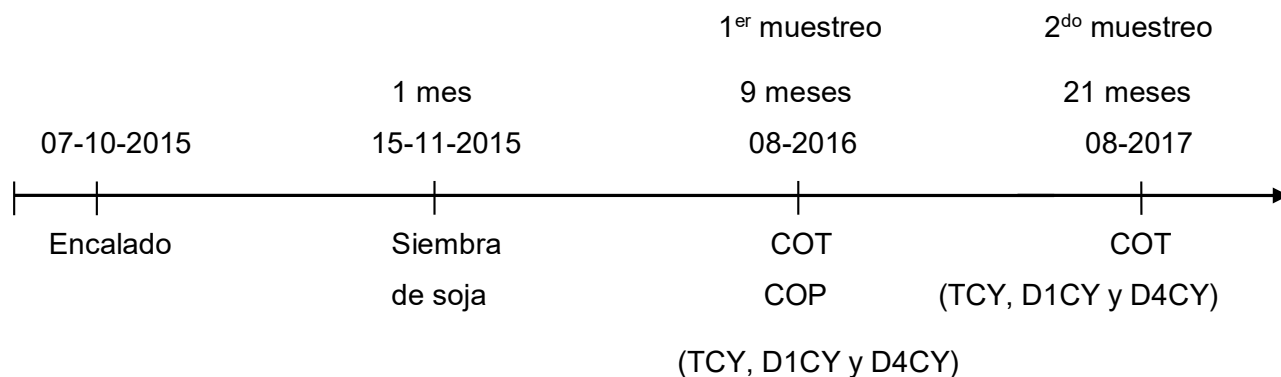
### *Hapludol*



### *Argjudol*



### *Paleudol*



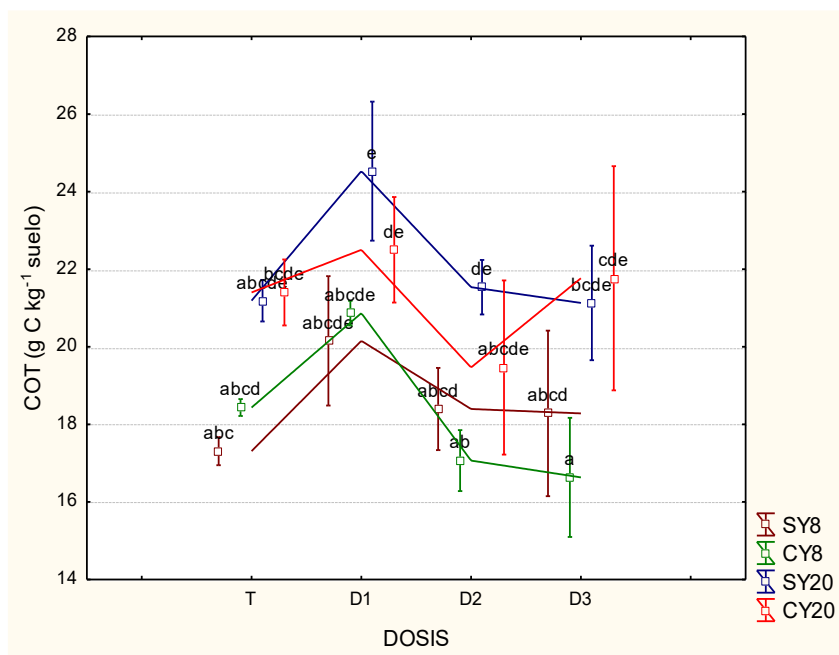
## 2.4.2 Resultados

### 2.4.2.1 *Hapludol*

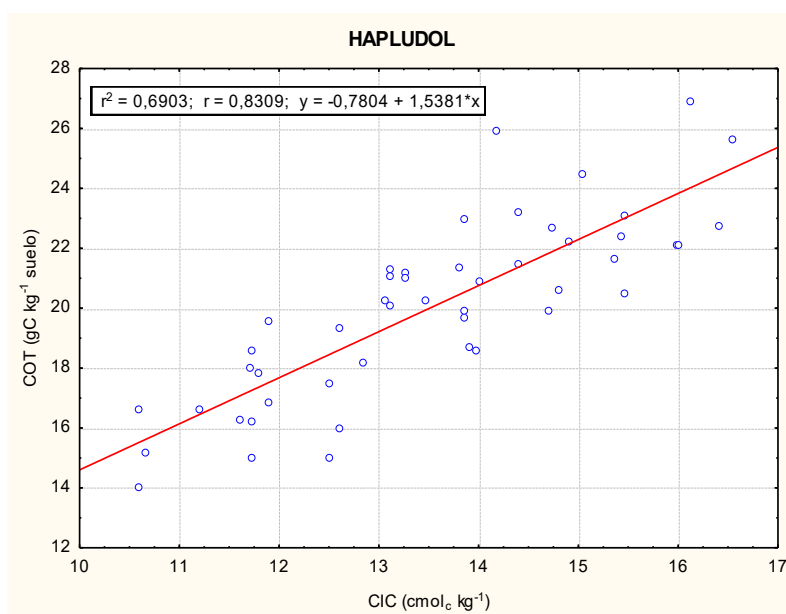
El COT, la FG del COP y COM presentaron heterogeneidad de varianzas para la interacción dosis-yeso-tiempo, la FF del COP para la interacción yeso-meses y las GT para dosis. La heterogeneidad de varianzas en ninguno de estos casos pudo ser corregida a partir de transformaciones, por lo tanto, se procedió a realizar un análisis no paramétrico de Kruskal-

Wallis. El contenido de CHS presentó heterogeneidad de varianza para la interacción dosis-yeso y fue corregida a partir de la función logaritmo decimal.

El contenido de COT a partir del análisis no paramétrico presentó diferencia significativa para la interacción dosis-yeso-meses ( $p < 0,05$ ). En cada momento analizado, 8 y 20 meses, los tratamientos con dolomita y yeso no presentaron diferencias respecto a TSY. Las mayores dosis de dolomita, D2 y D3, CY a los 8 meses presentaron menores contenidos que SY a los 20 meses, dejando en evidencia que altas dosis de enmiendas afectarían la dinámica del COT en los primeros momentos posteriores a la aplicación (Figura 2.4.1.a). El COT presentó correlación positiva con la CIC ( $r = 0,83$ ,  $p < 0,05$ ) (Figura 2.4.1.b)



a



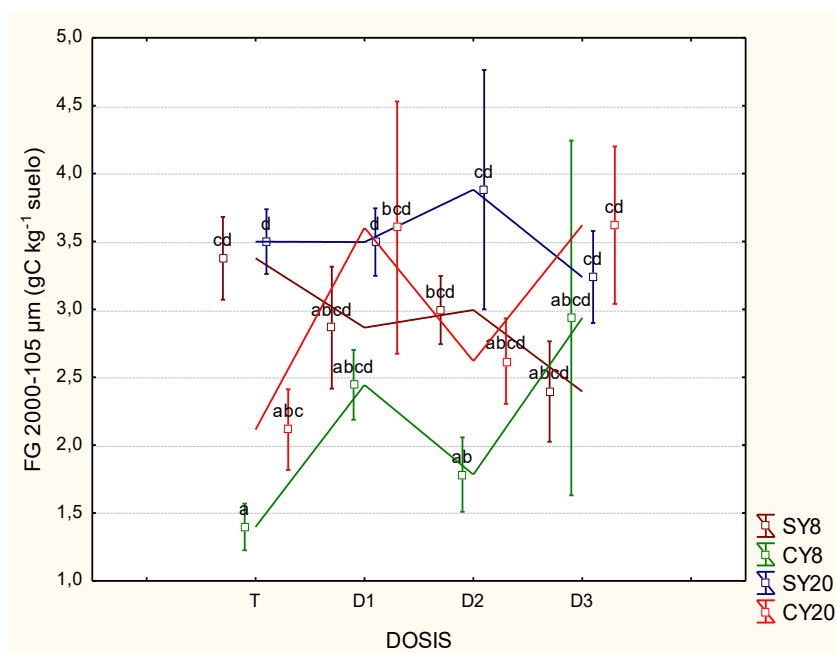
b

**Figura 2.4.1** Carbono orgánico total (COT, g C kg<sup>-1</sup> suelo) **a-** según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) y sin adición (SY) a los 8 y 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso-tiempo. Las barras representan el error estándar. **b-** correlación con la CIC

La FG (2000-105 μm), a partir del análisis no paramétrico, presentó diferencia significativa para la interacción dosis-yeso-meses (p<0,05). A los 8 y a los 20 meses los TCY presentaron menor FG que los TSY. Se realizó una prueba de contrastes entre TCY 8 y TCY 20 vs. TSY 8 y TSY 20 (p<0,05), la cual confirmó el efecto negativo del yeso sobre la FG en T. A los 8 meses D2CY presentó menor contenido de FG que TSY (Figura 2.4.2).

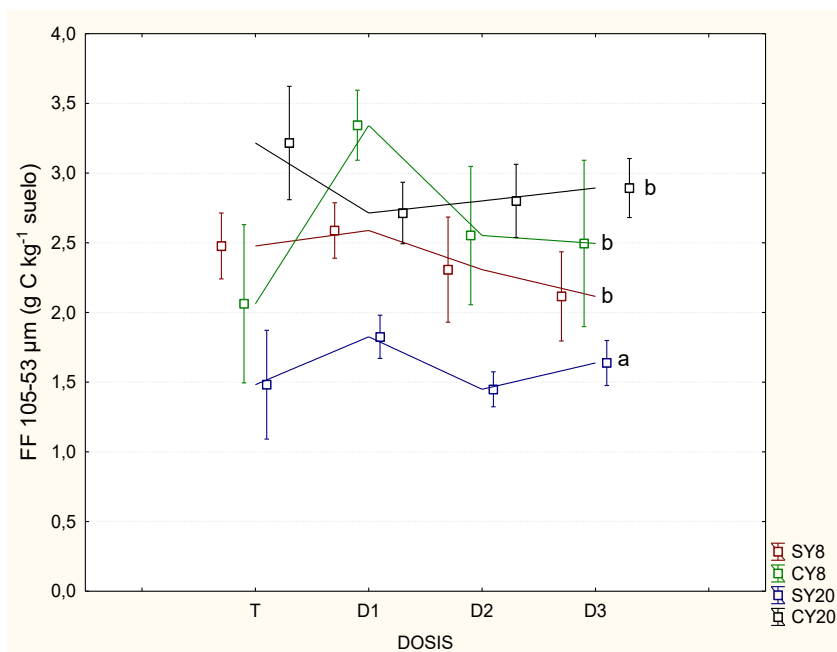
La FF (105-53 μm) no se vió modificada con la adición de dolomita y presentó interacción entre yeso y meses (p<0,05) siendo menor a los 20 meses SY respecto a los 20 meses CY y a los 8 meses SY y CY (Figura 2.4.3).

El COM (<53 μm) no presentó diferencias en ninguna de las dosis de dolomita respecto a T y tampoco presentó respuesta con adición de yeso. Dentro de las dosis analizadas D1 presentó mayor COM que D2 (p<0,05). Se observó un incremento significativo cuando se evaluó a los 20 meses respecto a los 8 meses (p<0,05) (Figura 2.4.4).

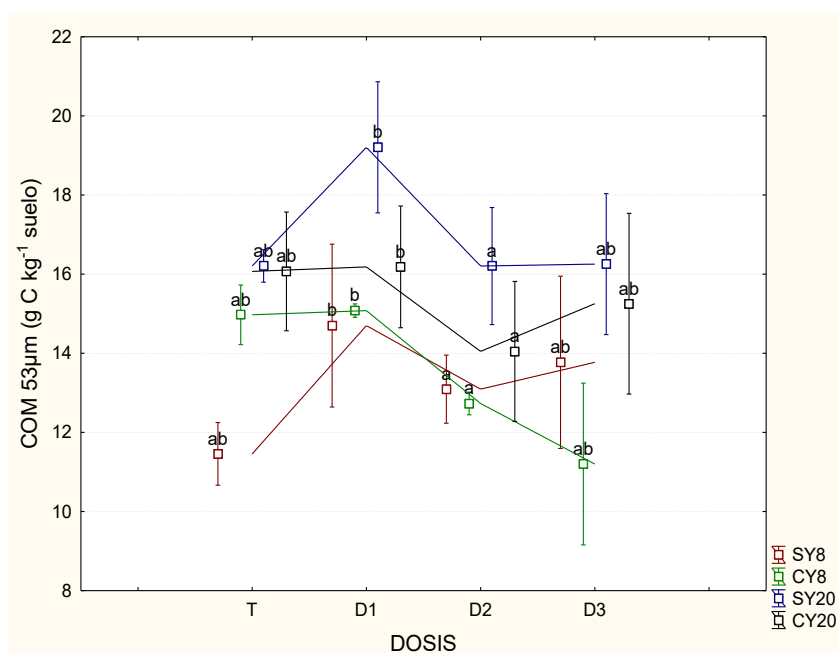


**Figura 2.4.2** Fracción gruesa (FG, g C kg<sup>-1</sup> suelo) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) y sin adición (SY) a los 8 y 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso-meses. Las barras de error representan el error estándar.



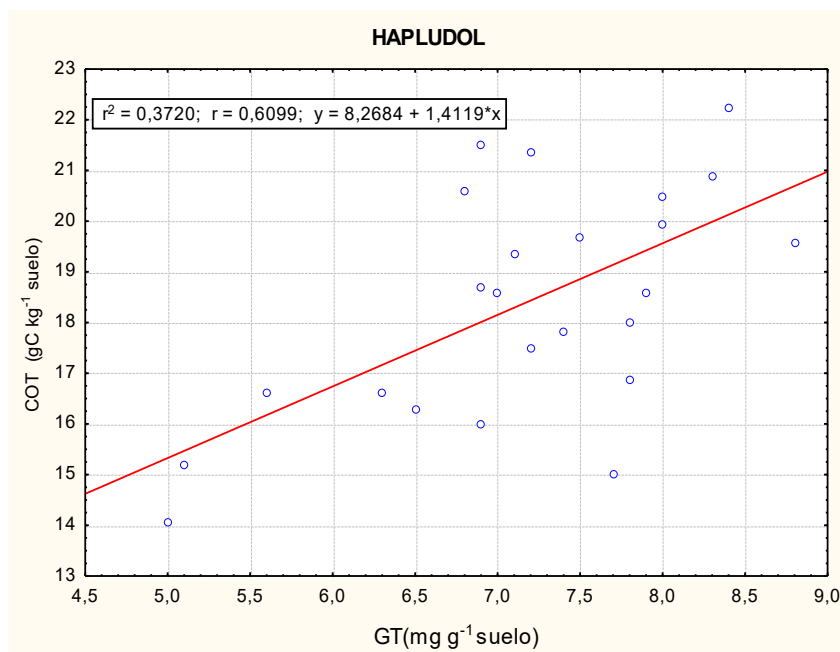


**Figura 2.4.3** Fracción fina (FF, g C kg<sup>-1</sup> suelo) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) y sin adición (SY) a los 8 y 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción yeso-meses. Las barras de error representan el error estándar.



**Figura 2.4.4** Carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COM, g C kg<sup>-1</sup> suelo) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso y sin adición, a los 8 y 20 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas para dosis.

Los contenidos de CHS, a partir de los datos transformados con la función logaritmo decimal, las GT y GFE evaluados a los 8 meses posteriores al encalado no presentaron diferencia significativa ante la adición de dolomita y yeso ( $p < 0,05$ ). Las GT presentaron correlación positiva con el COT ( $r = 0,6$ ,  $p < 0,05$ ) (Figura 2.4.5).



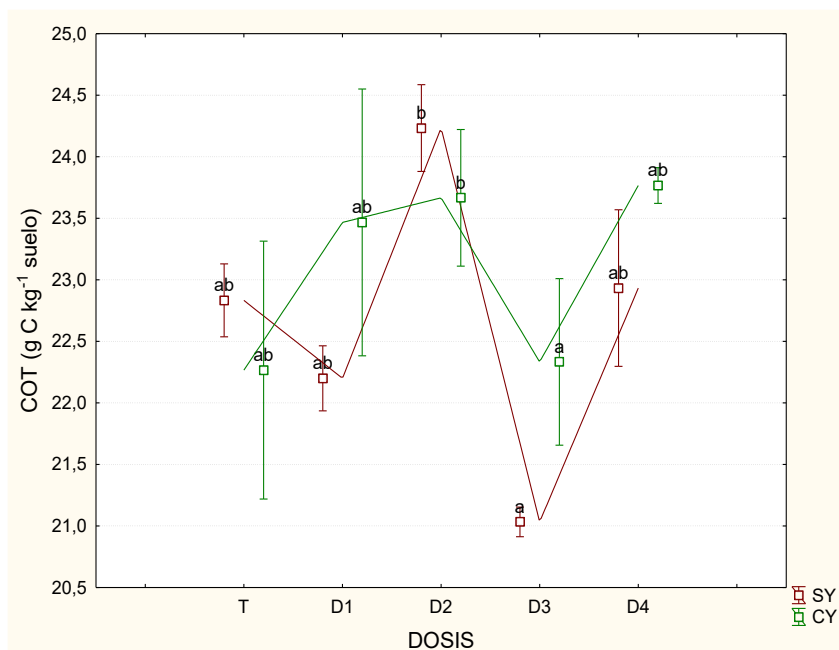
**Figura 2.4.5** Correlación glomalinas totales (GT, mg g<sup>-1</sup> suelo) y carbono orgánico total (COT g kg<sup>-1</sup> suelo) a los 8 meses posteriores al encalado en el Hapludol.

#### 2.4.2.2 *Argiudol*

El COT, presentó heterogeneidad de varianzas para la interacción dosis-yeso, cuando fue evaluado a los 7 meses posteriores al encalado, y para la interacción dosis-meses cuando se evaluó a los 7 y 19 meses. La heterogeneidad de la varianza no pudo ser corregida a partir de las transformaciones, por lo tanto, se realizó un análisis no paramétrico.

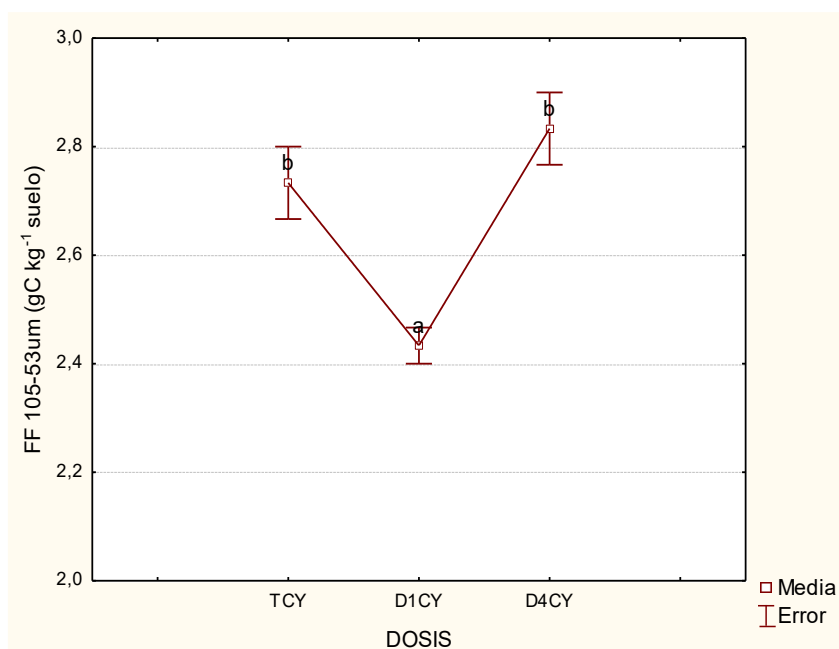
A partir del análisis no paramétrico, a los 7 meses se observó que el COT no presentó diferencias entre T y las diferentes dosis de dolomita. Dentro de las dosis de enmienda adicionales D2 presentó mayor contenido que D3 (Figura 2.4.6).

A los 7 y 19 meses posteriores al encalado entre los tratamientos TCY, D1CY Y D4CY no se observaron diferencias en el contenido de COT.



**Figura 2.4.6** Carbono orgánico total (COT, g C kg<sup>-1</sup> suelo) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup>, D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso y sin adición, a los 7 meses posteriores al encalado en el Argiudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar.

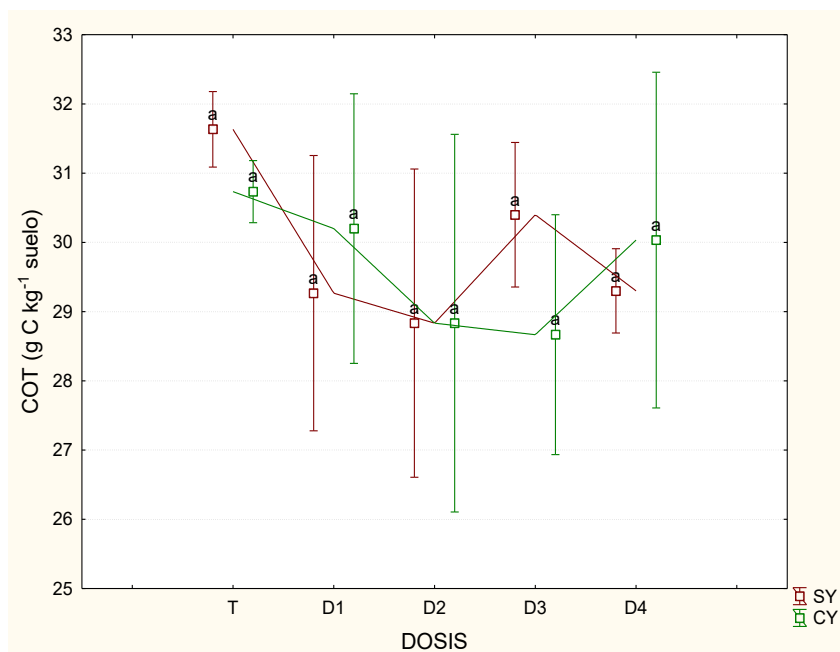
El COP en TCY, D1CY y D4CY evaluado a los 19 meses posteriores al encalado no presentó diferencia en la FG ( $p < 0,05$ ), aunque siguió un comportamiento similar a la FF. La FF presentó disminución en D1CY respecto a TCY y a D4CY ( $p < 0,05$ ) (Figura 2.4.7). El COM no presentó diferencias ante los tratamientos.



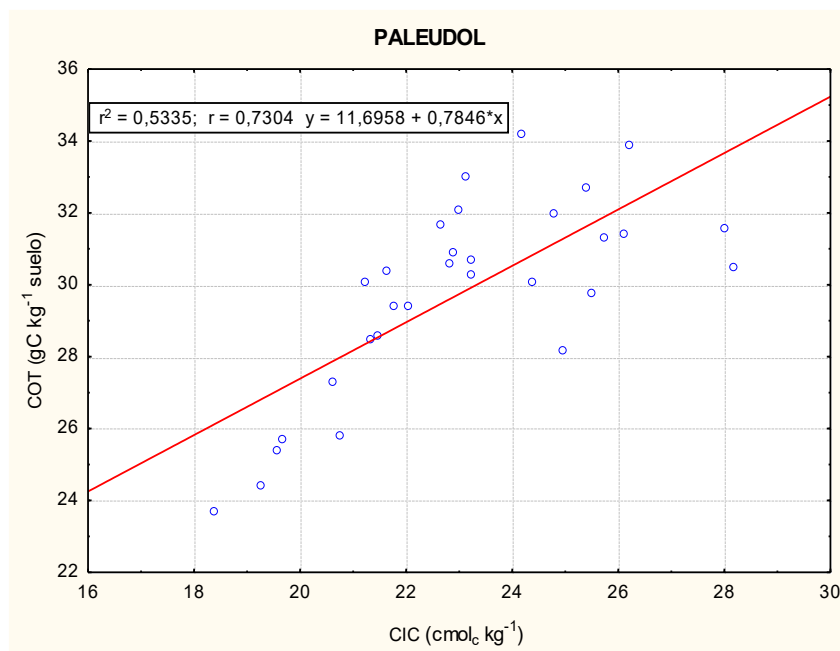
**Figura 2.4.7** Fracción fina (FF, g C kg<sup>-1</sup> suelo) según tratamiento aplicado TCY=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1CY=1000 kg ha<sup>-1</sup> y D4CY=4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso a los 19 meses posteriores al encalado en el Argiudol. Letras diferentes indican diferencias significativas para dosis. Las barras representan el error estándar.

### 2.4.2.3 Paleudol

El contenido de COT, evaluado a los 9 meses posteriores a la adición de enmienda, no se modificó con las diferentes dosis y adición de yeso (Figura 2.4.8.a). El COT se correlacionó positivamente con la CIC ( $r=0,73$ ,  $p<0,05$ ) (Figura 2.4.8.b).



a



b

**Figura 2.4.8** Carbono orgánico total (COT, g C kg<sup>-1</sup> suelo) **a**-según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup>, D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) y sin adición (SY), a los 9 meses posteriores al encalado en el Paleudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar. **b**-Correlación carbono orgánico total (COT, g C kg<sup>-1</sup> suelo) Capacidad de intercambio catiónico (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>)

A los 9 y 21 meses posteriores al encalado el COT en los tratamientos TCY, D1CY y D4CY no presentó diferencias entre dosis. El contenido de COT fue mayor a los 9 meses que a los 21 meses, pero debido a que incluye al testigo no se puede atribuir al efecto de la enmienda.

El COP en los tratamientos TCY, D1CY y D4CY evaluado a los 9 meses posteriores al encalado en sus dos fracciones, FG y FF, y COM no presentó diferencia significativa para las dosis analizadas ( $p < 0,05$ ).

#### 2.4.2.4 Resumen de los resultados de los efectos sobre componentes orgánicos

**Tabla 2.2** Resumen de los efectos de las enmiendas sobre componentes orgánicos del suelo en los tres suelos bajo estudio. D=dolomita, Y=yeso, M=meses, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup> y D2=2000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita.

PROP. ORGÁNICAS	Hapludol	Argiudol	Paleudol
COT	DxYxM	0	M ↓
FG 2000-105µm	DxY ↓	=	=
FF 105-53µm	YxM	D1 ↓	=
COM<53µm	M ↑	=	=
CHS	=		
GT	=		
GFE	=		

#### 2.4.3 Discusión propiedades orgánicas

El encalado y su consecuente incremento de pH aumentan la disponibilidad de nutrientes como P, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup> (Patiño et al., 2017) y molibdeno (Mo) (Guiddens & Perkins, 1960) generando mayor rendimiento. Teniendo en cuenta que el rendimiento es una función integrada del crecimiento de la parte aérea y de las raíces (Barrios et al., 2014) se incrementarán los residuos que retornan al suelo y la biomasa radical, dando como resultado mayor contenido de materia orgánica. Contrariamente a esto, algunos autores mencionan que el encalado favorece la actividad microbiana y acelera la descomposición de la materia orgánica, induciendo su descenso (McCay et al., 2013; Lawrence et al., 2016). Manna et al. (2007) también mencionan que, al elevarse el pH, se favorece el ambiente para la proliferación de la biota edáfica (fertilidad biológica), la cual, a contenidos altos de materia orgánica, libera nutrientes (fertilidad química) a través de la mineralización. Debido a que, en el suelo a partir del encalado, coexisten estos dos comportamientos opuestos se deduce que, el contenido de materia orgánica estable obtenido a partir de un mayor contenido de biomasa, podría compensar el incremento de la mineralización manteniendo estable el contenido de carbono. La combinación de estos efectos, podría explicar que altas dosis de enmiendas asociadas al yeso en los primeros meses posteriores a la aplicación, presentaran menor contenido de carbono que a largo plazo y sin contenido de yeso en el Hapludol, y la diferencia en el contenido de carbono entre 2000 y 3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita en el Argiudol.

La ausencia de diferencias en el contenido de carbono respecto al testigo en los tres sitios bajo estudio podría deberse a que la materia orgánica es poco sensible para evaluar los efectos de las prácticas agronómicas de corto plazo (Tan et al., 2007). Debido a esto y a que las distintas fracciones del carbono poseen diferentes tasas de humificación como de mineralización, es conveniente evaluar aquellas de mayor sensibilidad a las prácticas de manejo (Haynes, 2000; Six et al., 2002) a partir de la determinación del COP (Andriulo et al., 1999).

En este trabajo el análisis del carbono orgánico particulado (COP), si bien mostró cambios en el Hapludol y Argiudol frente a la adición de enmiendas, estos efectos fueron variables según el suelo y la fracción analizada.

En el Hapludol donde se analizó la adición de dolomita y yeso, el efecto se produjo sobre las tres fracciones de manera variable. En la fracción gruesa (FG, 2000-105  $\mu\text{m}$ ) se observó que las diferencias no estuvieron ligadas a las dosis de dolomita, sino a la adición de yeso el cual produjo disminución sobre esta fracción cuando no se adicionó dolomita. La fracción fina (FF, 105-53  $\mu\text{m}$ ) fue menor SY a los 20 meses respecto al resto de los tratamientos, por lo tanto, con la adición de yeso se mantuvo estable el contenido de esta fracción respecto a los 8 meses.

En el Argiudol la FF presentó menor contenido con 1000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita y adición de yeso. En el Argiudol y en el Paleudol el COM representó 83,22 % y 79 % del COT respectivamente.

Si bien, como se mencionó, se esperaría que las fracciones del COP, sean más sensibles a los efectos de diferentes prácticas agronómicas a corto plazo que el COT, en los tres suelos bajo estudio los resultados fueron variables. Esto podría deberse a que la sensibilidad estacional de estos parámetros orgánicos es muy alta como para captarla solamente en uno o dos momentos de muestreos anuales. La naturaleza altamente dinámica del COP, podría relacionarse con cambios estacionales en su magnitud por variaciones en la disponibilidad de sustrato que generen cambios en la actividad microbiana edáfica (Corre et al., 2002). Los cambios estacionales podrían estar también relacionados con la calidad del sustrato y con los factores abióticos que regulan su descomposición (Wander, 2004) y la dinámica de la fracción activa de la MO (Bonde & Rosswall, 1987). Las condiciones ambientales, particularmente el contenido de agua y la temperatura del suelo, ejercen una fuerte influencia sobre el proceso de transformación de los materiales vegetales dentro del suelo (Gregorich et al., 2006). Según Alvear et al. (2007) el aporte de materia orgánica al suelo a lo largo del año está ligado a factores climáticos, fluviales, edáficos y manejos de la vegetación.

La estabilidad estructural de los agregados de suelo está asociada preferencialmente a algunas formas de materia orgánica, encontrándose correlaciones positivas entre la estabilidad de los agregados y la concentración de carbohidratos solubles (Gijsman & Thomas 1995). Por otra parte, la presencia en el suelo de glomalina, una glicoproteína insoluble en agua con algunas características hidrofóbicas, muy estable y producida en forma abundante por las hifas de los hongos micorrizicos arbusculares (Wright & Upadhyaya 1996, Wright et al. 1996), estaría involucrada en la estabilización de los agregados de suelo (Wright & Upadhyaya 1998). Por lo tanto, el encalado al producir mayor actividad microbiana (Roth & Pavan, 1991; Baldock et al., 1994), incrementaría estas fracciones orgánicas, incidiendo directamente sobre la estabilidad estructural. Sin embargo, en el Hapludol la evaluación de glomalinas totales (GT), glomalinas fácilmente extractables (GFE) y carbohidratos solubles (CHS) a los 8 meses posteriores al encalado no manifestaron efectos significativos con las diferentes dosis de enmiendas y las GT se correlacionaron positivamente con el COT. Dicha correlación se debe a que las GT contienen un alto porcentaje de carbono (27,9-43,1%) (Rillig et al., 2003), llegando incluso a representar hasta un 52% del carbono total en suelos orgánicos (Schindler et al., 2007).

Como se mencionó anteriormente, el COT se relacionó positivamente con la CIC y la mayor CIC coincidió con el mayor diámetro medio ponderado de agregados cuando se adicionó 1000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita, por lo tanto, los incrementos en la CIC estarían relacionados con agentes de estabilización microbianos (GT) que aumentan la estabilidad de agregados.

## **2.5 PROPIEDADES HIDROFÍSICAS RELACIONADAS CON LA ARQUITECTURA EDÁFICA Y SU ESTABILIDAD**

### **2.5.1 Materiales y métodos**

#### *2.5.1.1 Determinaciones realizadas*

- Infiltración básica (Ib): infiltrómetro de disco (Perroux & White, 1988). En el Hapludol se determinó en los tratamientos CY, y en el Argiudol y Paleudol en los tratamientos TCY, D1CY y D4CY. Se colocaron dos infiltrómetros por parcela, es decir 6 por tratamiento.
- Retención hídrica (RH): determinación con olla de Richards a 30 kPa en los tres sitios bajo estudio, en el Hapludol también se determinó a 50 kPa; 1013 kPa y 1520 kPa (Richards, 1948)
  - Densidad aparente (Dap): método del cilindro, se evaluó 0 a 0,10 m de profundidad (Blake & Hartge, 1986, en SAMLA-SAGPyA, 2004). Las muestras se llevaron a estufa 105° hasta peso contante. En los tres suelos bajo estudio el horizonte superficial no sufre contracciones ni expansiones evidentes. Si bien, se aconseja que la Dap se tome a

capacidad de campo, en estos suelos el contenido de humedad al cual se toman las muestras no tendría impacto sobre la dicha variable.

- Resistencia a la penetración a profundidades de 0-10 cm, 10-20cm, 20-30cm y 30-40 cm (RP 0-10cm, RP 10-20cm, RP 20-30cm, RP 30-40cm): con penetrómetro de cono según Norma ASAE S.313.3 (ASAE 1993) cada 0,05 m de profundidad y hasta una profundidad máxima de 0,40 m. En cada suelo se midió el contenido de humedad (hasta los 40 cm en el Hapludol y de 0-10 cm en el Argiudol y Paleudol) en los tratamientos y no presentaron diferencia significativa. Considerando que cada suelo tenía las mismas características y cubierta vegetal en todo el ensayo, y solo diferían en las dosis de enmiendas, se consideró que la humedad en toda la profundidad no era estadísticamente significativa.
- Estabilidad estructural (DMP): método de Le Bissonnais et al. (1996) que discrimina entre diferentes mecanismos de desagregación a partir de tres pre-tratamientos. El mecanismo de estallido gracias a una humectación rápida (HR), la desagregación mecánica (DM) que evalúa la cohesión del agregado sin el estallido y la humectación lenta (HL) que evalúa la microfisuración debido a la expansión diferencial de las arcillas.
- Resistencia a la compactación: ensayo Proctor (ASTM, 1992) evaluando aumento de la densidad aparente ante diferentes contenidos hídricos obtenidos por humedecimiento a través de la pulverización de agua de manera de obtener 8 estados hídricos. 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  $593,7 \text{ kJ m}^{-3}$ . Se determinó la evolución de la densidad aparente ante distintos contenidos hídricos, estableciendo el contenido hídrico (CH) correspondiente a la compactación máxima ( $D_{\text{maxProctor}}$ ), y la compactación máxima relativa ( $C_{\text{maxrel}}$ ) de los tratamientos de encalado respecto del testigo. La  $D_{\text{max Proctor}}$  se obtuvo por el modelo de los mínimos cuadrados a partir de la ecuación polinómica de cada tratamiento. La  $C_{\text{maxrel}}$  se obtuvo a partir del cociente de la  $D_{\text{ap}}/D_{\text{maxProctor}}$ . Esta determinación se realizó en el Argiudol y Paleudol. En el ensayo Proctor no fue posible comparar las funciones estadísticamente. Se recolectaron 15 kg de suelo por ensayo y por tratamiento (la muestra se formó a partir de la extracción de 5 kg por bloque de cada tratamiento) y no fue posible la extracción de esa cantidad por bloque para realizar las repeticiones. El ensayo se incluyó para obtener una aproximación ilustrativa y descriptiva de la condición general para un análisis futuro, más que un resultado analítico.
- Limite líquido (LL): Método de Casagrande (ASTM, 1975)



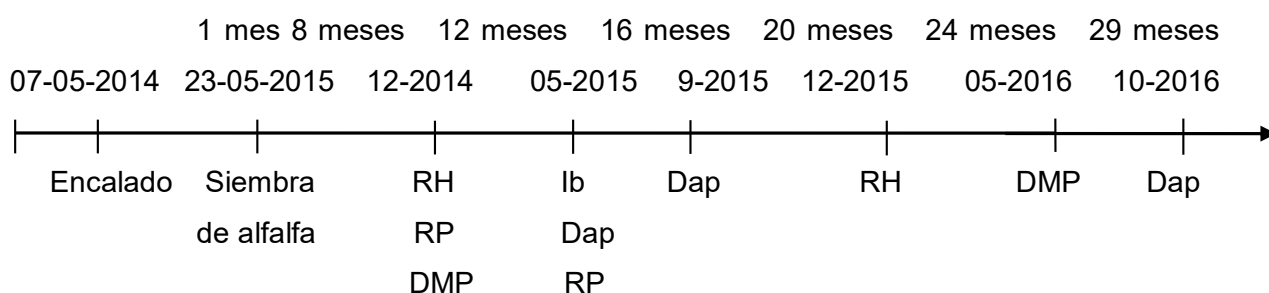
- Contenido de humedad (p/p): extracción de muestras de humedad en conjunto con mediciones de resistencia a la penetración. Se pesó en húmedo y secó en estufa a 100°C hasta peso constante.

### 2.5.1.2 Muestreo de suelos

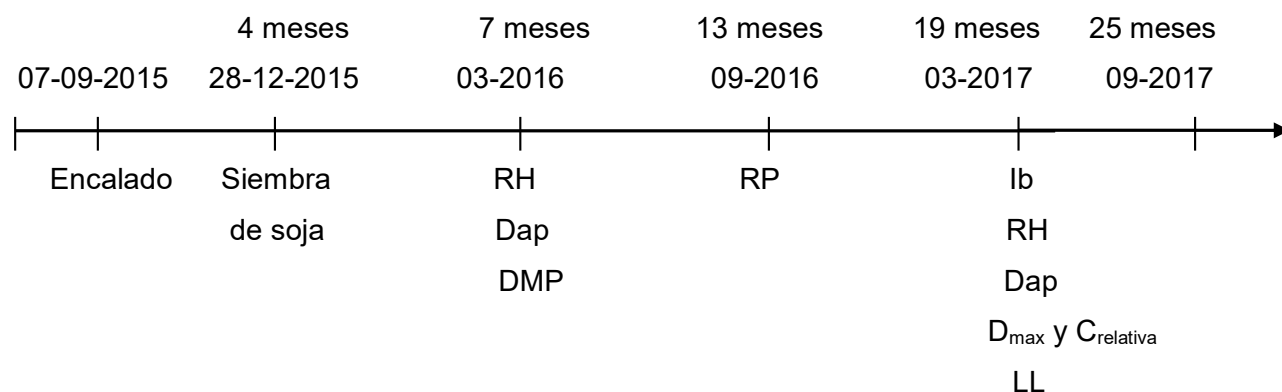
En cada sitio de ensayo y en distintos momentos posteriores al encalado, se realizaron mediciones a campo y recolectaron 15 sub-muestras por parcela de cada tratamiento de 0-10 cm de profundidad:

Las muestras fueron tomadas posteriormente al encalado y se determinó:

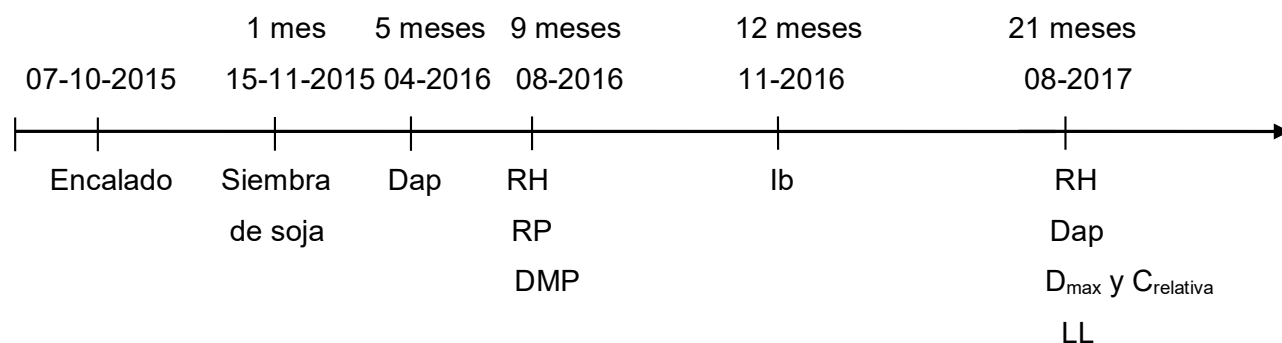
#### *Hapludol*



#### *Argiudol*



#### *Paleudol*

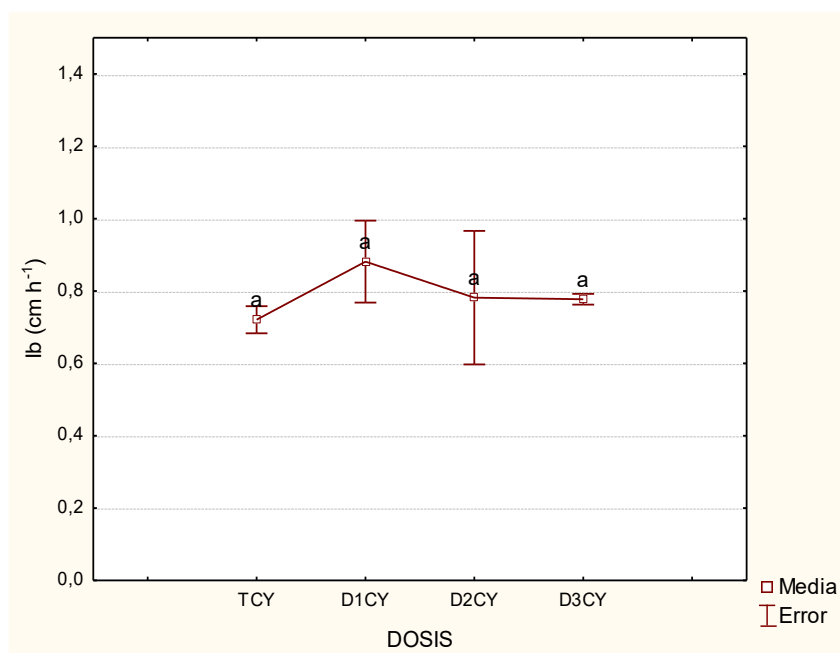


## 2.5.2 Resultados

### 2.5.2.1 Hapludol

La lb presentó heterogeneidad de varianzas para dosis, la RH a 30 kPa y 50 kPa para la interacción dosis-yeso, la Dap para la interacción dosis-yeso-meses, RP a los 8 meses 0-10 cm y 10-20 cm de profundidad para la interacción dosis-yeso y la RP a los 12 meses 10-20 cm y 20-30 cm de profundidad para el factor dosis. La heterogeneidad de la varianza en estos casos no pudo ser corregida a partir de transformaciones, por lo tanto, se procedió a analizar estas variables mediante el análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis. Las variables RH 1013 kPa, RP evaluada a los 8 meses 30-40 cm, y DMP evaluado a los 8 y 24 meses también presentaron heterogeneidad de varianzas, pero fue corregida mediante transformaciones.

La lb evaluada a los 12 meses posteriores al encalado en los tratamientos CY, a partir del análisis no paramétrico, no presentó diferencia entre las distintas dosis de dolomita ( $p < 0,05$ ) (Figura 2.5.1).

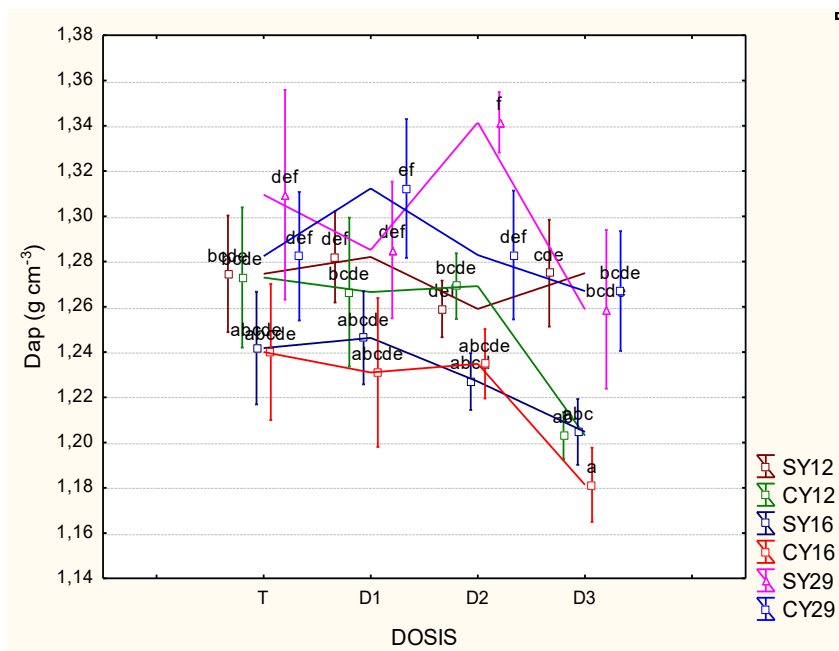


**Figura 2.5.1** Infiltración básica (lb) según tratamiento aplicado: TCY=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1CY=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2CY=2000 kg ha<sup>-1</sup> y D3CY=3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso a los 12 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar.

La RH evaluada a los 8 meses posteriores al encalado a 30; 50; 1013 y 1520 kPa, no presentó diferencias ante las distintas dosis y la adición de yeso ( $p < 0,05$ ). Se observó que las 4 presiones evaluadas presentaron el mismo comportamiento positivo para D1 y D3, y para los tratamientos SY respecto a los tratamientos CY.

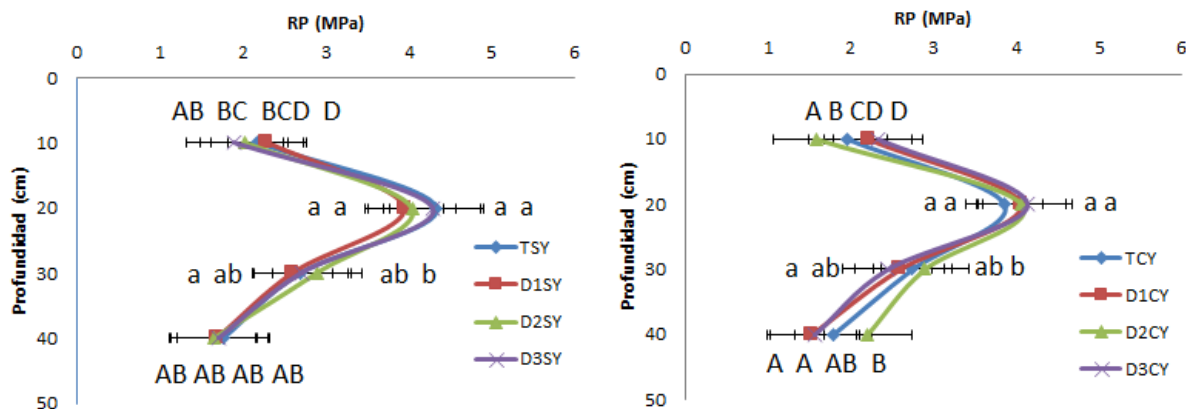
La Dap evaluada a los 12, 16 y 29 meses, a partir del análisis no paramétrico, presentó diferencia significativa para la interacción dosis-yeso-meses ( $p < 0,05$ ). En ninguno de los tres

momentos de muestreo presentó efectos de las enmiendas respecto a TSY, aunque D3CY mostró indicios de que dosis mayores con adición de yeso podrían disminuir la Dap en este suelo. La dosis D3 se encontró relacionada a la adición de yeso y momento de muestreo, siendo menor a los 16 meses CY respecto a los 12 meses SY y a los 19 CY y SY (Figura 2.5.2).



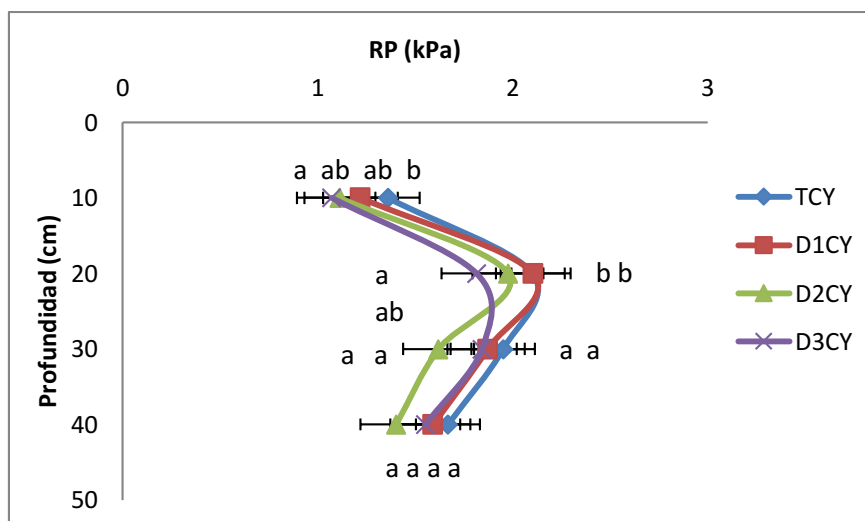
**Figura 2.5.2** Densidad aparente 0-10 cm ( $Dap \text{ g cm}^{-3}$ ) según tratamiento aplicado: T=0  $\text{kg ha}^{-1}$ , D1=1000  $\text{kg ha}^{-1}$ , D2=2000  $\text{kg ha}^{-1}$  y D3=3000  $\text{kg ha}^{-1}$  de dolomita sin yeso (SY) y con adición de 200  $\text{kg ha}^{-1}$  de yeso (CY) a los 12, 16 y 29 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre para la interacción dosis-yeso-meses. Las barras representan el error estándar.

La RP evaluada 8 meses posteriores al encalado, a los 0-10 cm de profundidad a partir del análisis no paramétrico, presentó interacción entre dosis y yeso ( $p < 0,05$ ). El tratamiento D2CY presentó menor RP que TSY. A los 10-20 cm de profundidad, a partir del análisis no paramétrico, no se observaron diferencias ante los tratamientos ( $p < 0,05$ ) y a los 20-30 cm D3 fue menor que D2 pero no se diferenció de T ( $p < 0,05$ ). La RP a los 30-40 cm de profundidad, evaluada a partir de los datos transformados con la función logaritmo decimal presentó interacción dosis-yeso sin diferenciarse de TSY con la adición de dolomita y yeso ( $p < 0,05$ ) (Figura 2.5.3). Hasta los 40 cm no se hallaron diferencias significativas en el contenido de humedad para cada profundidad analizada dando como promedio de 0-10 cm 16 %, de 10-20 cm 15,4 %, de 20-30 cm 19 % y de 30-40 cm 21%. En superficie el CH se encontró próximo a capacidad de campo, 16 %.



**Figura 2.5.3** Resistencia a la penetración (RP 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm y 30-40 cm, MPa) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita sin yeso (SY) (figura izquierda) y con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) (figura derecha) a los 8 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre dosis.

La RP evaluada a los 12 meses posteriores al encalado en los tratamientos CY, a los 0-10 cm de profundidad fue menor en D3CY que en TCY y a los 10-20 cm de profundidad, a partir del análisis no paramétrico fue menor en D3CY respecto a TCY y D1CY ( $p < 0,05$ ). La RP a los 20-30 cm de profundidad y a los 30-40 cm no presentó diferencia ( $p < 0,05$ ) (Figura 2.5.4).



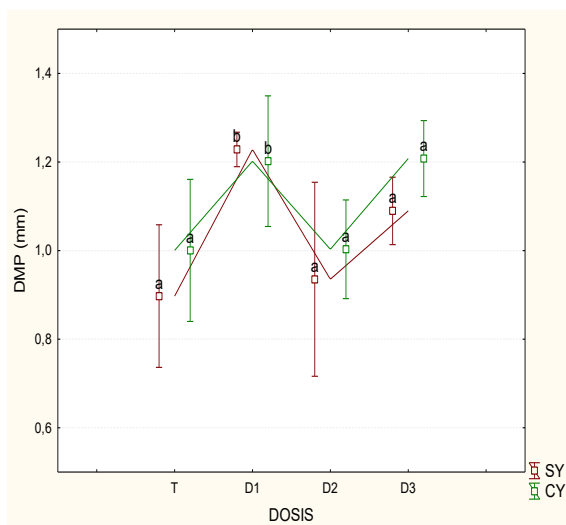
**Figura 2.5.4** Resistencia a la penetración (RP 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm y 30-40 cm, MPa) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) evaluada a los 12 meses posteriores al encalado en el Hapludol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar.

El DMP, evaluado sobre todos los tratamientos a los 8 meses posteriores al encalado con el pre-tratamiento HR, no presentó respuesta significativa ante el agregado de yeso ( $p < 0,05$ ). Se observó diferencia ( $p < 0,07$ ) al incremento del DMP en D1 respecto a T (Figura 2.5.5.a).

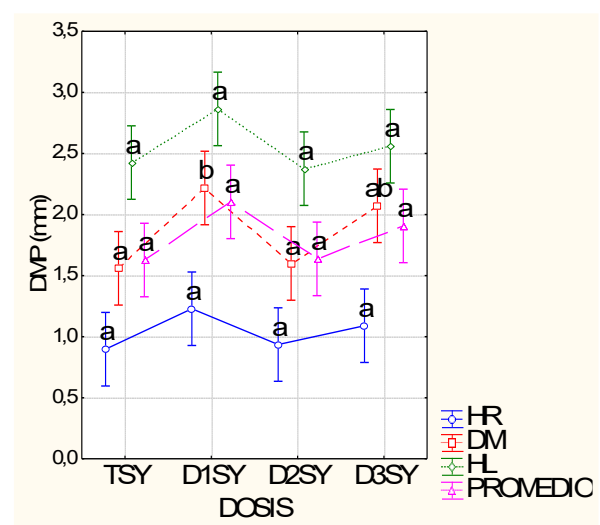
Sobre los tratamientos SY, el DMP determinado a partir de HR y HL no presentó diferencia con las distintas dosis, mientras que el DMP determinado a partir de DM presentó incremento con D1 respecto a T y D2 ( $p < 0,05$ ). Finalmente, las distintas dosis no generaron diferencias en el DMP obtenido a partir del promedio de cada pre-tratamiento (Figura 2.5.5.b).

El DMP evaluado a los 24 meses posteriores al encalado no presentó efectos ante las dosis de dolomita, pero si presentó disminución con la adición de yeso en todos los tratamientos ( $p < 0,05$ ).

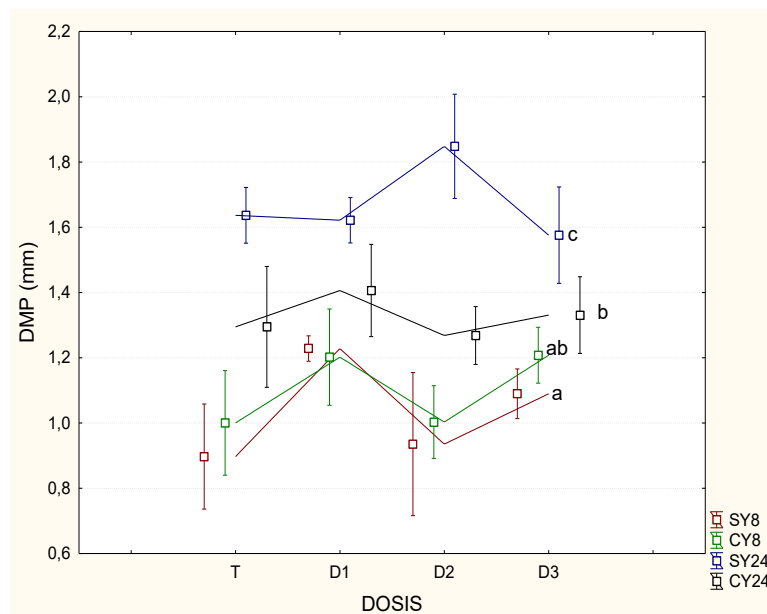
El análisis del DMP en el tiempo, a partir del análisis de los datos transformados con la función logaritmo decimal, mostró interacción yeso-meses y se observó que los tratamientos SY a los 8 meses presentaron menor DMP que a los 24 meses ( $p < 0,05$ ) (Figura 2.5.5.c).



a



b



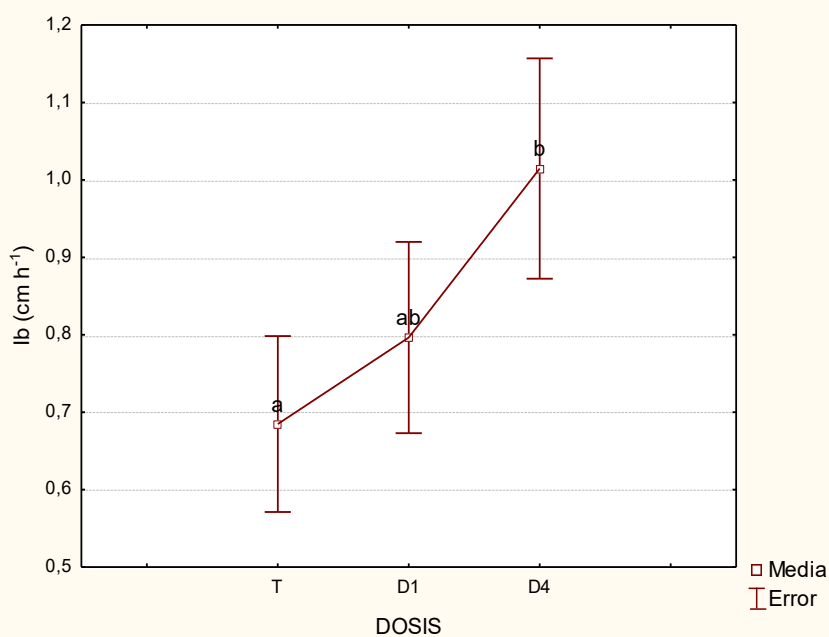
c

**Figura 2.5.5** Diámetro medio ponderado (DMP, mm) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita **a-** sin yeso (SY) y con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) con pre-tratamiento humectación rápida (HR) evaluada a los 8 meses posteriores al encalado. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar. **b-** con pre-tratamiento HR, degradación mecánica (DM), humectación lenta (HL) y promedio en los tratamientos sin yeso (SY) evaluado a los 8 meses posteriores al encalado. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis para un mismo pre-tratamiento **c-** evaluado a los 8 y 24 meses posteriores al encalado con pre-tratamiento HR. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción yeso-meses.

### 2.5.2.2 Argiudol

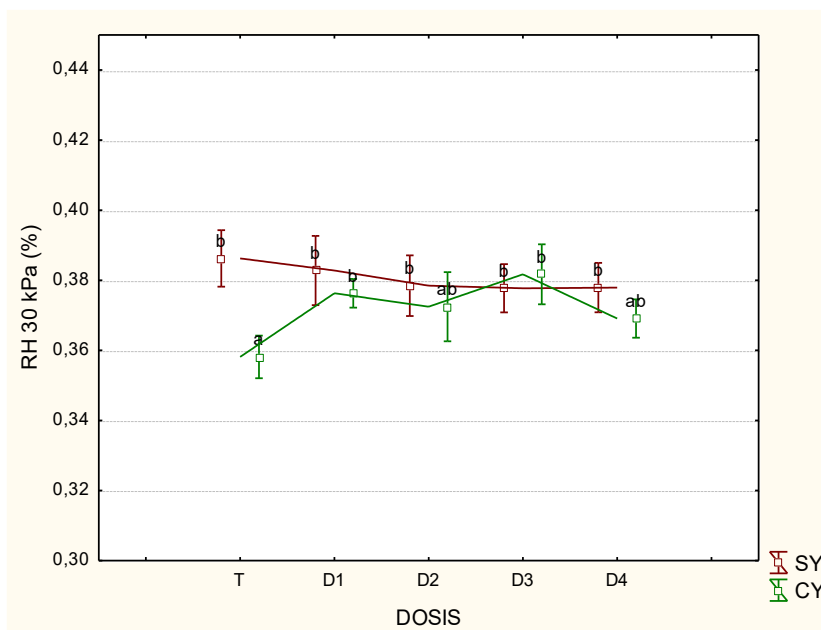
La Dap evaluada a los 7 meses, la RP evaluada a los 10-20cm y 30-40cm de profundidad presentaron heterogeneidad de varianzas para el factor dosis, mientras que el DMP para la interacción dosis-yeso. La heterogeneidad en ningún caso pudo ser corregida a partir de las transformaciones, por lo que se realizó un análisis no paramétrico Kruskal-Wallis.

La Ib evaluada en los tratamientos TCY, D1CY y D4CY a los 19 meses posteriores al encalado presentó incremento de 49, 3% en D4 CY respecto a T CY ( $p < 0,05$ ) (Figura 2.5.6).



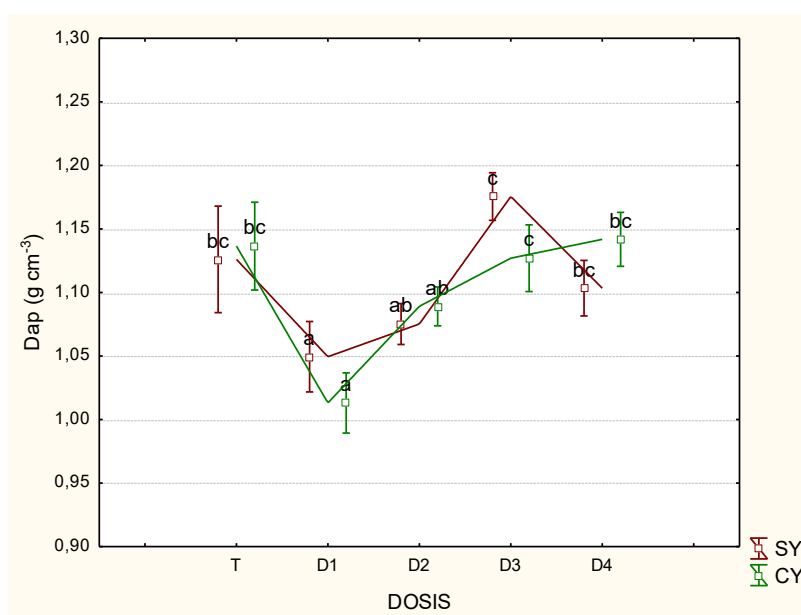
**Figura 2.5.6.** Infiltración básica (Ib, cm h<sup>-1</sup>) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha<sup>-1</sup> con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso evaluada a los 19 meses posteriores al encalado en el Argiudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar.

La RH a 30 kPa evaluada a los 7, 19 y 25 meses posteriores al encalado presentó interacción entre dosis-yeso y yeso-meses ( $p < 0,05$ ). El tratamiento TSY y todas las dosis SY presentaron mayor RH que TCY (Figura 2.5.7). A los 19 meses el efecto del yeso se extendió a todas las dosis y se observó mayor RH en los tratamientos SY respecto a los tratamientos CY.

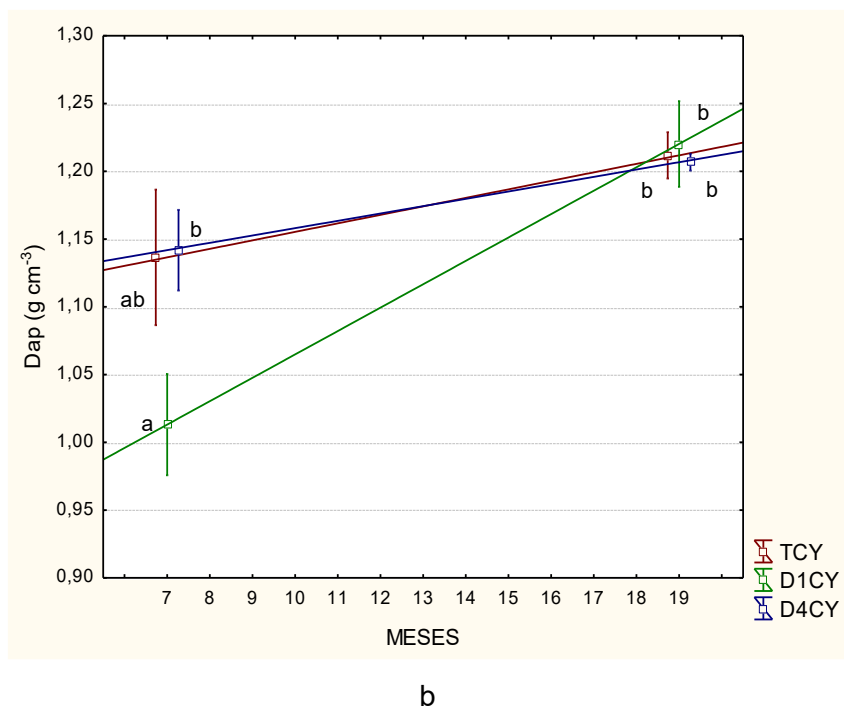


**Figura 2.5.7** Retención hídrica a 30 kPa (RH 30 kPa) según tratamiento aplicado T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup>, D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha<sup>-1</sup> sin yeso (SY) y con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) evaluada a los 7, 19 y 26 meses posteriores al encalado en el Argiudol. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-yeso. Las barras representan el error estándar.

La Dap evaluada a los 7 meses posteriores al encalado, a partir del análisis no paramétrico, presentó disminución con D1 respecto a T, D3 y D4, por otra parte, D2 disminuyó respecto a D3 ( $p < 0,05$ ). La adición de yeso no generó modificaciones sobre la Dap ( $p < 0,05$ ) (Figura 2.5.8.a). La Dap evaluada en los tratamientos TCY, D1CY y D4CY a los 7 y 20 meses posteriores al encalado presentó interacción dosis-tiempo ( $p < 0,05$ ). La menor Dap se observó en D1CY a los 7 meses respecto a los 20 meses, pero ninguna de las dosis fueron diferentes a TCY (Figura 2.5.8.b).

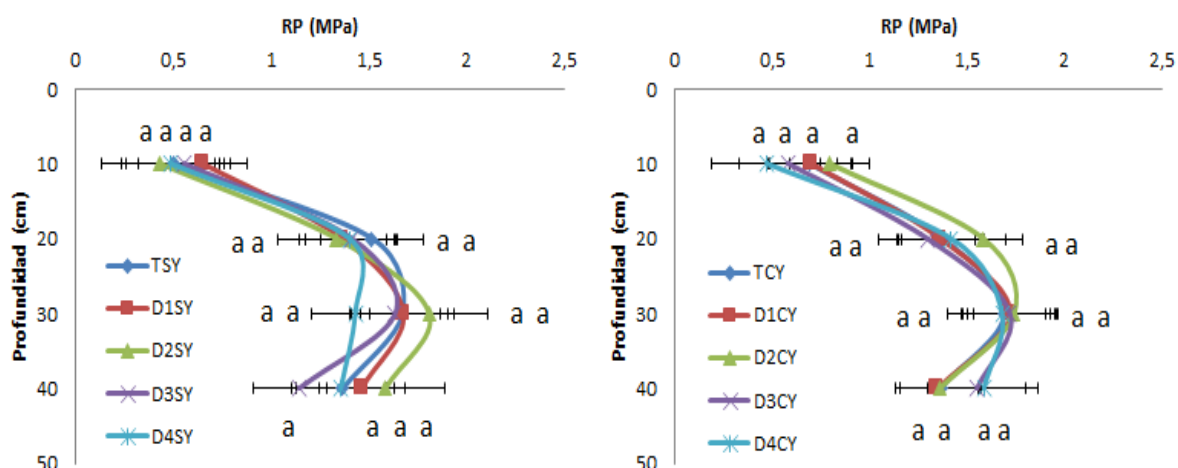


a



**Figura 2.5.8** Densidad aparente ( $Dap$ ,  $g\ cm^{-3}$ ) según tratamiento aplicado: **a**- $T=0\ kg\ ha^{-1}$ ,  $D1=1000\ kg\ ha^{-1}$ ,  $D2=2000\ kg\ ha^{-1}$ ,  $D3=3000\ kg\ ha^{-1}$  y  $D4=4000\ kg\ ha^{-1}$  sin yeso y con adición de  $200\ kg\ ha^{-1}$  de yeso evaluada a los 7 meses posteriores al encalado en el Argiudol. **b**-  $TCY=0\ kg\ ha^{-1}$ ,  $D1CY=1000\ kg\ ha^{-1}$  y  $D4CY=4000\ kg\ ha^{-1}$  con adición de  $200\ kg\ ha^{-1}$  de yeso evaluada a los 7 y 19 meses posteriores al encalado. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-tiempo. En a y b las barras representan el error estándar.

La RP evaluada a los 12 meses posteriores al encalado no presentó diferencias entre dosis y en el factor yeso en ninguna de las profundidades evaluadas ( $p<0,05$ ). La RP a los 10-20 cm y 30-40 cm de profundidad se analizó a partir del análisis no paramétrico (Figura 2.5.9). El contenido de humedad no presentó diferencias significativas dando como promedio de 0-20 cm 27% y de 20-40 cm 26%.

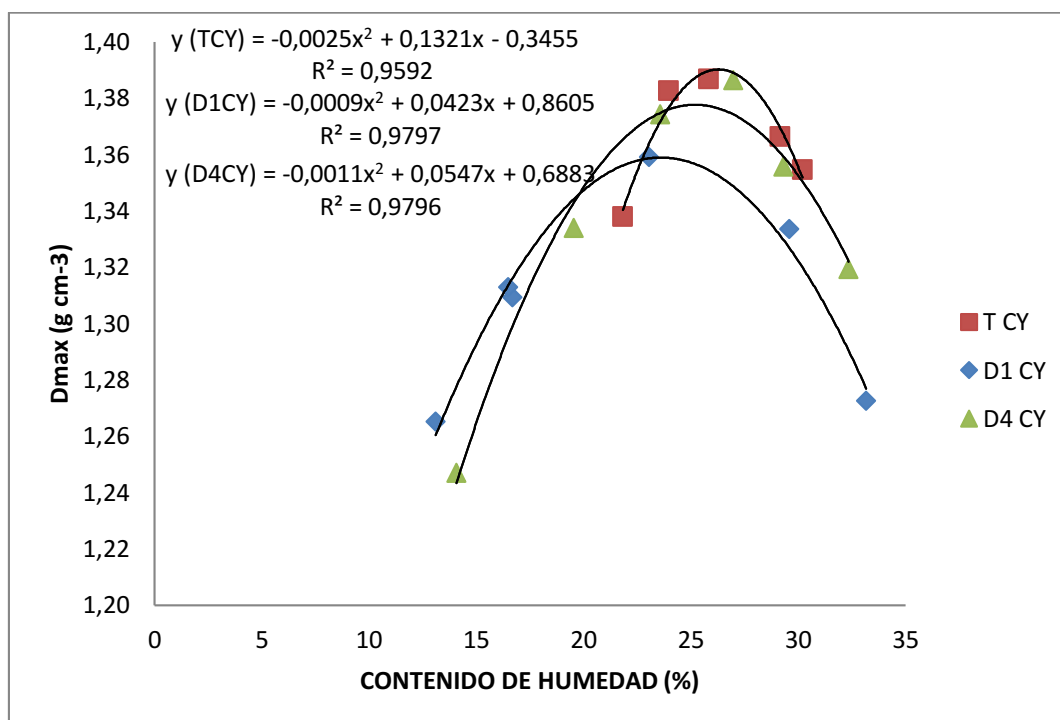


**Figura 2.5.9.** Resistencia a la penetración (RP 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm y 30-40 cm, MPa) según tratamiento aplicado:  $T=0\ kg\ ha^{-1}$ ,  $D1=1000\ kg\ ha^{-1}$ ,  $D2=2000\ kg\ ha^{-1}$ ,  $D3=3000\ kg\ ha^{-1}$  y  $D4=4000\ kg\ ha^{-1}$  de dolomita sin yeso (SY) (figura izquierda) y con adición de  $200\ kg\ ha^{-1}$  de yeso (CY) (figura derecha) evaluada a los 12 meses posteriores al encalado en el Argiudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras horizontales representan el error estándar.



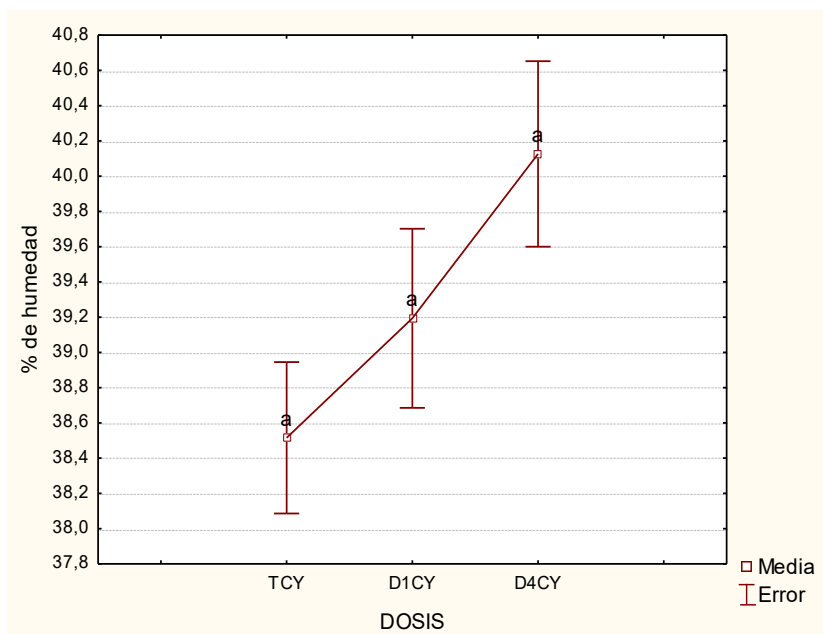
El DMP evaluado a partir del pre-tratamiento HR a los 7 meses posteriores al encalado, mediante el análisis no paramétrico no presentó respuesta con la adición de enmiendas ( $p < 0,05$ ).

La evaluación Proctor mostró que a los 7 meses posteriores al encalado el tratamiento D1 CY fue el que presentó menor valor de humedad crítica y  $D_{max}$  Proctor a dicha humedad, mientras que T CY fue el que mayor humedad crítica y  $D_{max}$  Proctor presentó (Figura 2.5.10). La  $C_{max,rel}$  no presentó diferencias entre los tratamientos analizados ( $p < 0,05$ ).



**Figura 2.5.10** Densidad máxima en función de la humedad ( $D_{max}$ , g cm<sup>-3</sup>) evaluada a los 7 meses posteriores al encalado según tratamiento aplicado. T CY=0 kg ha<sup>-1</sup>; D1CY=1000 kg ha<sup>-1</sup> y D4CY=4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso en el Argiudol. Se incluyen las funciones de los tres tratamientos.

El LL evaluado en los tratamientos T CY, D1CY y D4CY no presentó diferencias significativas con las diferentes dosis de dolomita, aunque se observó tendencia al incremento con las dosis crecientes de enmienda ( $p < 0,11$ ) (Figura 2.5.11).

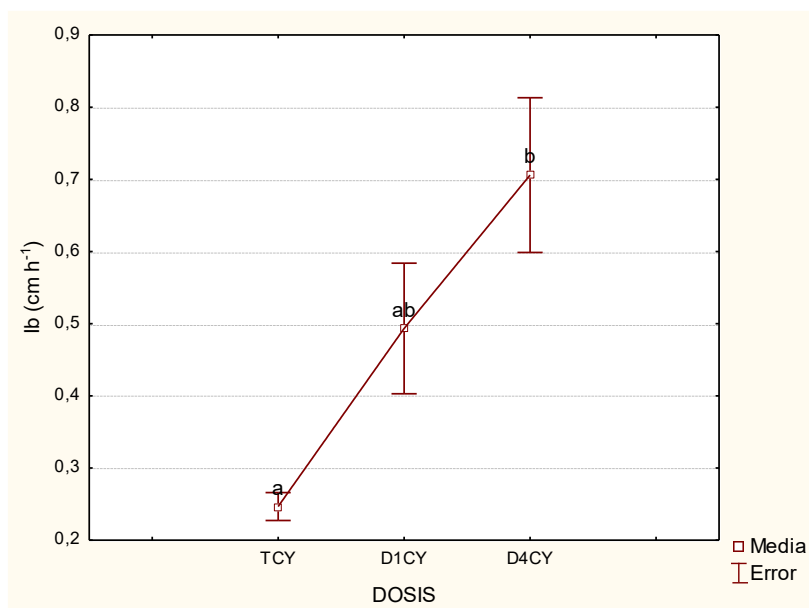


**Figura 2.5.11** Límite líquido (% de humedad) evaluado a los 7 meses posteriores al encalado según tratamiento aplicado TCY=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1CY=1000 kg ha<sup>-1</sup> y D4CY=4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso en el Argiudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis de dolomita. Las barras representan el error estándar.

### 2.5.2.3 Paleudol

La RP a los 30-40 cm de profundidad presentó heterogeneidad de varianzas para dosis y el DMP para la interacción dosis-yeso. Debido a que a partir de las transformaciones la varianza no pudo ser corregida se realizó el análisis no paramétrico para dichas variables.

La lb evaluada a los 12 meses posteriores al encalado se incrementó, 0,45 cm h<sup>-1</sup>, más del doble, en D4CY respecto a TCY ( $p < 0,05$ ) (Figura 2.5.12).

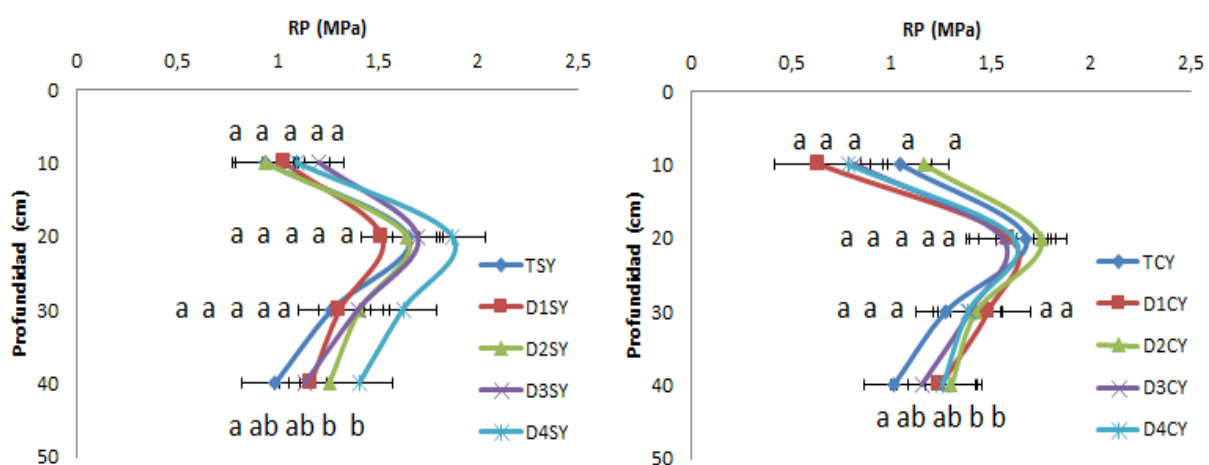


**Figura 2.5.12** Infiltración básica (lb, cm h<sup>-1</sup>) según tratamiento aplicado: TCY=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1CY=1000 kg ha<sup>-1</sup> y D4CY=4000 kg ha<sup>-1</sup> con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso evaluada a los 12 meses posteriores al encalado en el Paleudol. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar.

La RH 0,3 evaluada a los 9 y 21 meses no presentó diferencias entre los tratamientos ( $p < 0,05$ ).

La Dap evaluada a los 5 y 21 meses posteriores al encalado no presentó diferencia con las distintas dosis de dolomita y adición de yeso ( $p < 0,05$ ) y fue mayor a los 5 meses respecto a los 21 meses ( $p < 0,05$ ) en todos los tratamientos.

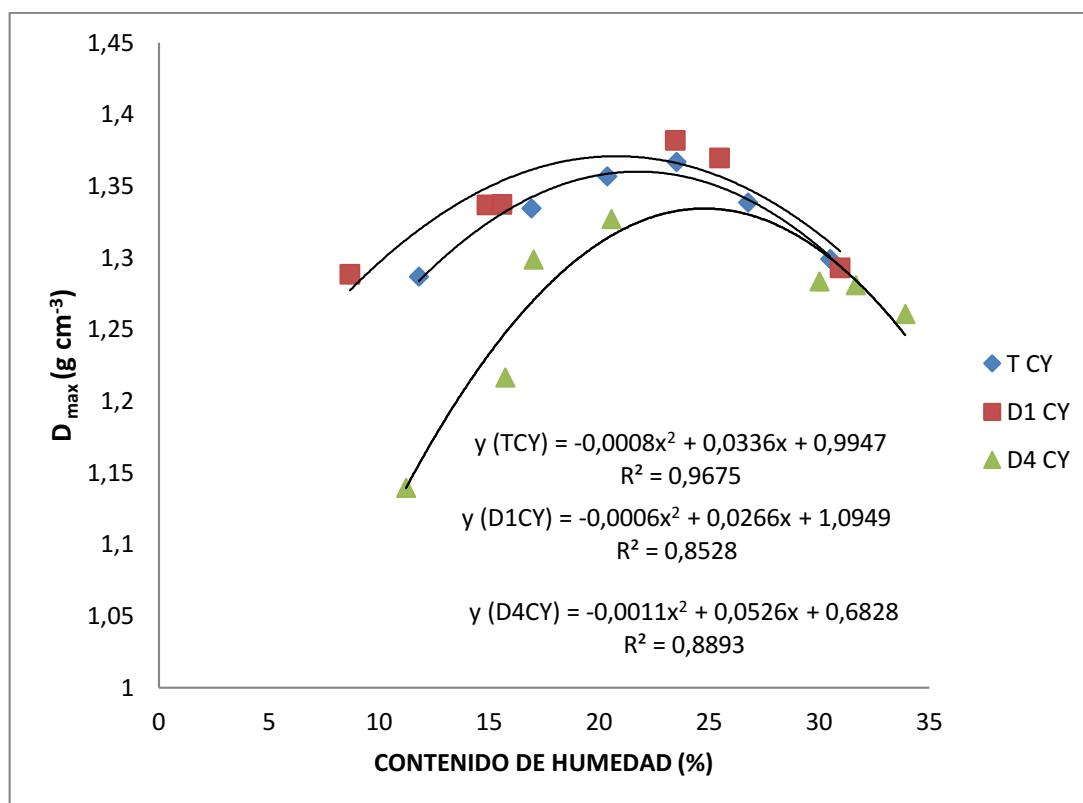
La RP evaluada a los 10 meses posteriores al encalado no presentó respuesta a los tratamientos hasta los 30 cm de profundidad ( $p < 0,05$ ). De 30-40 cm de profundidad, a partir del análisis no paramétrico, T presentó menor RP que D2 y D4. La adición de yeso no generó diferencia sobre la RP ( $p < 0,05$ ) (Figura 2.5.13). El contenido de humedad no presentó diferencias significativas dando como promedio de 0-20 cm 27% y de 20-40 cm 28%.



**Figura 2.5.13** Resistencia a la penetración (RP 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm y 30-40 cm, Pa) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup>, D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita sin yeso (SY) (figura izquierda) y con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY) (figura derecha) evaluada a los 10 meses posteriores al encalado. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis.

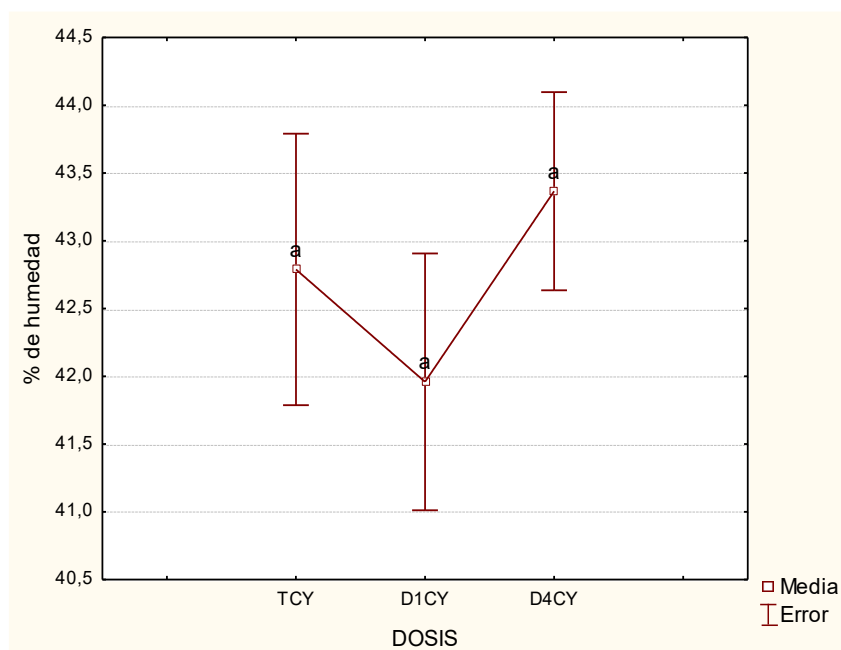
El DMP evaluado a los 9 meses posteriores al encalado a partir del pre-tratamiento HR, mediante el análisis no paramétrico, no presentó diferencias ante la adición de diferentes dosis de dolomita ( $p < 0,05$ ). La adición de yeso no generó cambios significativos en el DMP.

En el análisis Proctor la dosis que menor  $D_{max}$  Proctor presentó fue D4CY y la mayor D1CY. El tratamiento en el que se alcanzó la  $D_{max}$  Proctor con el menor CH fue TCY y el que mayor CH admitió fue D4CY (Figura 2.5.15). La  $C_{rel}$  no presentó diferencia entre los tratamientos ( $p < 0,05$ ).



**Figura 2.5.14** Densidad máxima en función de la humedad ( $D_{max}$ , g cm<sup>-3</sup>) evaluada a los 7 meses posteriores al encalado según tratamiento aplicado. TCY=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1CY=1000 kg ha<sup>-1</sup> y D4CY=4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso en el Paleudol. Se incluyen las funciones en el gráfico.

El LL evaluado en los tratamientos TCY, D1CY y D4CY no presentó diferencias significativas para las diferentes dosis de dolomita ( $p < 0,05$ ) (Figura 2.5.16).



**Figura 2.5.15** Límite líquido (% de humedad) evaluado a los 7 meses posteriores al encalado según tratamiento aplicado TCY=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1CY=1000 kg ha<sup>-1</sup> y D4CY=4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita con 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso. Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis de dolomita.

### 2.5.2.4 Resumen de resultados sobre propiedades físicas

**Tabla 2.3** Resumen de resultados de los efectos de las enmiendas sobre propiedades físicas en los tres suelos bajo estudio. D=dolomita, Y=yeso, M=meses, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup>, D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita.

PROP.FÍSICAS	Hapludol	Argjudol	Paleudol
lb	=	D4↑	D4↑
RH	=	DxY YxM Y↓	=
Dap	DxYxM D3↓	D1↓	M↓
RP 0-10cm	DxY↓	D3↓	=
10-20cm	=	D3↓	=
20-30cm	D2↓	=	=
30-40cm	=	=	D2 y D4↑
DMP	D1↑	=	=
D <sub>max</sub>		D1↓	D4↓
D <sub>max,rel</sub>		=	=
LL		=	=

### 2.5.3 Discusión propiedades hidrofísicas

Los puentes de Ca<sup>+2</sup> tienen impactos importantes en la formación y estabilidad de los agregados con consecuencias sobre la conductividad hidráulica (Wuddivira & Camps-Roach, 2007), lo que explicaría el incremento de la lb con la mayor dosis de dolomita en el Argjudol y Paleudol. El CaCO<sub>3</sub> posee un efecto directo sobre la velocidad de infiltración que aumenta notablemente cuando es adicionado al suelo al cabo de un tiempo de disolución (De Juan Valero y Fabeiro Cortéz, 2003). Benavidez (1971) comparó la aplicación de diferentes sales de Ca<sup>+2</sup> y observó que la disminución de la infiltración en los tratamientos no encalados se debía al hinchamiento de los coloides asociándose a un proceso de dispersión, mientras que el CaCO<sub>3</sub> actuaba como floculante impidiendo dicho proceso e incrementando la macroporosidad eficaz. En el Hapludol, la ausencia de efecto con la enmienda, podría deberse a que la resistencia a la penetración en superficie al momento de medir infiltración era de 2 MPa, conocida como limitante para el crecimiento vegetal, y los tratamientos no habrían sido suficiente para generar efectos en estas condiciones.

La RH en el Hapludol, si bien no presentó diferencia con las enmiendas se observó en todas las presiones medidas el mismo comportamiento, incremento de RH con adición de 1000 kg ha<sup>-1</sup> y 3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita y disminución de RH con adición de yeso. En el Argjudol el yeso también produjo disminución de RH cuando se midió a 30 kPa. Xiwei Zhang et al. (2017) midieron retención hídrica sobre un suelo arcilloso al que le adicionaron 4% de cal hidratada según densidad seca y hallaron como resultado que el tratamiento con cal aumentó la estabilidad volumétrica, pero redujo la capacidad de retención de agua debido a una estructura con mayor cantidad de macroporos por efectos de floculación y enlace químico.

Las condiciones de dicho ensayo diferían de las de este trabajo, ya que adicionaron cal hidratada en dosis mayores al suelo pulverizado y posteriormente molido ( $<425 \mu\text{m}$ ). Sin embargo, estos resultados podrían explicar los efectos producidos por la adición de yeso sobre la RH.

El comportamiento repetido de la RH en el Hapludol cuando se adicionó  $1000 \text{ kg ha}^{-1}$  de dolomita coincide con el mayor valor de CIC (abordado en 2.3 Complejo de cambio y cationes) y la correlación positiva entre esta variable y el contenido de carbono podrían explicarlo (abordado en 2.4 Componentes orgánicos). La materia orgánica presenta densidad aparente muy baja y elevada porosidad, que influye en la capacidad de retención hídrica de los suelos (Hamblin, 1985; Guerif, 1989).

El comportamiento promisorio observado con la dosis más alta y adición de yeso en los tres momentos de muestreo en el Hapludol sobre la densidad aparente (Dap) se debería al ya mencionado efecto estructurante del  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  adicionados con las enmiendas. La Dap a los 12 meses se correlacionó negativamente con las glomalinas fácilmente extractables (GFE) (-0,62), coincidiendo con Pérez Brandan (2012) quien estudió el impacto de diferentes prácticas agrícolas sobre la diversidad microbiana del suelo y encontró que parámetros biológicos como las GFE se correlacionaron positiva y significativamente con el diámetro medio ponderado (DMP), mientras que la Dap lo hizo de manera inversa.

El incremento de la Dap con las mayores dosis de enmienda a los 7 meses en el Argiudol podría deberse a que en el corto plazo, como ya se mencionó, el encalado puede generar la dispersión de coloides de arcilla y la formación de costras superficiales. Sin embargo, a los 20 meses ya no se observa este comportamiento probablemente, debido a los beneficios sobre la estructura a largo plazo por adición de  $\text{Ca}^{2+}$  que mencionan Haynes et al. (1998). La disminución de la Dap en el Argiudol con adición de  $1000 \text{ kg ha}^{-1}$  de dolomita podría ser atribuida a que se solubilizó proporcionalmente más que las dosis de 2000 y  $3000 \text{ kg ha}^{-1}$  de dolomita generando menor dispersión de arcillas, aportando los beneficios estructurantes del  $\text{Ca}^{2+}$ . Chan et al. (2007), hallaron disminución de Dap evaluada hasta los 5 cm adicionando dosis crecientes de enmienda. A partir de estos resultados se observa que los mismos tratamientos al interactuar con las características edafo-climáticas de cada sitio generan efectos variables según el momento de muestreo.

La respuesta de la resistencia a la penetración (RP) superficial a las enmiendas en el Hapludol fue variable en el tiempo. A los 8 meses dosis medias con yeso disminuyeron la RP en superficie mientras que, a los 12 meses la mayor dosis con adición de yeso disminuyó la RP hasta los 20 cm. A los 12 meses 10-20cm y de 20-30 cm de profundidad la RP en los testigos fue mayor a 2 MPa considerada como limitante para el desarrollo de varios cultivos

(Imhoff, 2000). Probablemente, la mayor dosis de enmienda haya sido el factor que logró disminuir la RP por debajo de ese valor, 1,9 MPa y a 1,8 MPa para cada profundidad respectivamente.

La ausencia de diferencias con el encalado de la RP evaluada en el Argiudol a los 12 meses y en el Paleudol a los 10 meses coincide con lo hallado por Barbieri et al. (2015), quienes determinaron Dap y RP hasta 10 cm de profundidad con aplicaciones de diferentes dosis de dolomita (6,2; 5,3; 4,6 y 3,1 Mg ha<sup>-1</sup>), en 4 años consecutivos y no hallaron efectos significativos.

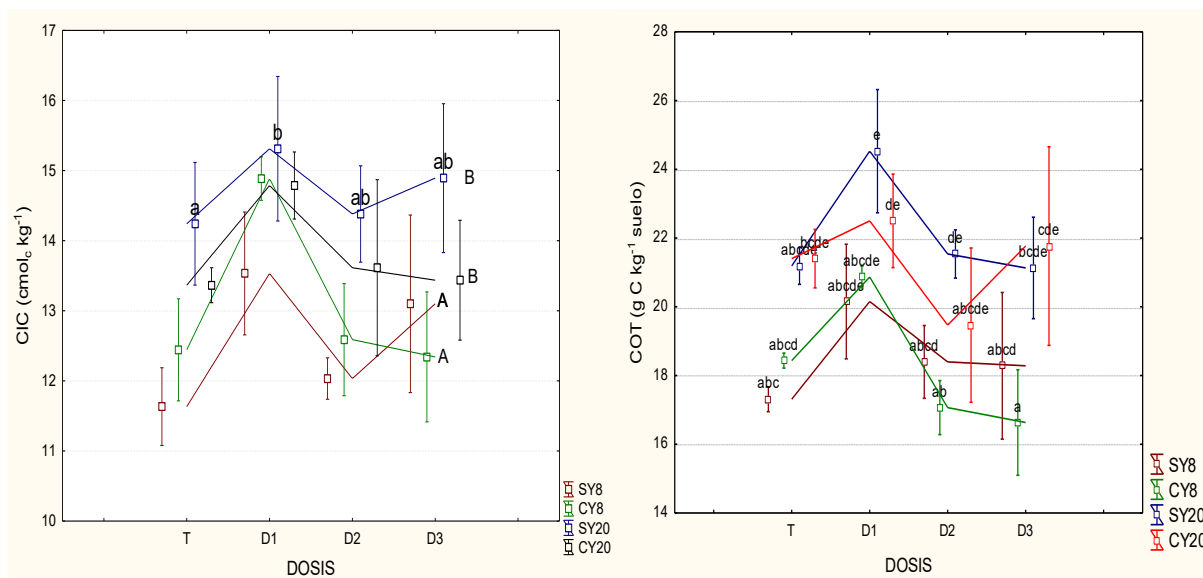
La finalidad del método de Le Bissonnais (1996) es describir el comportamiento físico del suelo básicamente cuando es sometido a la acción de la lluvia. Para ello, propone tres pretratamientos de evaluación: humectación rápida por inmersión en el agua, desagregación mecánica por agitación con re-humectación en el etanol y humectación lenta por capilaridad. Este método otorga especial importancia a la utilización del etanol que permite, por un lado, controlar la desagregación, y por otro, limita la reagregación de las partículas durante el secado. Al mismo tiempo, el alcohol controla la desagregación de la fracción fina del suelo y el efecto de hinchamiento diferencial, poniendo así en evidencia mecanismos que actúan en la cohesión de los coloides (Benavídez, 1971; Emerson & Greeland, 1990 y Grant & Dexter, 1990). El encalado al modificar la doble capa difusa por el cambio en el tipo y concentración de iones adsorbidos, además de la modificación que algunos de ellos provocan en la hidrofobicidad, incidiría en la cohesión. Si bien en esta tesis en el Hapludol el DMP se incrementó con la adición de enmiendas, esto ocurrió con la dosis de 1000 kg ha<sup>-1</sup> coincidiendo con el incremento de CIC. Por lo tanto, el DMP podría relacionarse (a partir de la correlación positiva de la CIC con el carbono orgánico y este último con las glomalinas totales), con el contenido de carbono y glomalinas totales, más que con los cambios en el tipo y concentración de cationes. Pese a haber separado los mecanismos (estallido, microfisuración lenta y cohesión sin estallido) y haber aplicado diferentes niveles de estrés a los agregados, todos los pretratamientos continuaron el mismo sentido frente al encalado.

Al igual a lo observado en el Hapludol en el primer muestreo, Vázquez et al. (2009), en un Argiudol típico de la Pradera Pampeana argentina analizaron la estabilidad de los agregados con la prueba de alcohol:agua y comprobaron que dosis bajas (1000 kg ha<sup>-1</sup>) favorecieron la estabilidad respecto al testigo. Sin embargo, dosis mayores (1500 kg ha<sup>-1</sup>) arrojaban valores similares al testigo. Por el contrario, Masola (2019) evaluó el DMP según el método Le Bissonnais sobre un Argiudol con adición de 1850 kg ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> luego de seis meses de aplicado y no halló efectos sobre dicha variable.

Tessier (2000) en suelos encalados con dosis de 20 Mg ha<sup>-1</sup> halló que la Dmax 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<sup>-1</sup> y en el Paleudol con 4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita.

## 2.6 CONSIDERACIONES SOBRE D1

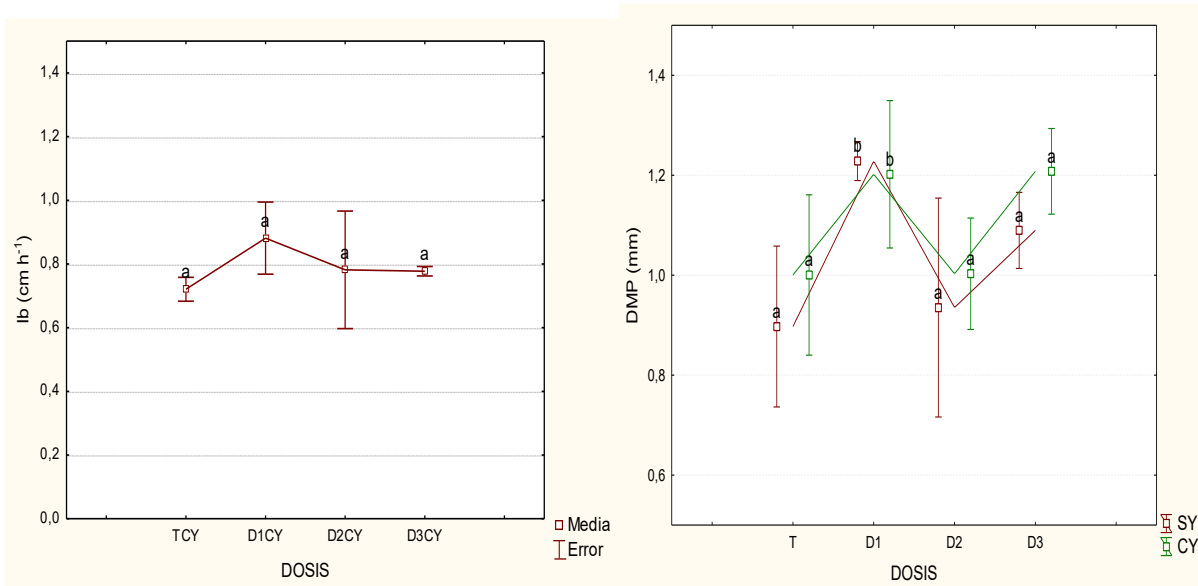
En el Hapludol numerosas variables mostraron un comportamiento llamativo y repetido con la adición de 1000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita, pese a ser una dosis intermedia a las ensayadas. Sin embargo, algunas no presentaron diferencias significativas. Las variables que tuvieron un comportamiento similar fueron CIC (Figura 2.5.17.a), COT (Figura 2.5.17.b), Ib (Figura 2.5.17.c), DMP (Figura 2.5.17d) y RH (evaluada a 30 kPa, 50 kPa, 1013kPa y 1520 kPa) (Figura 2.5.17 e1, e2, e3 y e4). El COT, ya se mencionó presentó relación positiva con la CIC y podría ser el responsable de las mejoras en las variables físicas mencionadas. Posiblemente, reiterar la dosis de 1000 kg ha<sup>-1</sup> periódicamente generaría mejores efectos que aplicar dosis mayores con menor frecuencia.



a

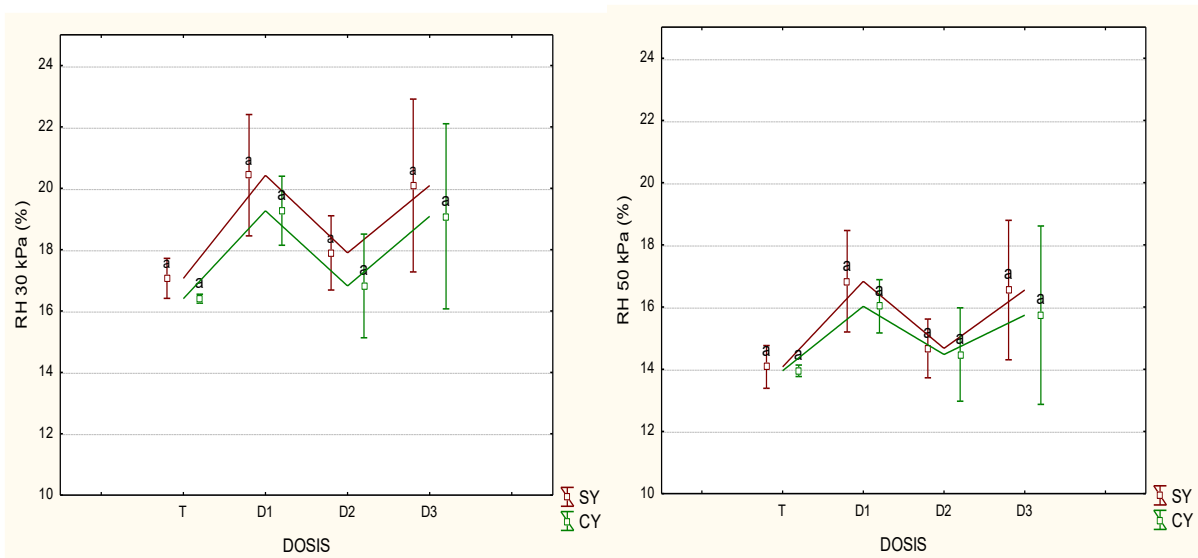
b





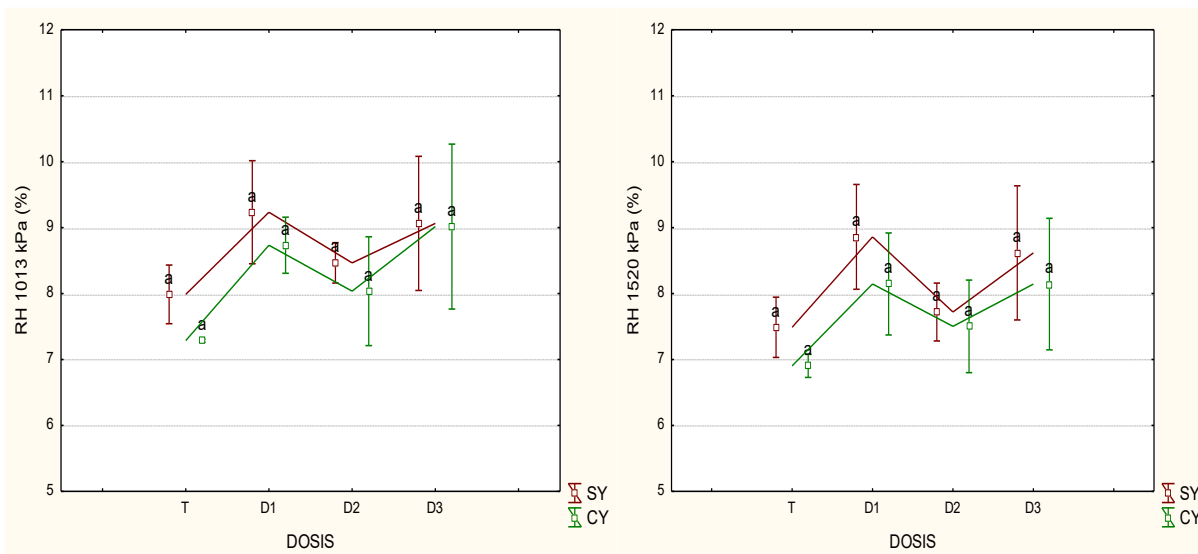
c

d



e1

e2



e3

e4

**Figura 2.5.16** **a**-Capacidad de intercambio catiónico (CIC,  $\text{cmolc kg}^{-1}$ ), **b**-Carbono orgánico total (COT,  $\text{g C kg}^{-1}$  suelo), **c**-Infiltración básica ( $\text{lb, cm h}^{-1}$ ) **d**- Diámetro medio ponderado (DMP, mm) **e**-Retención Hídrica (**e1**-30kPa, **e2**-50kPa, **e3**-1030kPa y **e4**-1520kPa) en el Hapludol según tratamiento aplicado: T=0  $\text{kg ha}^{-1}$ , D1=1000  $\text{kg ha}^{-1}$ , D2=2000  $\text{kg ha}^{-1}$  y D3=3000  $\text{kg ha}^{-1}$  de dolomita con 200  $\text{kg ha}^{-1}$  de yeso (CY) y sin yeso (SY) a los 8 y 20 meses posteriores al encalado. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas para el factor dosis y letras mayúsculas diferentes en CIC, donde también se evaluó a los 20 meses, indican diferencia significativa para el factor tiempo. Las barras representan el error estándar.

## 2.7 CONCLUSIÓN

La aplicación de bajas dosis de enmiendas cálcico-magnésicas y yeso al suelo en el Hapludol produjo mejoras en la estructura, coincidiendo con aumentos en la capacidad de intercambio catiónica y relacionándose esta última, con el contenido de carbono. Mayores dosis presentaron mayor contenido de bases intercambiables que disminuyeron la densidad aparente y resistencia a la penetración en superficie. La fracción más lábil del carbono, al disminuir con adición de dolomita y yeso, mostró el incremento de la mineralización por adición de enmiendas. En el Paluedol, al igual que en el Hapludol también se observó efecto de la enmienda sobre la capacidad de intercambio catiónica, la cual disminuyó con altas dosis de enmiendas y se relacionó con el contenido de carbono. La CIC, a partir de su relación positiva con el contenido de carbono, permitió identificar los efectos de las enmiendas sobre esta variable, ya que fue poco sensible a los cambios producidos por las enmiendas.

El aumento del contenido de  $\text{Ca}^{+2}$  con la adición de enmiendas produjo mejoras en la infiltración en el Paleudol y en el Argiudol, en este último también produjo disminución de la densidad aparente superficial.

El aumento de pH por unidad de enmienda adicionada fue similar en los tres suelos.

### **3 Análisis de la relación entre las modificaciones de las propiedades medidas y el rendimiento de cultivos leguminosos de interés regional.**

### 3.1 INTRODUCCIÓN ESPECÍFICA

La expansión de la frontera agrícola y ganadera en Argentina y la adopción de tecnología son los dos factores centrales que explican el aumento de productividad biológica y económica del sector rural (Navarrete et al. 2009) en las últimas cinco décadas. Históricamente, el productor ha tomado sus decisiones empresariales en base a una relación económica entre beneficios y costos, soslayando la relación entre el beneficio económico y el costo ambiental de tal decisión (Viglizzo & Jogaggy, 2010). Esto produjo una elevada extracción de nutrientes que no fueron repuestos en igual magnitud, generando procesos de degradación y agotamiento que ponen en peligro la sustentabilidad de los sistemas productivos (Cruzate & Casas, 2012).

En la Argentina en dos décadas hubo un aumento del área sembrada de 15400000 ha en 1988/89 a 32500000 ha en 2018 (Bolsa de Comercio Bs. As., 2018), mientras que la producción en el mismo periodo se ha triplicado.

El modelo de agricultura extractiva, se agrava en el caso de los nutrientes básicos ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y potasio ( $\text{K}^+$ )), debido a que su reposición es escasa o nula (Gelati & Vázquez, 2007; Cruzate & Casas, 2012) situación que tiene como una de sus consecuencias la acidificación de los suelos del ámbito templado.

El proceso de acidificación afecta a las leguminosas por presentar altos requerimientos de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  y una marcada sensibilidad a condiciones de acidez de los suelos. Algunos antecedentes señalan que la alfalfa tiene un rango de pH óptimo de 6,5-7,5, siendo críticos los inferiores a 6 (García & Vázquez, 2012; Vázquez & Pagani, 2015). Cultivos de cosecha de leguminosas como la soja, también se ven seriamente afectados (Mulyani, 2006; Vázquez et al., 2010, 2012).

El efecto del pH está muy relacionado con la nutrición del  $\text{Ca}^{+2}$ , pues existe un antagonismo entre los iones hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) y  $\text{Ca}^{+2}$ . En las leguminosas el nitrógeno (N) es provisto mayoritariamente desde la atmósfera a través de la simbiosis con *Sinorhizobium* (Ensifer) meliloti en el caso de la alfalfa (Botou, 2020) y *Bradyrhizobium japonicum*, en el caso de la soja (Mitran, 2018). Diferentes estudios indican que para lograr altas eficiencias en la fijación biológica de nitrógeno es necesario que el cultivo no tenga limitaciones nutricionales severas en una serie de nutrientes esenciales que participan en el crecimiento y desarrollo de estructuras radicales y nodulares (Almeida et al., 2000; Høgh-Jensen et al., 2002; Høgh-Jensen et al., 2003; Olivera et al., 2004; Schulze et al., 2006). La acidez del suelo afecta la persistencia de los rizobios, la nodulación y la eficiencia de fijación de  $\text{N}_2$  de algunas leguminosas (Graham & Vance, 2000).

El pH actúa también sobre la disponibilidad de molibdeno (Mo), siendo óptima a partir de pH 6,5 y se reduce 100 veces por cada unidad que desciende el pH en los suelos. En las bacterias simbióticas fijadoras de N<sub>2</sub>, el Mo es parte constituyente de la enzima nitrogenasa que cataliza la reducción de N<sub>2</sub> a amonio y en las leguminosas forma parte de la enzima nitrato reductasa, que reduce al nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) absorbido por las raíces a amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) para posteriormente incorporarse a los compuestos orgánicos. El aumento de disponibilidad de Mo en numerosas ocasiones se logra mitigando el efecto de la acidez (Guiddens & Perkins, 1960).

El Ca<sup>+2</sup> es un nutriente de naturaleza estructural, pues es componente de las paredes y membranas celulares, por lo cual su presencia es fundamental para la formación de nuevos tejidos. La carencia de este elemento reduce la tasa de crecimiento en las plantas, dado que es requerido para la elongación y la división celular (White & Broadley, 2003; Karley & White, 2009; Maathuis, 2009; Bonomelli y Ruiz, 2010; Hocking et al., 2016; Winkler & Knoche, 2019; Bonomelli et al. 2019). El Mg<sup>+2</sup> tiene un papel relevante en la producción de las plantas principalmente por ser un componente crítico de la clorofila.

Es por todo ello que resulta necesaria la corrección de la acidez del suelo mediante la aplicación de enmiendas para elevar el pH a niveles cercanos a la neutralidad (Whalen et al., 2000) y aportar Ca<sup>+2</sup> y Mg<sup>+2</sup>, nutrientes que como ya se mencionó, son de baja o escasa reposición.

Debido a que en la siembra directa la aplicación de productos correctores sólidos de naturaleza carbonatada constituye un problema, ya que no existe la posibilidad de la incorporación de los mismos a través de labranzas disminuyendo la interacción suelo-corrector (ácidos orgánicos, CO<sub>2</sub>, agua) se ha propuesto la aplicación de dolomita o caliza, en forma conjunta con yeso (CaSO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O). El yeso además de proveer S, aporta Ca<sup>+2</sup> soluble mejorando la eficiencia de la enmienda calcárea, debido al efecto en la solubilización del Ca<sup>+2</sup> y mayor movilidad en el perfil (Torres Duggan et al., 2013)

El azufre (S) por su parte cumple un rol clave en el crecimiento de los cultivos. Es constituyente de aminoácidos esenciales y participa en procesos bioquímicos importantes como la biosíntesis de lípidos y proteínas; fotosíntesis; fijación biológica de nitrógeno (N), entre otros (Mengel & Kirby, 2000; Rice, 2007).

Como fuera comentado en apartados anteriores, el proceso de acidificación altera las propiedades físicas del suelo y el encalado mitigaría estos efectos (Albuquerque et al., 2003; Vázquez et al., 2009). Las alteraciones físicas tienen consecuencias directas sobre el rendimiento debido a la dificultad mecánica de las raíces para la exploración del sustrato y menor cantidad de poros capaces de suministrar agua y aire (Unger, 1993). Por lo tanto, con el encalado además de producir incremento en la dotación a través del aumento del

pH y el aporte de cationes divalentes, se restablece la estructura del suelo beneficiando el abastecimiento. Incrementos de dotación y mejoras en las condiciones de abastecimiento dan como resultado mayores rendimientos.

### 3.2 HIPÓTESIS Y OBJETIVO ESPECIFICO 2

#### 3.2.1 Hipótesis

El aporte de correctivos cálcicos al suelo aumentará el rendimiento de los cultivos leguminosos si se cumple un tiempo mínimo entre el encalado y la siembra, según la especie a implantar.

#### 3.2.2 Objetivo

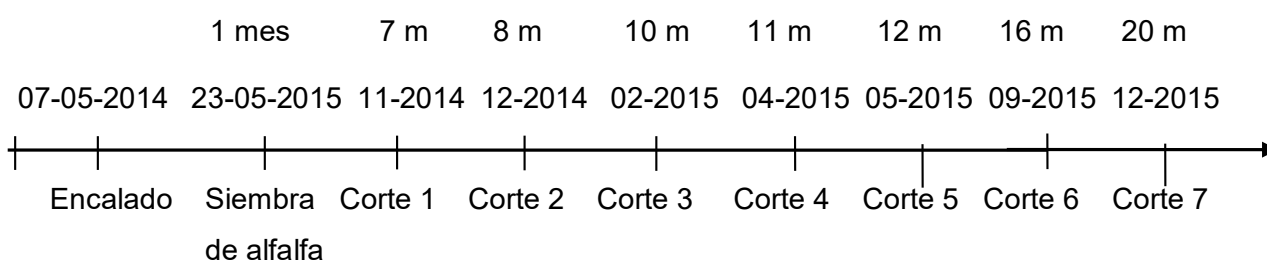
Analizar la relación entre las modificaciones de las propiedades medidas y el rendimiento de cultivos leguminosos de interés regional.

### 3.3 RENDIMIENTO DE ALFALFA EN EL HAPLUDOL

#### 3.3.1 Materiales y métodos

En el suelo de tipo Hapludol en mayo de 2014 se sembró alfalfa variedad WL 1058, de forma convencional, con una densidad de 18 kg ha<sup>-1</sup> y distancia entre hileras de 21 cm. Se fertilizó a la siembra con 100 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato monoamónico.

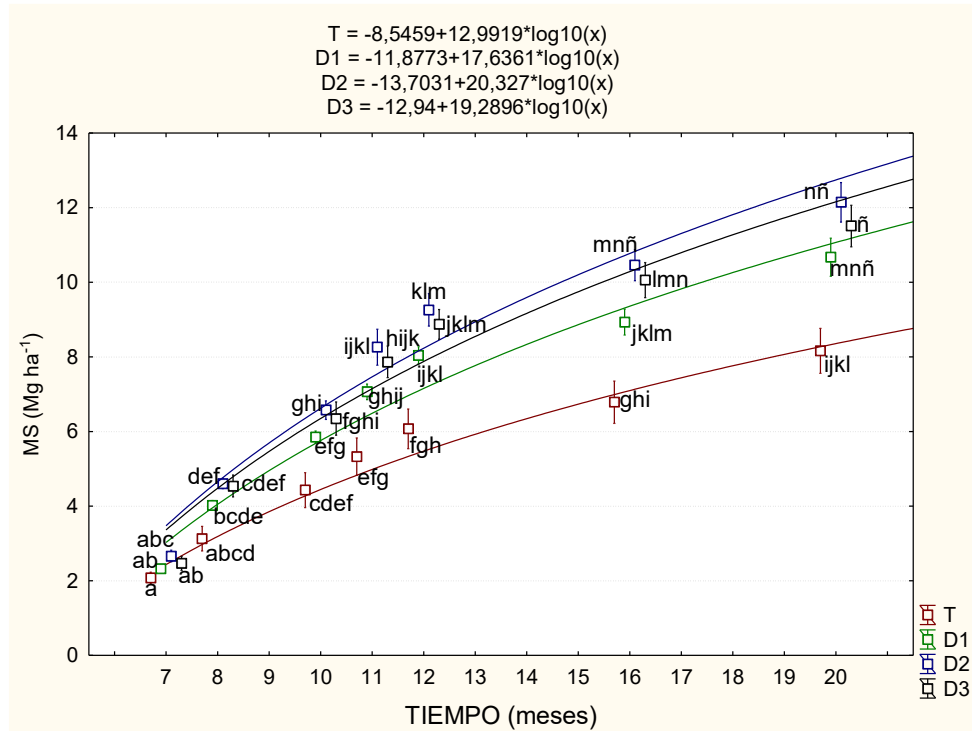
Para la determinación del rendimiento se realizó 1 corte de 0,5m<sup>2</sup> por parcela en 7 momentos diferentes del cultivo. El material fue secado a 60°C y posteriormente se determinó su peso (MS, Mg ha<sup>-1</sup>), expresándose el mismo por ha de superficie. Los momentos de corte fueron:



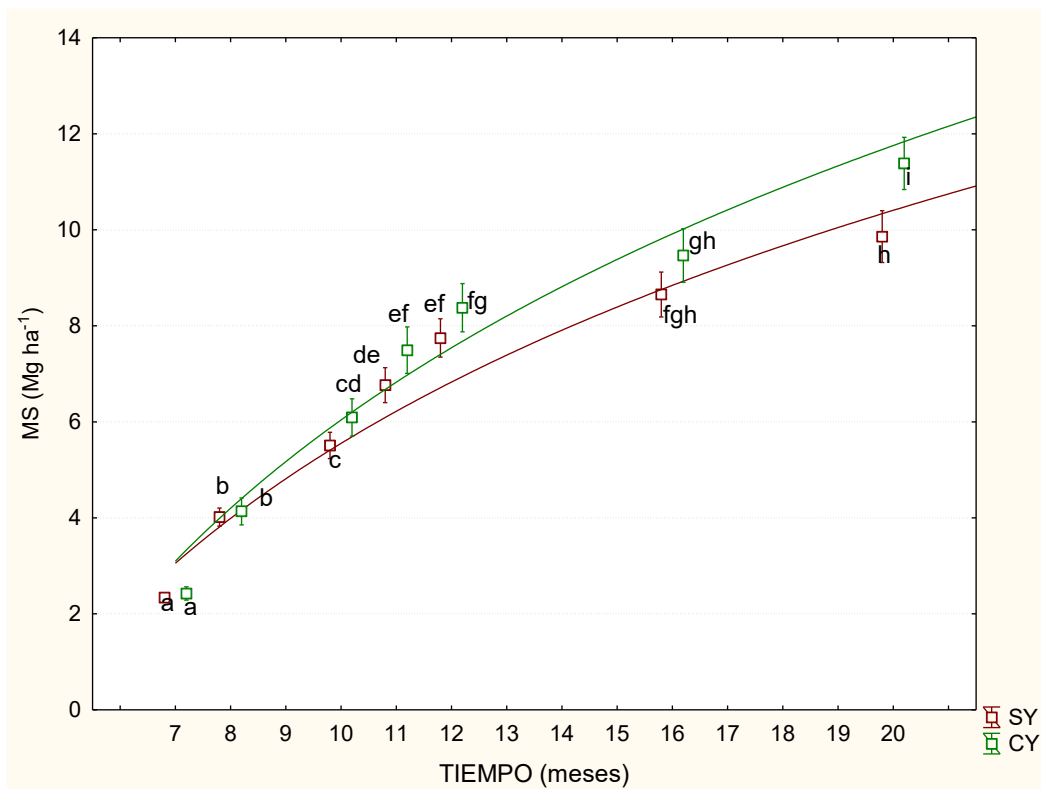
#### 3.3.2 Resultados del rendimiento del cultivo de alfalfa en el suelo Hapludol

El rendimiento de alfalfa, analizado a partir de la materia seca acumulada, presentó incremento con adición de dolomita y yeso ( $p < 0,05$ ). La dosis de dolomita mostró interacción con los meses a partir del encalado. El rendimiento comenzó a diferenciarse del testigo con la dosis de 2000 kg ha<sup>-1</sup> a los 10 meses con un incremento del 48,4 %. A los 11 meses las diferencias respecto al testigo se observaron en 2000 kg ha<sup>-1</sup> y 3000 kg ha<sup>-1</sup> con un incremento de 55,1% y 47,7% respectivamente. A partir de los 12 meses los rendimientos con las tres

dosis se diferenciaron del testigo con un incremento de materia seca acumulada de 30,7 %, 48,8 % y 41 % para las dosis de 1000 kg ha<sup>-1</sup>, 2000 kg ha<sup>-1</sup> y 3000 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente, sin presentar diferencias entre sí. La adición de yeso produjo un incremento del 15,45 % sobre la materia seca acumulada final.



a



b

**Figura 3.3.1** Rendimiento alfalfa (MS acumulada ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )) a- según tratamiento aplicado:  $T=0 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $D1=1000 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $D2=2000 \text{ kg ha}^{-1}$  y  $D3=3000 \text{ kg ha}^{-1}$  de dolomita. Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-meses b- según tratamiento aplicado: sin yeso (SY) y con adición de  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de yeso (CY) evaluado. Letras diferentes indican diferencias significativas para el factor yeso. En los dos casos las barras representan el error estándar.

### 3.3.2.1 Resumen de resultados sobre el rendimiento de alfalfa

**Tabla 3.1** Resumen de los efectos de las enmiendas sobre el rendimiento de alfalfa en el Hapludol,  $D1=1000 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $D2=2000 \text{ kg ha}^{-1}$  y  $D3=3000 \text{ kg ha}^{-1}$  de dolomita, CY= con yeso.

RENDIMIENTO ALFALFA (MS acumulada)	Hapludol	
	Dolomita	Yeso
7 meses	=	=
8 meses	=	=
10 meses	D2↑	=
11 meses	D2 y D3↑	=
12 meses		=
16 meses	D1, D2 y D3↑	=
20 meses		CY↑

### 3.3.3 Discusión rendimiento de alfalfa

El incremento de rendimiento con la adición de dolomita coincide con Vázquez et al. (2010) quienes hallaron incrementos de rendimiento en cultivos de alfalfa en localidades de Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe con dosis de  $1000 \text{ kg ha}^{-1}$ . También resultados comparables hallaron Vivas & Quaino (1999) en Esperanza, Santa Fe quienes sobre ensayos con fertilización fosfatada y la misma condición con agregado de  $2000 \text{ kg ha}^{-1}$  de enmienda cálcica, hallaron incrementos altamente significativos sobre estos últimos tratamientos.

El incremento de rendimiento por adición de yeso coincide con lo hallado por Vivas & Fontanetto et al., (2003) quienes describen que la producción de MS de la alfalfa en tratamientos con agregado de S superó significativamente a sus respectivos testigos, con y sin  $\text{Ca}^{+2}$ . Esto se debería a que la aplicación de yeso incrementa la disponibilidad de  $\text{Ca}^{+2}$  en menor tiempo que la dolomita, según los autores.

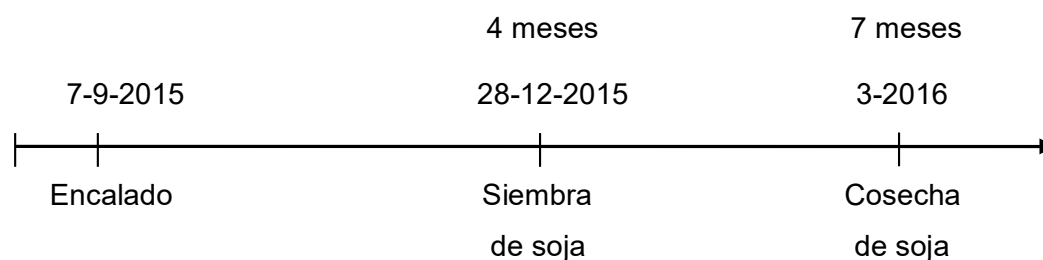
Respecto a la adición de dolomita se observó que la materia seca acumulada a los 20 meses si bien era mayor que en el testigo, no era diferente según la dosis empleada. Por lo tanto, surge la importancia de calibrar las dosis, ya que la dosis de  $1000 \text{ kg ha}^{-1}$  produjo incrementos de capacidad de intercambio catiónica, relacionada con mayor contenido de carbono y mejoras en las propiedades físicas como el DMP. También se debe tener en cuenta la complejidad y los costos de la práctica cuando se emplean dosis mayores.



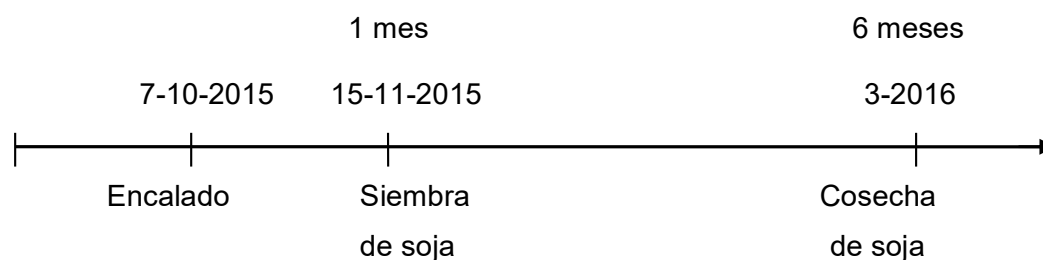
### 3.4 RENDIMIENTO DE SOJA EN SUELOS ARGJUDOL Y PALEUDOL

#### 3.4.1 Materiales y métodos

En el suelo de tipo Argjudol 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. Durante el cultivo no se realizaron labores de control mecánicas ni químicas. Los momentos de encalado, siembra y cosecha fueron:



En el suelo de tipo Paleudol se sembró soja inoculada variedad DM 4200, con un distanciamiento de 42 cm entre hileras y 16 semillas por metro lineal y se realizó una fertilización fosforada con 50 kg ha<sup>-1</sup> de súper fosfato triple. En diciembre de 2015 se aplicó herbicida, y en enero y febrero de 2016 se realizaron fumigaciones para control de chinche. Los momentos de encalado, siembra y cosecha fueron:



La cosecha se realizó de forma manual en 6 m lineales por parcela. El material vegetal se llevó a laboratorio y se secó en estufa a 60° hasta peso constante. Se determinó el rendimiento (R) de soja y sus componentes plantas/hectárea (PL ha<sup>-1</sup>), vainas/plantas (V PL<sup>-1</sup>), granos/vaina (GR V<sup>-1</sup>), granos/planta (GR V<sup>-1</sup>) y peso de 1000 granos (P 1000G).

#### 3.4.2 Resultados rendimiento cultivo de soja en el Argjudol y en el Paleudol

En el suelo Argjudol los componentes del rendimiento PI ha<sup>-1</sup>, V PI<sup>-1</sup>, P 1000G, V m<sup>-2</sup> y G m<sup>-2</sup> presentaron heterogeneidad de varianzas, las cuales no pudieron ser corregidas mediante transformaciones, por lo tanto, se realizó un análisis no paramétrico de dichas variables. La heterogeneidad de varianza del componente G PI<sup>-1</sup> pudo ser corregida con la función logaritmo decimal.

En el suelo Paleudol P1000G y R presentaron heterogeneidad de varianzas y no pudieron ser corregidas mediante transformaciones, por lo tanto, se realizó un análisis no

paramétrico. La heterogeneidad de varianzas del componente  $V\text{ PI}^{-1}$  pudo ser corregida con la función raíz cuadrada.

Las  $\text{PI ha}^{-1}$  de soja en el Argiudol y en el Paleudol presentaron disminución significativa cuando se adicionó dolomita ( $p < 0,05$ ). En el Argiudol la disminución fue de 46 % con D4 respecto a T y en el Paleudol fue de 41,5 %, 35 % y 27 % con D1, D3 y D4 respectivamente en comparación a T (Figuras 3.4.1 a y 3.4.2 a1 y a2). En el Paleudol la adición de yeso produjo la disminución de 20 %  $\text{PI ha}^{-1}$  respecto a los tratamientos sin adición. En el Argiudol durante los meses del cultivo las precipitaciones fueron de (Tabla 1.4) 39 mm; 67mm y 72 mm en los meses de diciembre, enero y febrero respectivamente. En el Paleudol fueron de (Tabla 1.6) 72 mm; 25mm; 94 mm y 151mm en los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo respectivamente.

Las  $V\text{ PI}^{-1}$  en el Argiudol se incrementaron significativamente en los tratamientos D2 y D4 respecto a T, en este último caso en más de un 100%, mientras que en el Paleudol se incrementaron con D1 y D3 respecto a T en un 60% ( $p < 0,05$ ) (Figuras 3.4.1 b y 3.4.2 b1 y b2). La adición de yeso produjo el incremento de 31 % de  $V\text{ PI}^{-1}$  en el Paleudol ( $p < 0,05$ ).

Los  $G\text{ V}^{-1}$  en el Argiudol no se modificaron con la adición de dolomita y yeso, mientras que en el Paleudol (Figuras 3.4.2 c) el tratamiento D4 presentó incremento respecto a D3 ( $p < 0,05$ )

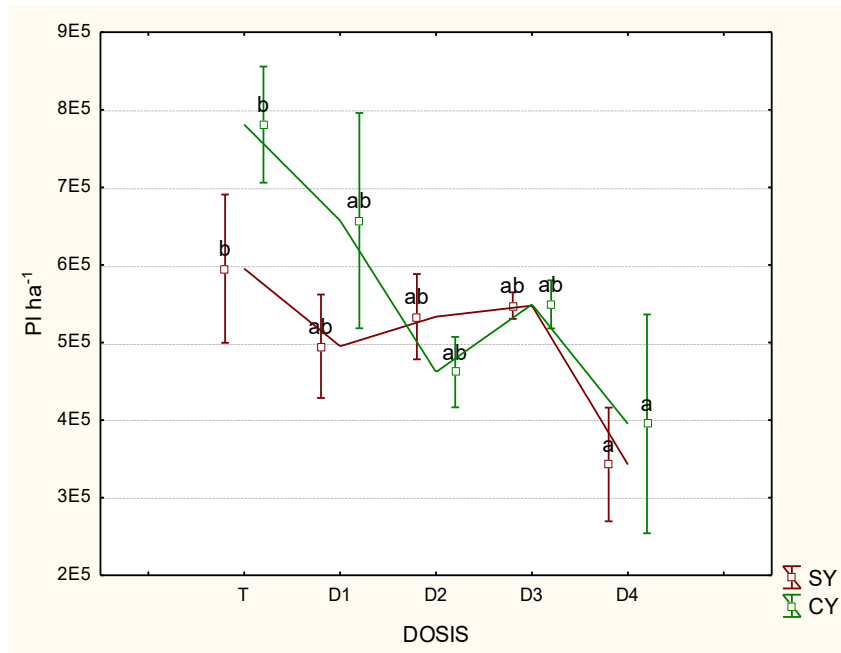
Los  $G\text{ PI}^{-1}$  en el Argiudol y en el Paleudol se incrementaron más del 100% con la adición de D4 respecto a T ( $p < 0,01$ ) en el primer caso y con la adición de D1CY, D3CY y D4CY respecto a T en el segundo caso ( $p < 0,05$ ) (Figuras 3.4.1 c y 3.4.2 d).

El P 1000G no presentó diferencia en el Argiudol con la adición de enmienda, mientras que en el Paleudol (Figuras 3.4.2 e) presentó interacción entre dosis y yeso ( $p < 0,05$ ) Los tratamientos D2CY y D3SY presentaron mayor peso que D2SY, D3CY y de D4SY.

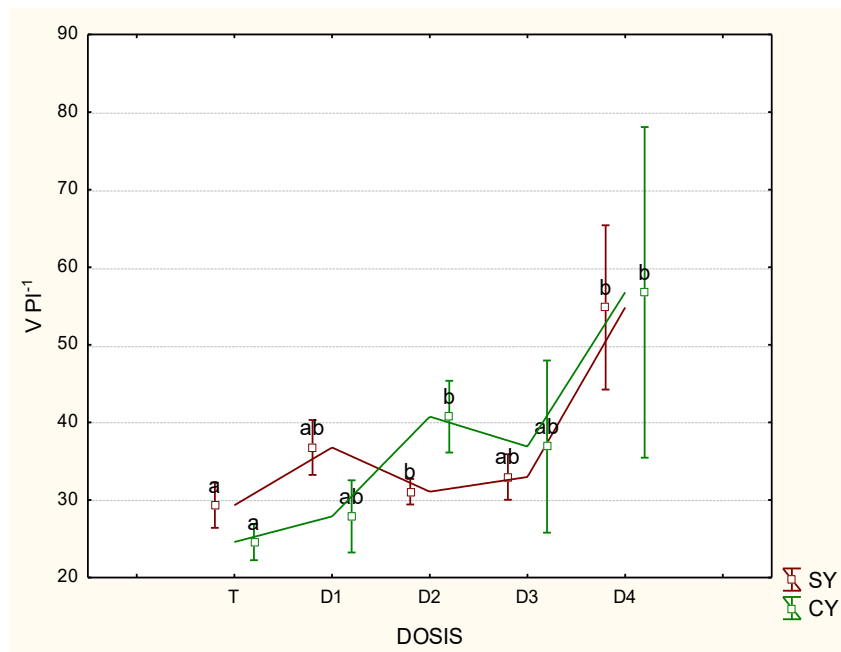
Las  $V\text{ m}^{-2}$  y los  $G\text{ m}^{-2}$  no presentaron respuesta a la adición de enmienda en el Argiudol, aunque se observó que ambos componentes siguen una tendencia al incremento con D4CY. En el Paleudol las  $V\text{ m}^{-2}$  tampoco presentaron respuesta ante la adición de enmienda, mientras que los  $G\text{ m}^{-2}$  presentaron interacción entre dosis y yeso con incremento en D2SY, D4SY y D4CY respecto a TCY y D3SY (Figura 3.4.2 f) ( $p < 0,05$ ).

El rendimiento en el Argiudol no respondió a la adición de enmienda (Figura 3.4.1 d), se relacionó negativamente con las  $\text{PI ha}^{-1}$  y positivamente con los  $G\text{ V}^{-1}$ . En el Paleudol el rendimiento presentó incremento con D4CY respecto a TCY, D1SY, D2CY y D3SY, aunque no se diferenció de TSY (Figura 3.4.2 g). Por lo tanto, en base a la diferencia observada entre D4CY y TCY se podría inferir un efecto negativo de aplicar yeso solo, más que un efecto

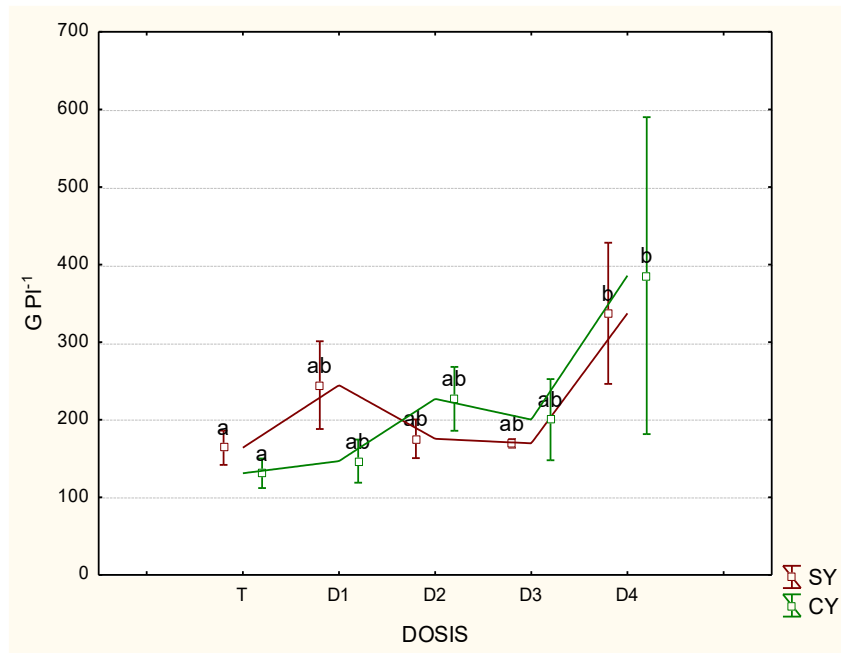
positivo de agregar dolomita. El rendimiento en este suelo se relacionó negativamente con las  $PI\ ha^{-1}$  y positivamente con  $V\ PI^{-1}$ ,  $G\ V^{-1}$  y  $V\ m^{-2}$ .



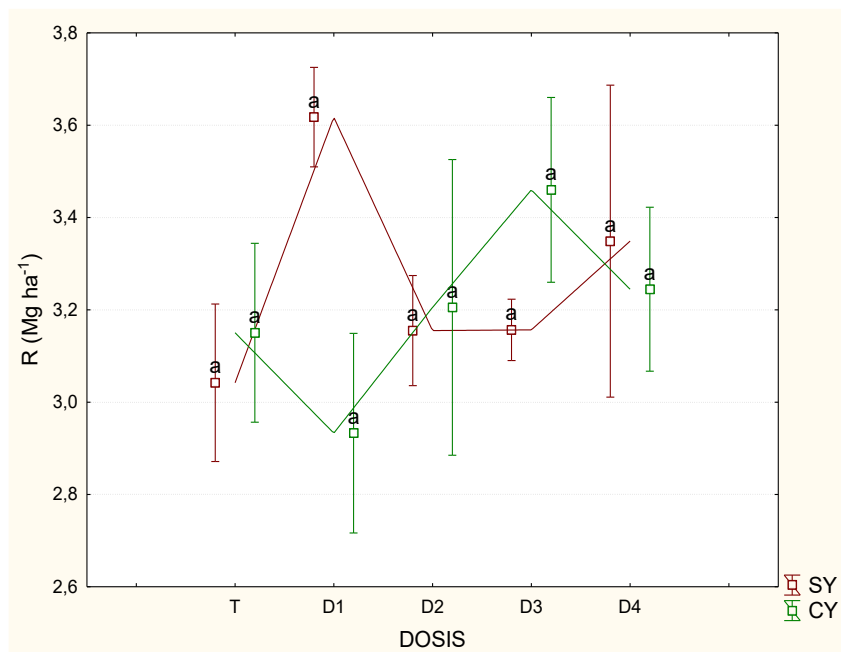
a



b

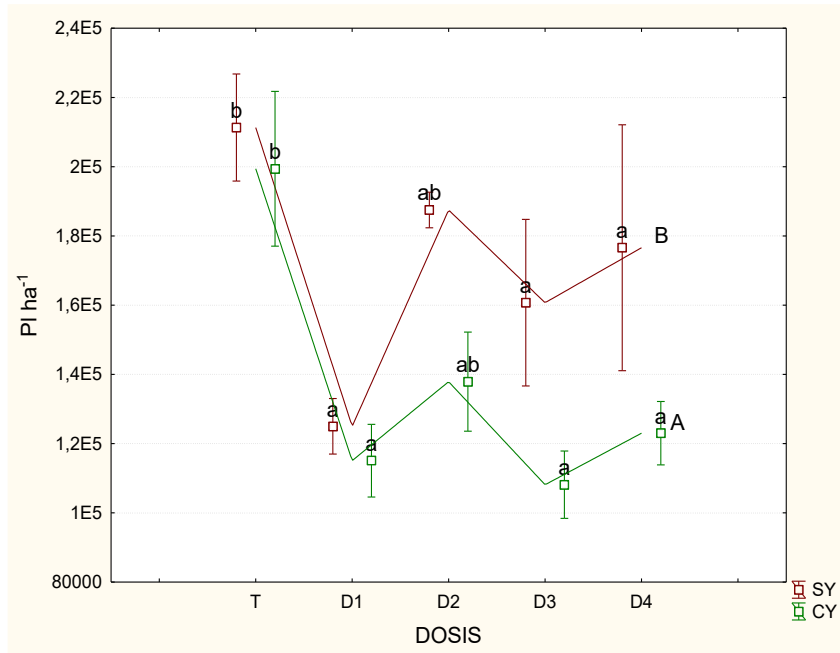


c

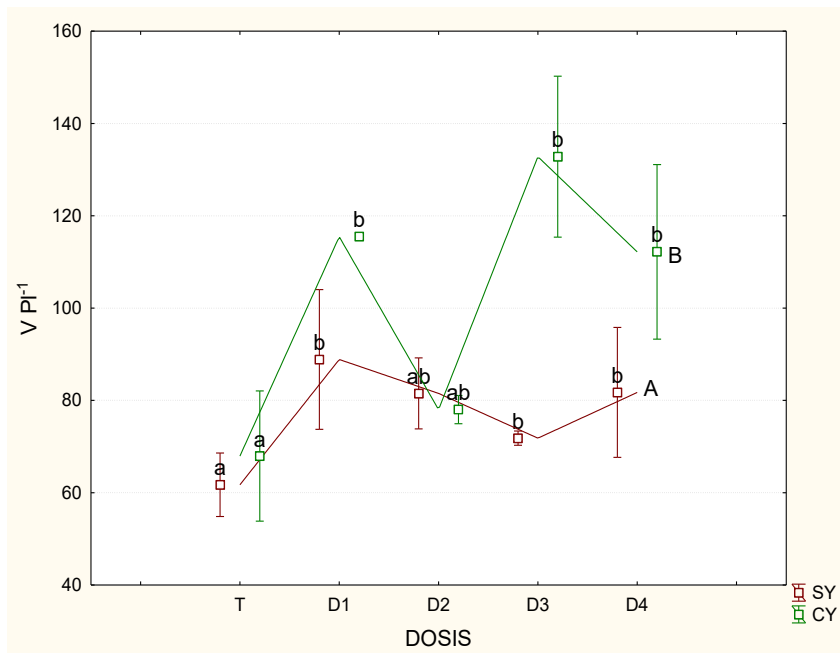


d

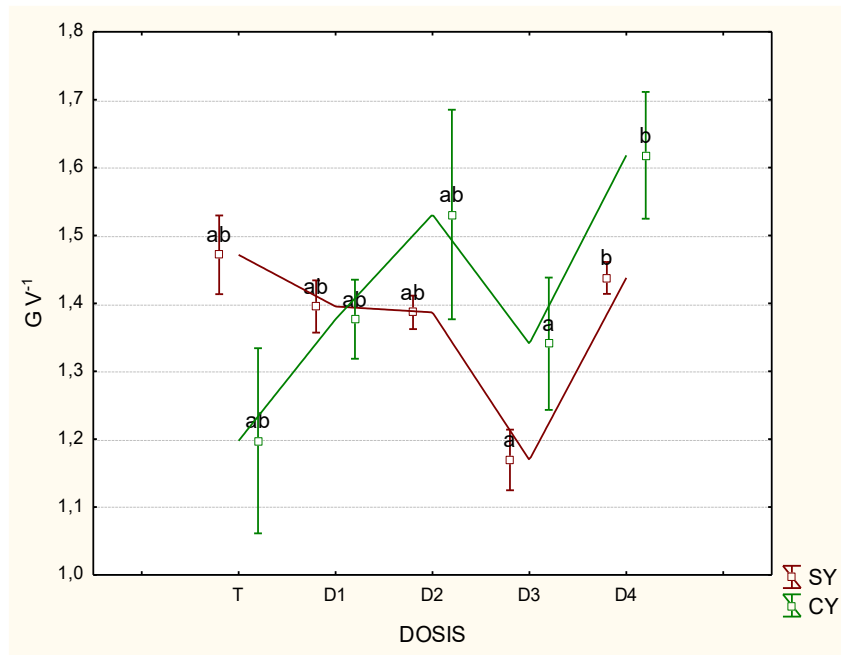
**Figura 3.4.1 a, b, c, d** Suelo Argiudol. Componentes del rendimiento de soja y rendimiento (t ha<sup>-1</sup>) según tratamiento aplicado: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> y D4=4000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita sin yeso (SY) y con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY). Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar.



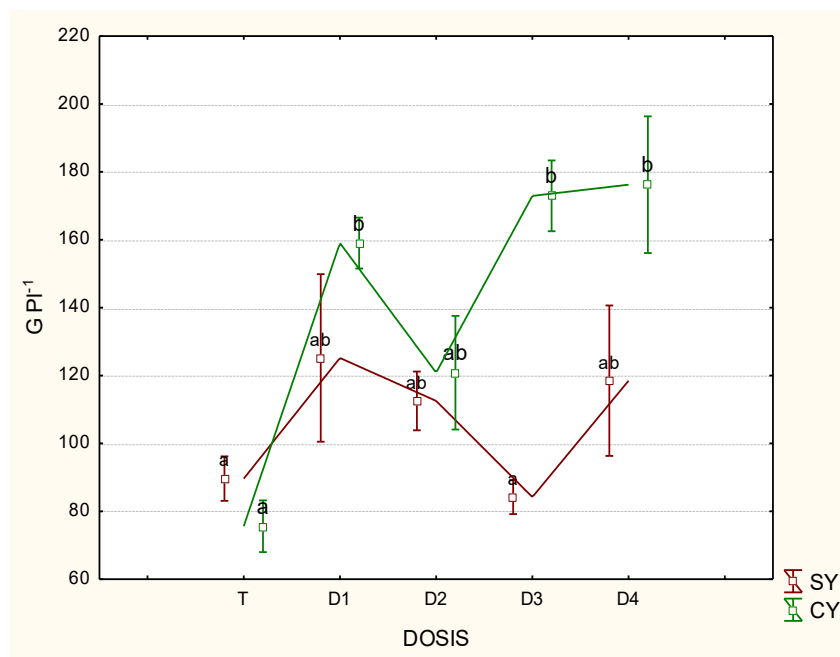
a



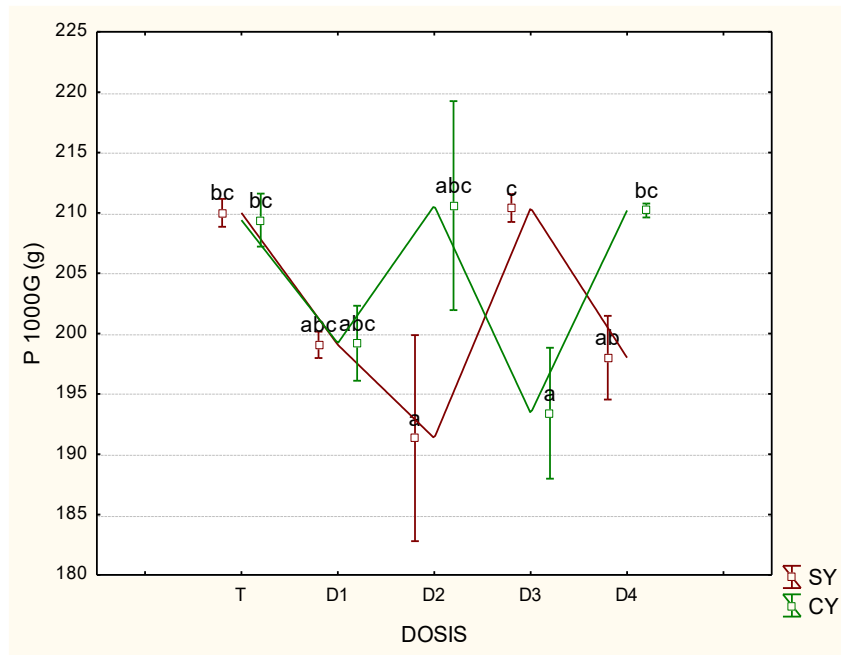
b



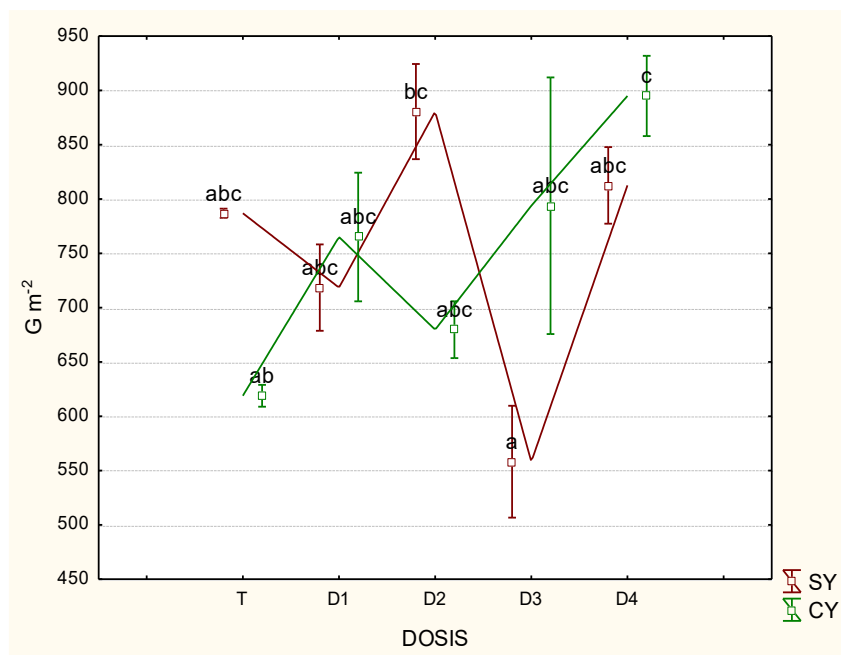
c



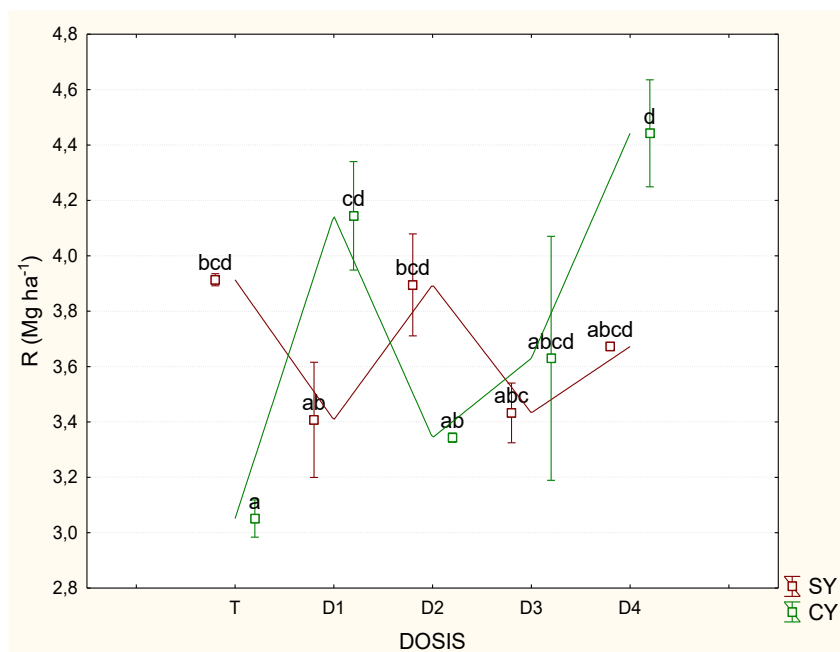
d



e



f



g

**Figura 3.4.2** Suelo Paleudol. Componentes del rendimiento de soja y rendimiento ( $t\ ha^{-1}$ ) según tratamiento aplicado: T=0  $kg\ ha^{-1}$ , D1=1000  $kg\ ha^{-1}$ , D2=2000  $kg\ ha^{-1}$ , D3=3000  $kg\ ha^{-1}$  y D4=4000  $kg\ ha^{-1}$  de dolomita sin yeso (SY) y con adición de 200  $kg\ ha^{-1}$  de yeso (CY). **a, b y c**- Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre dosis. **a y b** -letras mayúsculas diferentes indican diferencias para el factor yeso. **d, e, f y g**- letras diferentes indican diferencias para la interacción dosis-yeso. En todas las figuras las barras representan el error estándar.

### 3.4.2.1 Resumen de resultados sobre el rendimiento de soja y sus componentes

**Tabla 3.2** Resumen de los efectos de las enmiendas sobre el rendimiento de soja y sus componentes en el Argiudol y Paleudol. D=dolomita, Y=yeso.

RENDIMIENTO SOJA	Argiudol	Paleudol
PI $ha^{-1}$	D ↓	D ↓ Y ↓
V $PI^{-1}$	D ↑	D ↑ Y ↑
G $V^{-1}$	=	D ↑
G $PI^{-1}$	D ↑	DxY
P 1000G	=	DxY
V $m^{-2}$	=	=
G $m^{-2}$	=	DxY
R	=	DxY

### 3.4.3 Discusión rendimiento de soja

La disminución de las plantas por hectárea (PI  $ha^{-1}$ ) con la adición de dosis crecientes de dolomita, podría deberse a que el corto periodo de tiempo transcurrido entre el encalado y la siembra, 4 meses en el Argiudol y 1 mes en el Paleudol, según Chaplain et al. (2011) el encalado puede dar como resultado la dispersión de coloides de arcilla. Este efecto podría estar influenciado por las precipitaciones desde que se aplicó la enmienda hasta la emergencia, 285 mm en el Argiudol (sept, oct, nov) y 107 mm en el Paleudol (oct, nov),



considerando que en estos meses se producen lluvias de alta intensidad. Sin embargo, a largo plazo, las concentraciones de  $\text{Ca}^{+2}$  y la fuerza iónica en la solución del suelo aumentan causando la compresión de la doble capa eléctrica y renovando la floculación, beneficiando la estructura del suelo (Haynes et al., 1998). En el Argiudol esta disminución en la cantidad de plantas de soja también coincide con incrementos en la densidad aparente superficial con las mayores dosis de enmiendas.

A largo plazo además de producir estas mejoras físicas, la adición de dolomita y yeso, incorporan  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y S, generan incremento de pH y disminución del contenido del carbono orgánico total (COT) por el incremento en la mineralización, aumentando la disponibilidad de otros nutrientes para las plantas (Marschner 1991; McCay et al., 2013; Lawrence et al., 2016)

El proceso de fijación de N atmosférico también se ve favorecido por el encalado. La actividad de la especie *Rhizobium* en las leguminosas se restringe a pH bajo (Brockwell et al., 1991; Bordeleau & Prevost, 1994; Correa & Barneix, 1997) El encalado permite un mayor crecimiento de las leguminosas debido a que esta pueden fijar una cantidad mayor de N gracias a las adecuadas condiciones para el desarrollo de la bacteria (Espinoza & Molina, 1999). Andrade et al. (1996) señalaron que el número de semillas por individuo se determina principalmente durante la fijación de vainas (R3 a R6) y es función de la tasa de crecimiento de la planta durante esta etapa. Por lo tanto, este componente del rendimiento se afecta en respuesta a tratamientos que modifican el crecimiento de la planta hasta R6.

Posiblemente, la disminución de las PI  $\text{ha}^{-1}$ , debido al poder de compensación que posee la soja, (Board, 2000; Cox et al. 2010), al producirse mejoras físicas y químicas en las condiciones edáficas, debidas al encalado durante el crecimiento hasta R6 posibilitó el incremento de otros componentes del rendimiento como vainas por planta V  $\text{PI}^{-1}$  y granos por vaina G  $\text{PI}^{-1}$ , dando finalmente como resultado en los tratamientos con enmiendas ausencia de diferencia de rendimiento respecto a los tratamientos sin adición de yeso ni dolomita.

Algunos autores obtuvieron incrementos de rendimiento en soja con aplicación de dolomita variables según dosis y tipo de enmienda, especie vegetal y características edafoclimáticas del sitio de ensayo. Gambaudo et al., (2007) en el centro y norte de Santa Fe verificaron incremento de rendimiento de 400  $\text{kg ha}^{-1}$  de soja aproximadamente con 1 100-1 450  $\text{kg ha}^{-1}$  de dolomita. Barbieri et al., (2015) en el INTA Balcarce evaluaron rendimiento de trigo y soja con 6,2; 5,3; 4,6 y 3,1  $\text{Mg ha}^{-1}$ , en las campañas 2006-2007, 2007-2008, 2009-2010, y 2013-2014, respectivamente, y hallaron que el rendimiento de soja se incrementó significativamente un 7% en promedio todos los años.

Posiblemente el efecto de la adición de enmiendas carbonatadas de baja solubilización en las dosis ensayadas debería realizarse con mayor anticipación a los tres meses para no

crear efectos negativos sobre la emergencia de las plántulas. De esta forma las mejoras en las propiedades químicas y físicas producidas por las enmiendas se verían finalmente reflejadas en el rendimiento.

### **3.5 CONCLUSIÓN**

La adición de dolomita y yeso produjeron incrementos de rendimiento sobre la alfalfa. Si bien a los 20 meses las enmiendas no produjeron rendimientos diferenciales sobre la materia seca acumulada, los incrementos comenzaron a manifestarse en distintos momentos según la dosis empleada. Por lo tanto, se debe calibrar la dosis según el destino que se le dará al cultivo y el momento de aprovechamiento.

En el Argiudol y Paleudol el rendimiento de soja no fue afectado por las enmiendas. El corto plazo de tiempo transcurrido entre el encalado y la siembra habría provocado condiciones desfavorables en el suelo para la emergencia de las plántulas, debido a la formación de costras superficiales por la adición de enmiendas aun no solubilizadas, dejando en evidencia la importancia de aumentar los plazos entre el encalado y la siembra. Posteriormente, gracias al poder de compensación de la soja, el incremento en algunos de los componentes pudo compensar dicha pérdida y se mantuvieron estables.

**4 CAPÍTULO**  
**Evaluación del comportamiento de un**  
**Hapludol y el rendimiento debidos al tránsito**  
**agrícola luego del encalado**

#### 4.1 INTRODUCCIÓN ESPECÍFICA

La compactación es la compresión de un suelo no saturado que resulta en reducción de la fracción del volumen de aire (Hillel, 1982). Los cambios estructurales por compactación provocan una deficiente aireación y un suministro inadecuado de oxígeno para el desarrollo de las plantas. Así mismo, la degradación de la estructura del suelo por compactación provoca una ralentización o paralización del desarrollo de las raíces, al aumentar la resistencia mecánica (Bengough, 1991; Atwell, 1993).

La compactación produce un cambio en la forma y continuidad de los poros, en especial una reducción del tamaño y número de los macroporos. La disminución en el número de estos poros genera una impedancia mecánica, que se traduce en la resistencia ofrecida por la matriz del suelo a la deformación causada por las raíces en crecimiento (Taylor & Ratliff, 1969). La elongación radical solo es posible en el grado en que la presión ejercida por la raíz exceda la impedancia. Al influir directamente sobre el crecimiento radical de las plantas, se traducirá en un menor crecimiento de la parte aérea y en algunas ocasiones, puede ocurrir que las plantas no emerjan. Ha sido citado en forma reiterada que los sistemas sin remoción pueden producir compactación del suelo (Carter, 1988; Fabrizzi et al., 2005; Costantini et al., 2006; Sasal, 2006; Strudley et al., 2008), particularmente en estratos superficiales o ligeramente subsuperficiales del terreno (Botta et al., 2008). Los rendimientos tienden a decrecer luego de varios años, según informan Sidhu & Duiker (2006), Botta et al. (2006) y Lal (1996), asociados a la ausencia de roturación del suelo y afectación de las principales propiedades físicas.

En condiciones naturales, sin intervención antrópica, se pueden encontrar en el suelo horizontes con diferentes grados de compactación, lo que se explica por las variables que dominaron durante su génesis y evolución. Sin embargo, es bajo condiciones de uso agrícola intensivo que este fenómeno se acelera y llega a producir serios problemas en el desarrollo de las plantas cultivadas (Comisión Nacional de Riego, 2008). En las últimas décadas estos procesos asociados a la siembra directa, adquieren gran trascendencia por su difusión areal a nivel nacional, especialmente en el ámbito templado con agriculturización creciente, ámbito donde se desarrolló, a su vez, la acidificación antrópica (Iturri, 2015).

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 (Alakukku et al., 2003).

Se han logrado avances en las últimas décadas en la comprensión cuantitativa del mecanismo de capilaridad en medios granulares no saturados. La atracción capilar puede existir en cualquier suelo insaturado y su magnitud es en general, inversamente proporcional

al tamaño de las partículas y al grado de saturación (Orret et al., 1975; Drobbs & Yeomans, 1982). Los suelos arcillosos exhiben mayor atracción interpartículas que los suelos arenosos producto de las partículas laminares que causan mayores efectos cohesivos que las esféricas. Cuando el contenido de agua falta entre las partículas, se desorientan y al aumentar se orientan. La atracción en, o cerca de los contactos de partículas de suelo puede ser debida a: 1. Atracción de van der Waals, 2. Repulsión eléctrica de doble capa, 3. Los contactos cercanos cara-a-punta por la cementación, 4. Cementación debido a la precipitación del soluto o química en los contactos, 5. Atracción capilar debido a la existencia de puentes de agua u organismos entre las partículas, 6. Magnética, 7. La tensión capilar debida a la presencia de poros capilares que en condiciones insaturadas hacen que se desarrolle un potencial agua (mátrico fundamentalmente) negativo por efecto de las fuerzas de cohesión y adhesión y 8. La tensión capilar debido a la tensión superficial del agua (Hossne García et al., 2012). Por lo dicho es factible suponer que a causa de la modificación de la doble capa difusa cuando un suelo cambia en el tipo y concentración de iones adsorbidos, paralelamente a la modificación que algunos de ellos provocan en la hidrofobicidad, que tanto la acidificación, como su corrección a través del encalado, pueda incidir en la cohesión y a través de ella en la susceptibilidad a la compactación de los suelos.

Por todo lo expuesto hasta aquí, la práctica de encalado, no solo revertiría el problema de acidez en sí mismo, sino también podría disminuir las consecuencias negativas de la compactación antrópica. Es por este motivo que se torna necesario profundizar en el conocimiento de la posibilidad de manejar simultáneamente estos efectos secundarios, mediante la selección de dosis, tipo de enmiendas y tecnología de aplicación más apropiadas para cada situación.

## **4.2 HIPÓTESIS Y OBJETIVO ESPECIFICO 3**

### **4.2.1 Hipótesis**

En suelos ácidos el agregado de enmiendas básicas disminuirá el impacto negativo superficial del tránsito de maquinaria sobre el rendimiento de los cultivos, debido a mejorar las propiedades hidrofísicas y estructurales superficiales.

### **4.2.2 Objetivo**

Evaluar los cambios en el comportamiento del suelo y en el rendimiento debidos al tránsito agrícola, luego de la aplicación de correctivos cálcicos.

## 4.3 MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.3.1 Diseño experimental

En el Hapludol además de la adición de distintas dosis equivalentes (0, 1000, 2000 y 3000kg ha<sup>-1</sup>) de enmienda carbonatada (dolomita), sin (TSY, D1SY, D2SY y D3SY) y con 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (TCY, D1CY, D2CY y D3CY), el arreglo factorial incluyó el factor “intensidad de tránsito” (sin tránsito (ST) y con 5 pasadas de tractor (CT)) (Figura 4.1) y el diseño experimental fue diseño de subparcelas divididas en bloques al azar con 3 repeticiones. Se utilizaron tractores o máquinas agrícolas que alcancen al menos los límites de 4 Mg/eje indicados por Hakansson y Reeder (1994), capaz de producir compactación sub-superficial del suelo en un solo pasaje.

BLOQUE I		BLOQUE II		BLOQUE III	
T + Y	T	D1000 + Y	D1000	D3000 + Y	D3000
D2000 + Y	D2000	D3000 + Y	D3000	D2000 + Y	D2000
D3000 + Y	D3000	T + Y	T	D1000 + Y	D1000
D1000 + Y	D1000	D2000 + Y	D2000	T + Y	T

..... Huellas 5 pasadas de tractor

**Figura 4.1** Plano de ensayo Hapludol Thapto Árgico

### 4.3.2 Determinaciones

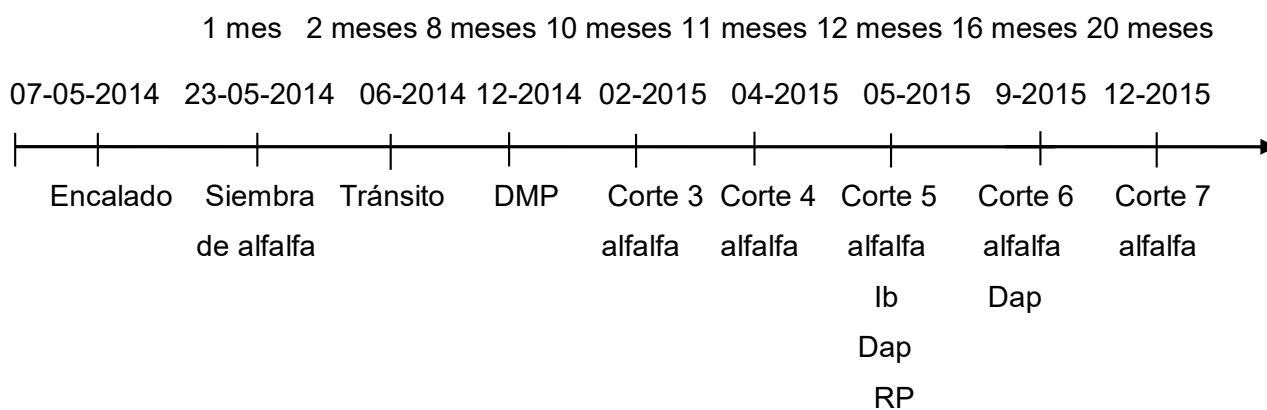
La recolección de muestras y las determinaciones sobre los tratamientos con tránsito se realizaron sobre las huellas que se encontraban marcadas con estacas en los extremos de cada bloque (el tránsito se realizó siempre sobre la misma línea dentro de cada parcela). El resto de la parcela permaneció sin tránsito.

- Infiltración básica (Ib): infiltrómetro de disco (Perroux & White 1988). Se realizó una medición por parcela considerando el bloque como repetición en los tratamientos con yeso.
- Densidad aparente (Dap): método del cilindro, se evaluó 0 a 0,10 m de profundidad (Blake & Hartge 1986, en SAMLA-SAGPyA 2004). Se tomaron 2 muestras por parcela y por tratamiento (cada tratamiento surge de la combinación de los tres factores, dosis-yeso-tránsito).
- Resistencia a la penetración a profundidades de 0-10 cm, 10-20cm, 20-30cm y 30-40 cm (RP 0-10cm, RP 10-20cm, RP20-30cm, RP30-40cm): con penetrómetro de cono según Norma ASAE S.313.3 (ASAE 1993) cada 0,05 m de profundidad y hasta una

profundidad máxima de 0,40m. Se realizaron 10 determinaciones por parcela y por tratamientos (cada tratamiento surge de la combinación de los tres factores, dosis-tránsito, respecto a este último las mediciones realizadas sobre la huella son consideradas CT y ST el resto de la parcela). El penetrómetro Fieldscuot SC900 posee un Software capaz de generar una tabla de datos de las mediciones, a partir de la cual se generaron los gráficos que se presentan en resultados.

- Contenido de humedad (p/p): extracción de muestras de humedad a cada profundidad en conjunto con mediciones de resistencia a la penetración. Se pesó en húmedo y se secó en estufa a 100 °C hasta peso constante.
- Estabilidad estructural (DMP): método de Le Bissonnais et al. (1996). Teniendo en cuenta los tres bloques, se tomó una muestra por parcela y por tratamiento hasta los 15 cm de profundidad. Se realizó el pre-tratamiento humectación rápida. Se tomaron con la pala descartando los bordes para preservar la integridad natural de los agregados.
- Rendimiento alfalfa: se realizó 1 corte de 0,5 m<sup>2</sup> por intensidad de tránsito, por parcela en 5 momentos diferentes del cultivo. El material fue secado a 60 °C y posteriormente se determinó su peso. Entre muestreos se realizó corte mecánico de la alfalfa. El ensayo permaneció clausurado a los animales.

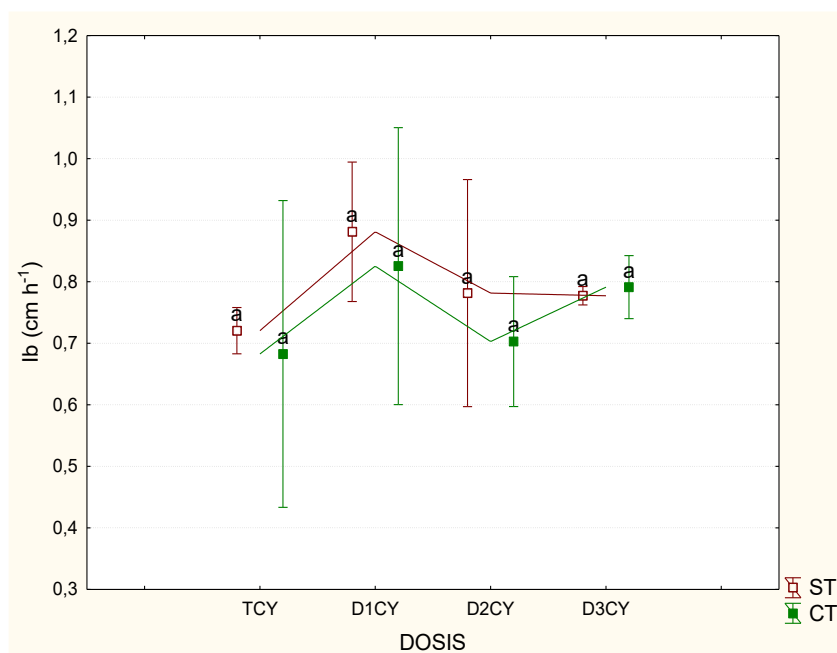
Los momentos de mediciones a campo, toma de muestras y corte de alfalfa fueron:



#### 4.4 RESULTADOS

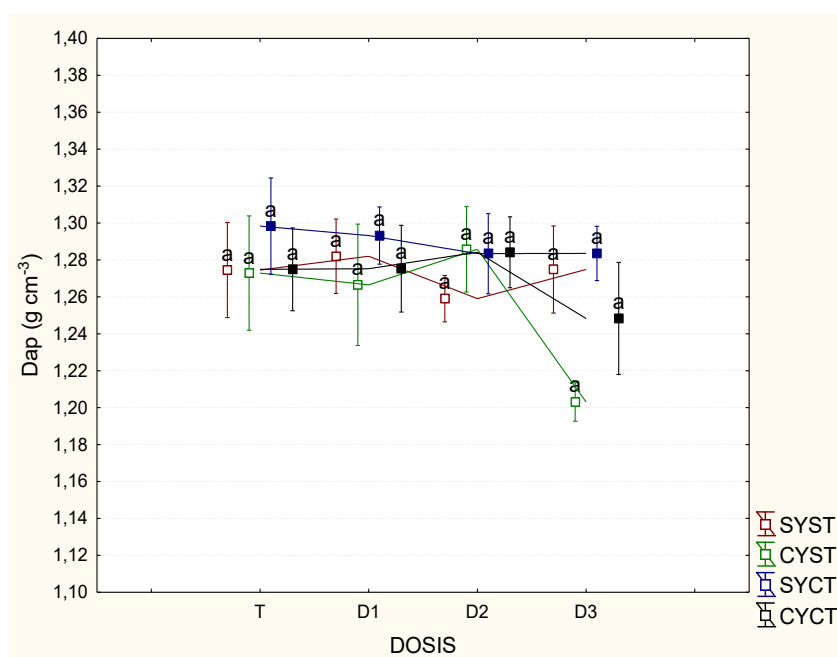
La lb presentó heterogeneidad de varianzas, la cual fue corregida mediante la transformación logaritmo decimal. La RP de 0 a 10 cm, de 10 a 20 cm y de 20 a 30 cm, y el rendimiento de alfalfa en los cortes 3, 4 y 5 presentaron heterogeneidad de varianzas y no pudo ser corregida mediante transformaciones, por lo tanto, se realizó un análisis no paramétrico Kruskal-Wallis.

La Ib no presentó modificaciones ante el efecto de la enmienda y el tránsito ( $p < 0,05$ ) (Figura 4.2).



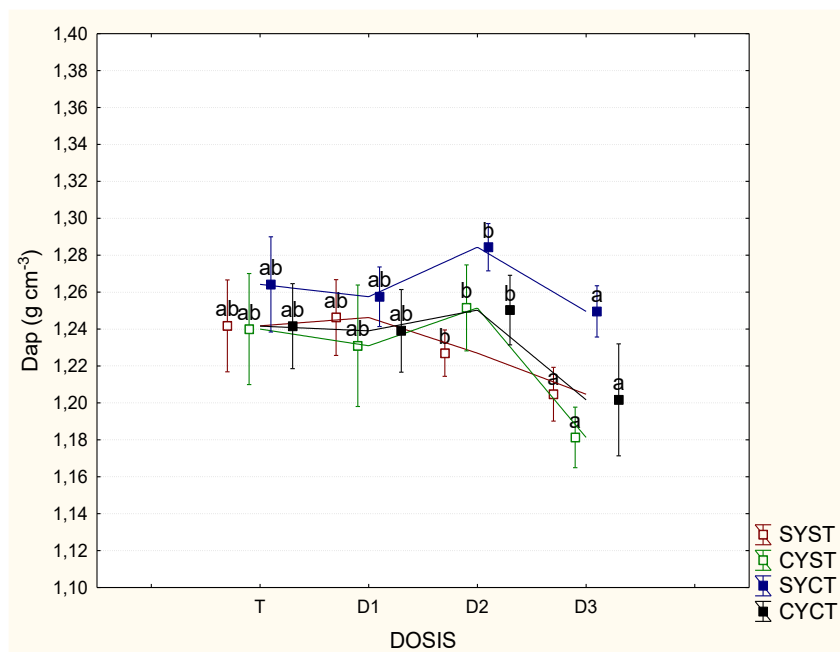
**Figura 4.2** Infiltración básica (Ib,  $\text{cm h}^{-1}$ ) según tratamientos aplicados: TCY=0  $\text{kg ha}^{-1}$ , D1CY=1000  $\text{kg ha}^{-1}$ , D2CY=2000  $\text{kg ha}^{-1}$  y D3CY=3000  $\text{kg ha}^{-1}$  con adición de 200  $\text{kg ha}^{-1}$  de yeso, y ST (sin tránsito) y CT (con tránsito). Letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis. Las barras representan el error estándar.

La Dap evaluada a los 12 meses posteriores al encalado no presentó respuesta a las enmiendas y a la intensidad del tránsito ( $p < 0,05$ ) (Figura 4.3.a). En la Dap a los 16 meses posteriores se observó que D3 presentó menor valor que D2, sin diferenciarse de TSY, sin ser afectada por la adición de yeso y tránsito agrícola ( $p < 0,05$ ) (Figura 4.3.b).



a

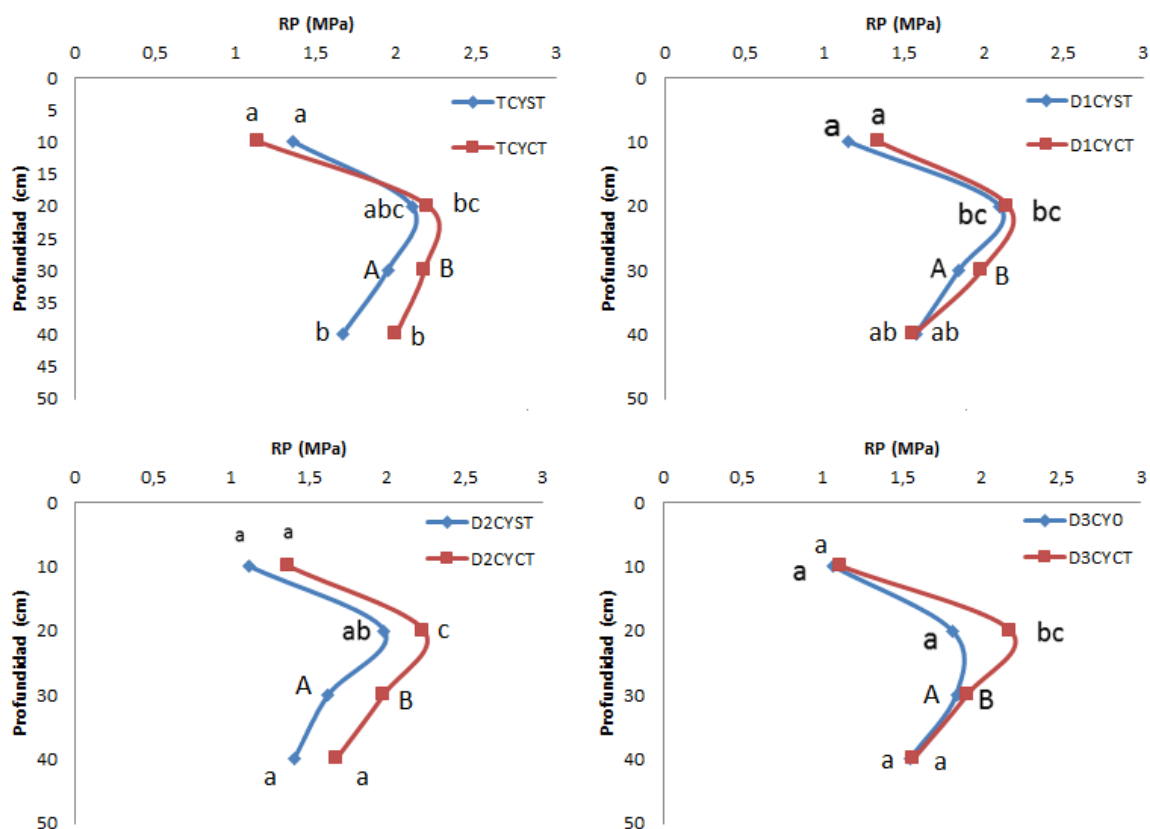




b

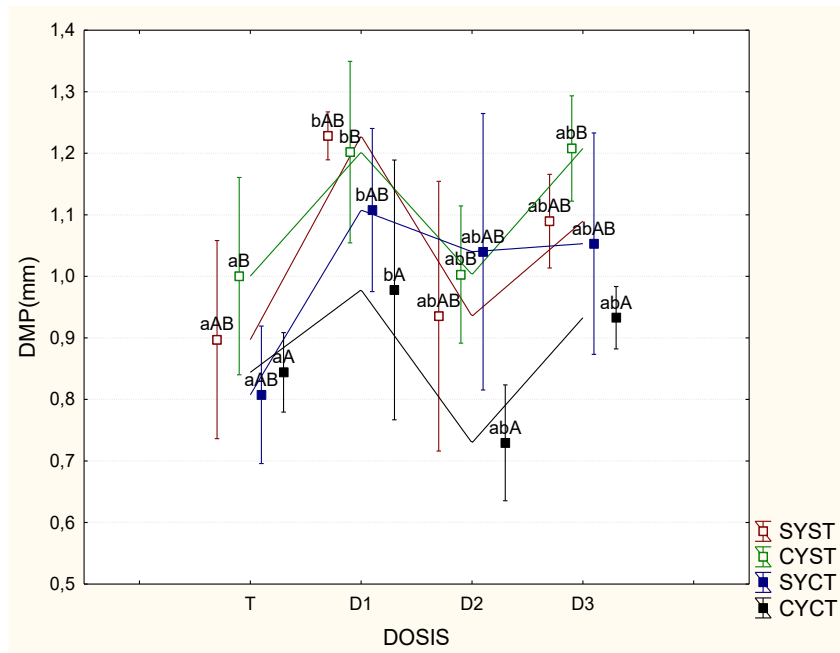
**Figura 4.3** Densidad aparente (Dap g cm<sup>-3</sup>) según tratamientos aplicados: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> sin yeso (SY) y con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY), ST (sin tránsito) y CT (con tránsito) **a**-evaluada a los 12 meses posteriores al encalado. Letras diferentes indican diferencias significativas para dosis **b**-16 meses posteriores al encalado. Letras diferentes indican diferencias significativas para dosis. Las barras representan el error estándar.

La RP medida a los 12 meses posteriores al encalado en los tratamientos CY, evaluada de 0-10 cm de profundidad no presentó diferencias significativas para ninguno de los tres factores analizados. De 10-20 cm de profundidad presentó interacción entre dosis-tránsito, el menor valor lo presentó D3CYST y se diferenció de todos los tratamientos CT ( $p < 0,05$ ). El testigo no presentó efecto al tránsito. De 20-30 cm la RP no presentó diferencia entre las dosis ( $p < 0,05$ ), pero se incrementó CT ( $p < 0,05$ ). Finalmente, de 30-40 cm la RP no se observaron efectos de tránsito y hubo diferencia en dosis ( $p < 0,05$ ), observándose el mayor valor en TCY respecto a D2CY y D3CY ( $p < 0,05$ ) (Figura 4.4).

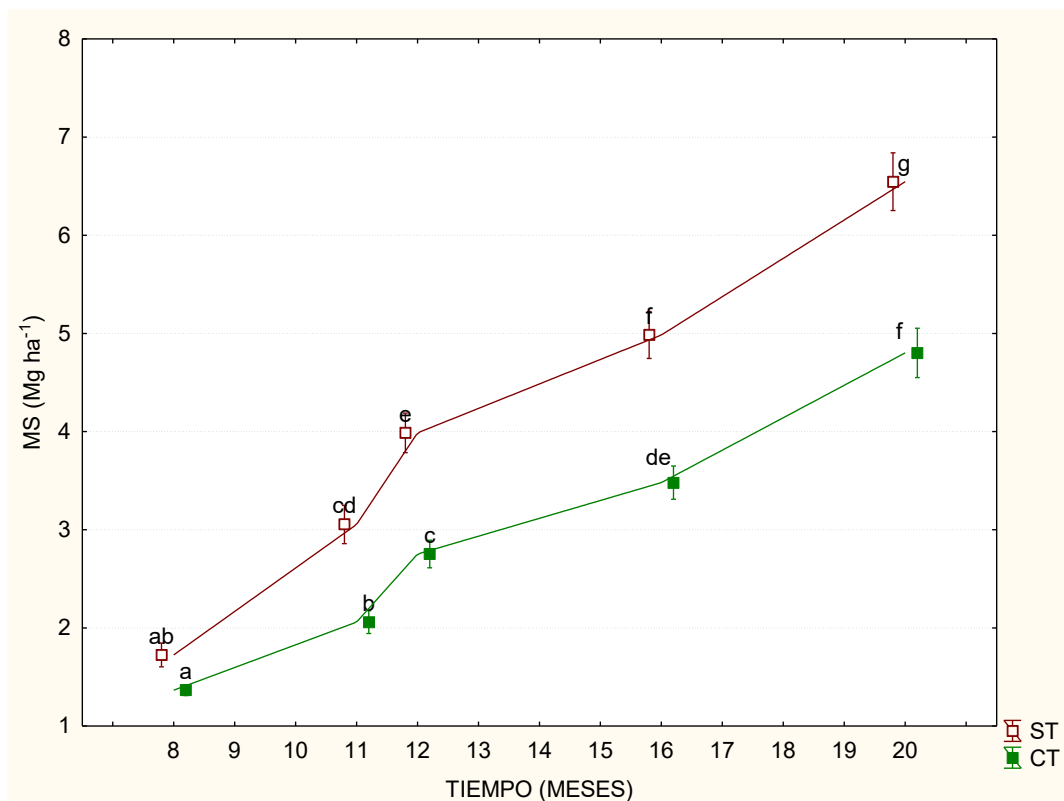


**Figura 4.4. a, b, c, d** Resistencia a la penetración (RP, MPa) según tratamientos aplicados: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg y D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY), y sin tránsito (ST) y con tránsito (CT) evaluada a los 12 meses posteriores al encalado. De 0-10 y de 30-40 cm de profundidad letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas para dosis. De 10-20 cm de profundidad letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis pasadas. De 20-30cm letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas para tránsito.

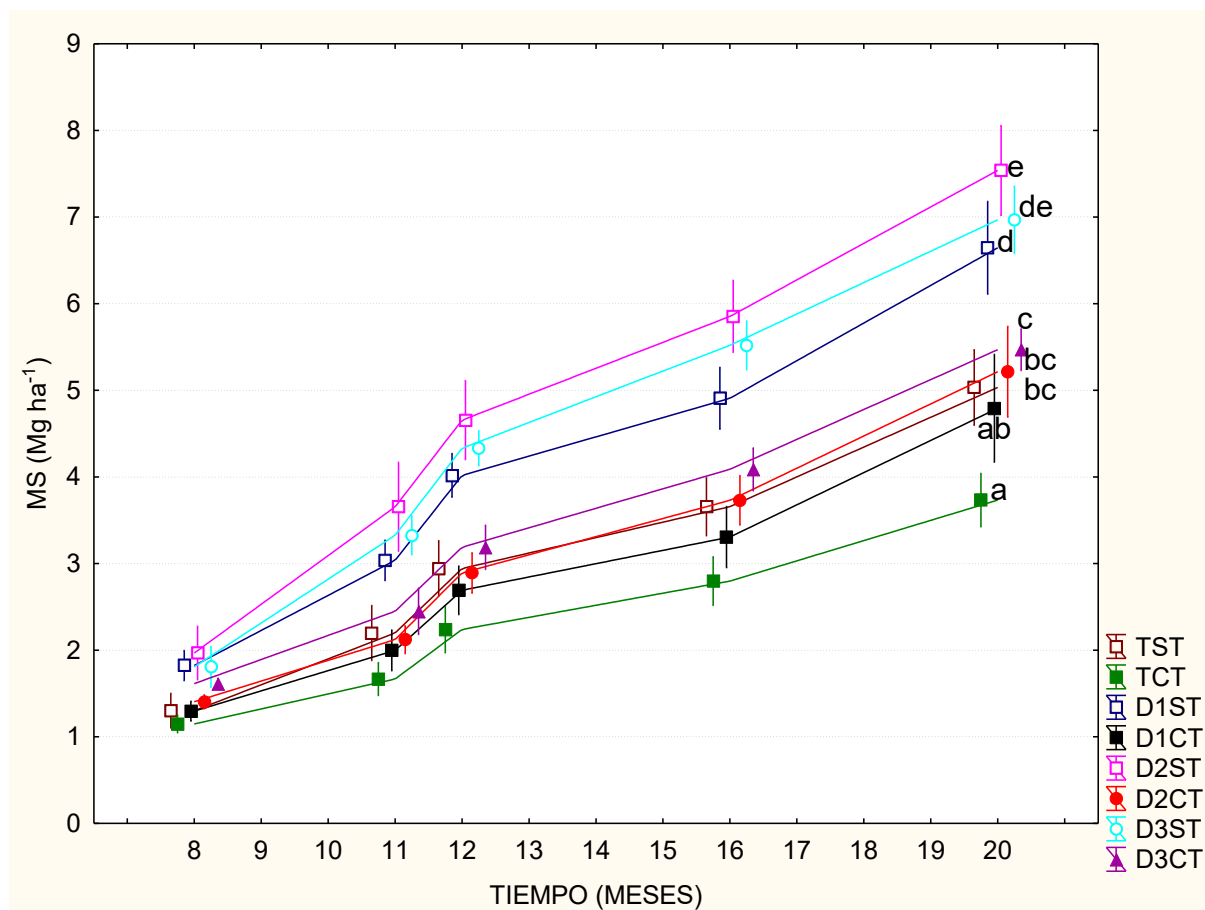
El DMP determinado a partir del pre-tratamiento HR evaluado a los 12 meses posteriores al encalado se incrementó con D1 respecto a T y a D2 ( $p < 0,05$ ). El DMP fue menor en los tratamientos CY CT respecto a los tratamientos CY ST, mientras que los tratamientos SY no presentaron efectos significativos frente al tránsito y no se diferenciaron de los tratamientos CY ( $p < 0,05$ ) (Figura 4.5).



**Figura 4.5** Diámetro medio ponderado (DMP, mm) según tratamientos aplicados: T=0 kg ha<sup>-1</sup>, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg y D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> sin yeso (SY) y con adición de 200 kg ha<sup>-1</sup> de yeso (CY), y sin tránsito (ST) y con tránsito (CT) evaluada a los 12 meses posteriores al encalado. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas para dosis. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias para la interacción yeso-pasadas.



a



b

**Figura 4.6** Rendimiento alfalfa (MS acumulada ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )) **a-** según tratamiento aplicado con tránsito (CT) y sin tránsito (ST). Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción meses-tránsito. **b-** según tratamiento aplicado:  $T=0 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $D1=1000 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $D2=2000 \text{ kg ha}^{-1}$  y  $D3=3000 \text{ kg ha}^{-1}$  de dolomita con tránsito (CT) y sin tránsito (ST). Letras diferentes indican diferencias significativas para la interacción dosis-tránsito. En los dos casos las barras representan el error estándar.

La materia seca acumulada comenzó a ser significativamente menor por efecto del tránsito a partir de los 11 meses y continuó diferenciándose hasta ser 36 % menor a los 20 meses ( $p < 0,05$ ) (Figura 4.6.a). Los tratamientos D2 y D3 lograron corregir el efecto negativo del tránsito ya que, la materia seca acumulada en estos dos casos fue igual a TST ( $p < 0,05$ ). El tratamiento D1 además de no poder corregir dicho efecto presentó menor materia seca acumulada que el TST (Figura 4.6.b). Los tratamientos D1, D2 y D3 ST fueron 31,2 %, 34 % y 22,7% significativamente mayores a sus pares CT.

#### 4.4.1.1 Resumen de resultados

**Tabla 4.1** Resumen de los efectos del tránsito y las enmiendas sobre propiedades físicas y rendimiento de alfalfa. D=dosis, Y=yeso, T=tránsito, D1=1000 kg ha<sup>-1</sup>, D2=2000 kg ha<sup>-1</sup> y D3=3000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita.

TRÁNSITO	Hapludol
lb	=
Dap	↓ D3
RP 0-10cm	=
10-20cm	DxT
20-30cm	↑ T
30-40cm	↓ D
DMP	↑ D1 ↑ YxT
MS	D2 y D3CT = TST

## 4.5 DISCUSIÓN

La lb no se modificó significativamente debido al pasaje de maquinaria. De la misma manera tampoco lo hizo la Dap en ninguno de los dos momentos muestreados. Probablemente la agresividad del peso de la maquinaria y la cantidad de pasadas no fueron suficientes como para generar un estado de compactación significativo sobre ninguna de estas variables. Botta et al. (2004) en un suelo Argiudol típico, comprobaron que la Dap se incrementaba cuando se realizaban 8 pasadas de tractor respecto al testigo sin pasadas, 3 pasadas más que en este ensayo y en un suelo con diferentes características texturales.

La resistencia a la penetración (RP) evaluada a los 12 meses posteriores al encalado hasta los 10 cm de profundidad, al igual que la lb y la Dap, no presentó efectos de compactación por tránsito de maquinaria. La RP afectada por el tránsito de 20 a 30 cm de profundidad no pudo ser corregida con las enmiendas, lo que comprobaría la baja solubilidad de los productos carbonatados (Sherman & Barak, 2000). Estos incrementos de RP observados coinciden con Balbuena et al. (2000) quienes en un Argiudol vértico, encontraron que, con cargas por eje de 3 Mg, el incremento de la intensidad de tránsito induce compactación a nivel subsuperficial, el cual persiste en el tiempo; y con Jorajuría et al. (1997), quienes en un suelo Argiudol típico afirmaron que la mayor intensidad de tránsito produce modificaciones en el estado físico mecánico del suelo a nivel subsuperficial.

El mayor diámetro medio ponderado (DMP) obtenido con la adición de 1000 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita respecto al testigo coincide con Vázquez et al. (2009) quienes, en un Argiudol típico de la pradera pampeana argentina, analizaron la estabilidad de los agregados con la prueba de alcohol:agua y comprobaron que dosis bajas (1000 kg ha<sup>-1</sup>) favorecieron la estabilidad. Sin embargo, dosis mayores (1500 kg ha<sup>-1</sup>) arrojaban valores similares al testigo. Por el contrario, Masola (2019) evaluó el DMP según el método Le Bissonnais sobre un Argiudol con adición de 1850 kg ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> luego de seis meses de aplicado, y no halló efectos sobre dicha

variable. El incremento del DMP con la dosis de  $1000 \text{ kg ha}^{-1}$  en nuestro trabajo coincide con el incremento de CIC y por lo tanto (a partir de la correlación positiva de la CIC con el carbono orgánico), con el contenido de carbono (capítulo 2). La disminución del DMP a causa de las pasadas de tractor en los tratamientos CY se debería a que el tránsito repetido en una misma senda provoca daños en la estructura del suelo que causa reducciones en los rendimientos (Hakansson & Reeder, 1994). Debido a que la adición de  $1000 \text{ kg ha}^{-1}$  de dolomita aumentó el DMP, independientemente del pasaje de maquinaria y adición de yeso, se evidencia que la dolomita podría estar mitigando los efectos del tránsito sobre la estabilidad estructural.

La compactación limita la emergencia y el crecimiento de las plantas de alfalfa (López-Martínez et al., 2000). Los efectos del tránsito sobre la estructura, estarían perjudicando las condiciones para el desarrollo radical, aún cuando sus efectos no se observaron en los otros parámetros físicos evaluados (lb, Dap y RP). La disminución de la materia seca de alfalfa debida al tránsito agrícola a partir de los 11 meses, también podría haber sido provocada por un efecto directo del pasaje del tractor sobre las plantas. Finalmente, las mayores dosis de enmiendas fueron capaces de revertir el impacto negativo del tránsito sobre el rendimiento.

#### **4.6 CONCLUSIÓN**

El tránsito agrícola disminuyó la estabilidad estructural e incrementó la resistencia a la penetración de 10 cm a 30 cm de profundidad cuando se adicionó yeso. La enmienda no disminuyó el efecto negativo del tránsito sobre la resistencia a la penetración. La estabilidad estructural en superficie fue mayor con dosis bajas de dolomita y fue independiente del pasaje de tránsito.

La disminución del rendimiento producida por el tránsito agrícola pudo ser compensada con la adición de enmiendas.

**5    CAPITULO**  
**Reflexiones finales, utilidad de la**  
**información generada y posibles**  
**líneas de investigación**

En este capítulo final se realiza una síntesis de esta tesis y se comprueba si los resultados permitieron reunir evidencias suficientes para rechazar las hipótesis que fueron planteadas para cumplir con los objetivos. Al final del capítulo se describe la utilidad de la información generada y las posibles líneas de investigación que surgieron en el desarrollo de esta tesis.

## 5.1 SINTESIS DE LOS RESULTADOS

El incremento de la demanda mundial de alimentos y las nuevas tecnologías impulsaron a la transformación del modelo agrícola argentino trayendo como consecuencias procesos de acidificación antrópica en la Región Pampeana. La transformación de planteos mixtos en planteos de agricultura intensiva con reemplazo de cultivos tradicionales como maíz (*Zea mays* L.) por soja, la expansión de la frontera agrícola con cultivo de soja de alto potencial de rendimiento en detrimento de la ganadería, y el incremento en el uso de fertilizantes nitrogenados de alto índice de acidez (Liebig et al., 2002; Vázquez & Pagani, 2015) generan que el proceso de acidificación en la Argentina en general y en la Región Pampeana en particular se esté acelerando y expandiendo. La remediación, a partir del encalado con productos que además de elevar el pH aporten bases como  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ , genera interrogantes acerca del impacto sobre las diferentes propiedades del suelo y su dinámica, según dosis aplicada, solubilización y características edafo-climáticas de cada sitio.

Partiendo de que el proceso de acidificación en la Región Pampeana se encuentra en expansión e intensificación (Carrizo et al. 2011; Cruzate & Casas 2012; García & Vázquez 2012; Herrera & Rotondaro 2019; Sainz Rosas 2019) resulta necesario remediarlo a partir del encalado. Ha sido reportado por numerosos autores el incremento del pH (Millán 2010; Carrizo 2014) y del rendimiento de especies leguminosas con dicha práctica (Gambaudo et al. 2007; Vázquez et al. 2010; Barbieri et al. 2015). La bibliografía internacional reporta diversidad de resultados del impacto del encalado sobre el suelo. Chan et al. (2007) hallaron disminución sobre la densidad aparente con dosis crecientes de enmienda. Vázquez et al. (2009) y Blomquist et al. (2017), observaron que según las dosis se favorecía la estabilidad estructural del suelo. Otros autores como Barbieri et al. (2015) que evaluaron diferentes dosis de enmiendas sobre la densidad aparente y la resistencia a la penetración o Henin (1958) que evaluó los efectos del encalado sobre la estabilidad estructural no observaron efectos de las enmiendas. Respecto a la materia orgánica algunos autores reportaron disminución del contenido cuando se realiza encalado, debido a mejoras en las condiciones para la proliferación de los microorganismos encargados de la mineralización (Manna et al., 2007; McCay et al., 2013; Lawrence et al., 2016). La respuesta de las propiedades edáficas mencionadas al encalado dependerá de las variables que determinan la capacidad reguladora de los suelos, como el nivel de acidez, mineralogía y composición del complejo de intercambio



(Bennardi et al. 2015; Vázquez & Pagani, 2015), y las características propias de cada sistema "suelo-clima-tecnología productiva" (Vázquez & Pagani, 2015).

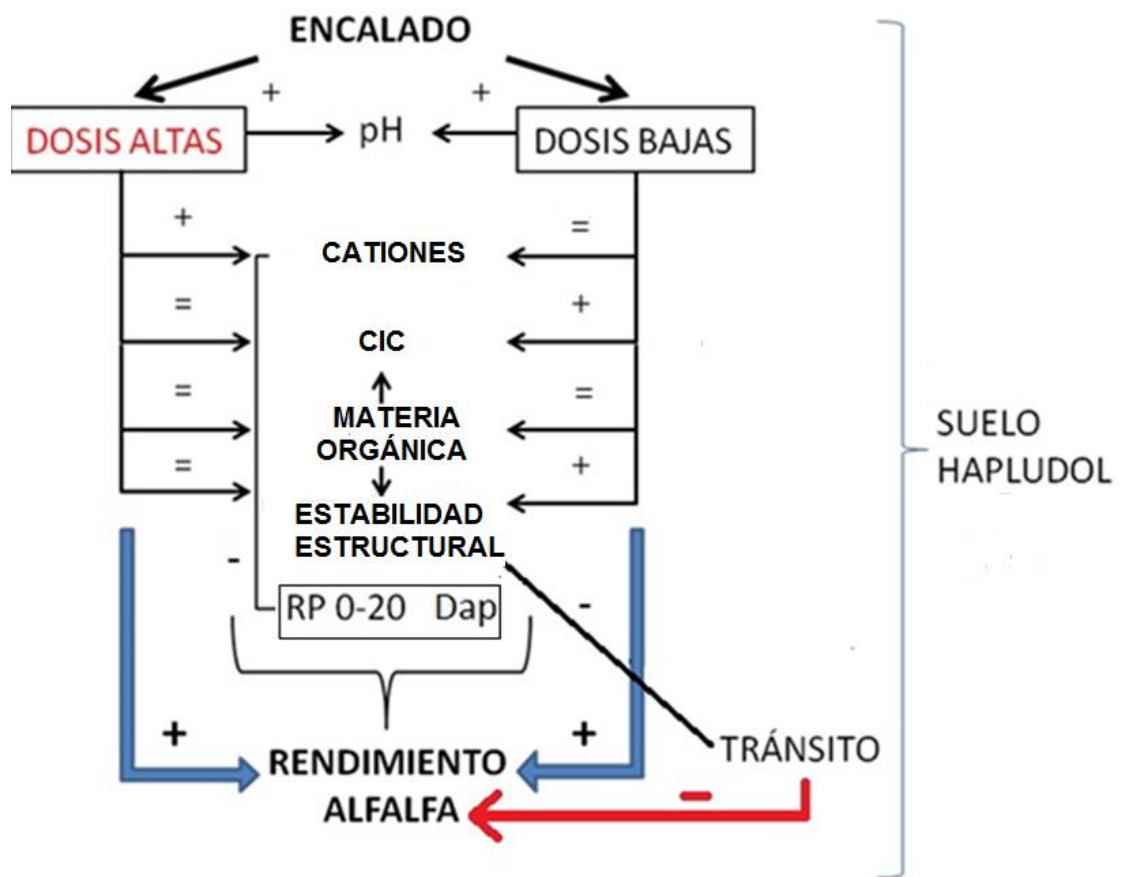
Al proceso de acidificación en la Región Pampeana se le suma otro de naturaleza física, la compactación de suelos por tránsito agrícola y adopción de la siembra directa (Al-Adawi & Reeder, 1996; Botta et al. 2006), del cual no se ha reportado información acerca de su respuesta con la adición de enmiendas.

En siembra directa la aplicación de productos correctores sólidos de naturaleza carbonatada constituye un problema, ya que no existe la posibilidad de la incorporación de los mismos a través de labranzas y se reduce notablemente la eficacia de la práctica. Algunos investigadores (Malavolta, 1992; Salvada Wadt et al., 1999; Farina et al., 2000; Hernández et al., 2003; Amaral et al., 2004; Vázquez et al., 2013) han propuesto la aplicación de dolomita o caliza, en forma conjunta con yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ).

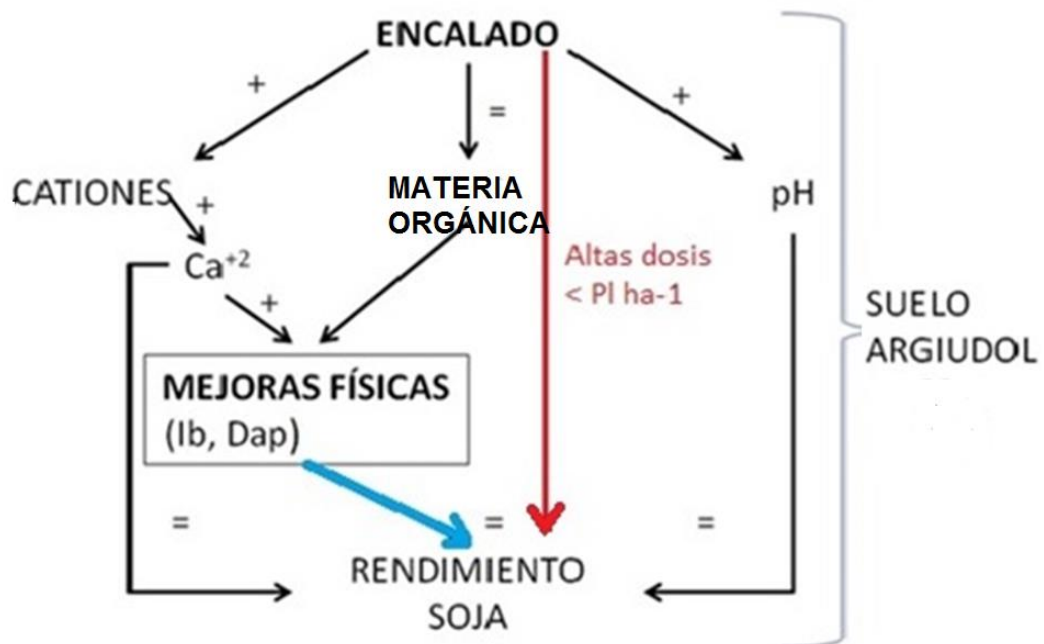
Hasta este momento se carecía de estudios que integraran de forma sistémica respuestas edáficas de naturaleza física, fisicoquímica, química y orgánica, con el rendimiento en diferentes condiciones edafo-climáticas en la Región Pampeana con adición de dosis crecientes de dolomita y agregado de yeso. Es por ello que se planteó como objetivo general de esta tesis, evaluar la incidencia del agregado de correctivos cálcicos sobre el complejo de cambio y la agregación de suelos pampeanos acidificados por la agricultura y sobre el rendimiento cuando es afectado por el tránsito agrícola.

Para poder cumplir con este objetivo se realizaron tres ensayos con adición de diferentes dosis de enmiendas dolomíticas, con y sin yeso, en diferentes suelos de la Región Pampeana. Posteriormente a la evaluación de propiedades físicas, químicas, fisico-químicas y orgánicas; y al rendimiento de especies leguminosas, estas variables se relacionaron entre sí para generar una visión sistémica de los efectos del encalado en suelos acidificados. En uno de los ensayos se incluyó tránsito agrícola para evaluar el efecto amortiguador de las enmiendas sobre el proceso de compactación en el suelo y el rendimiento.

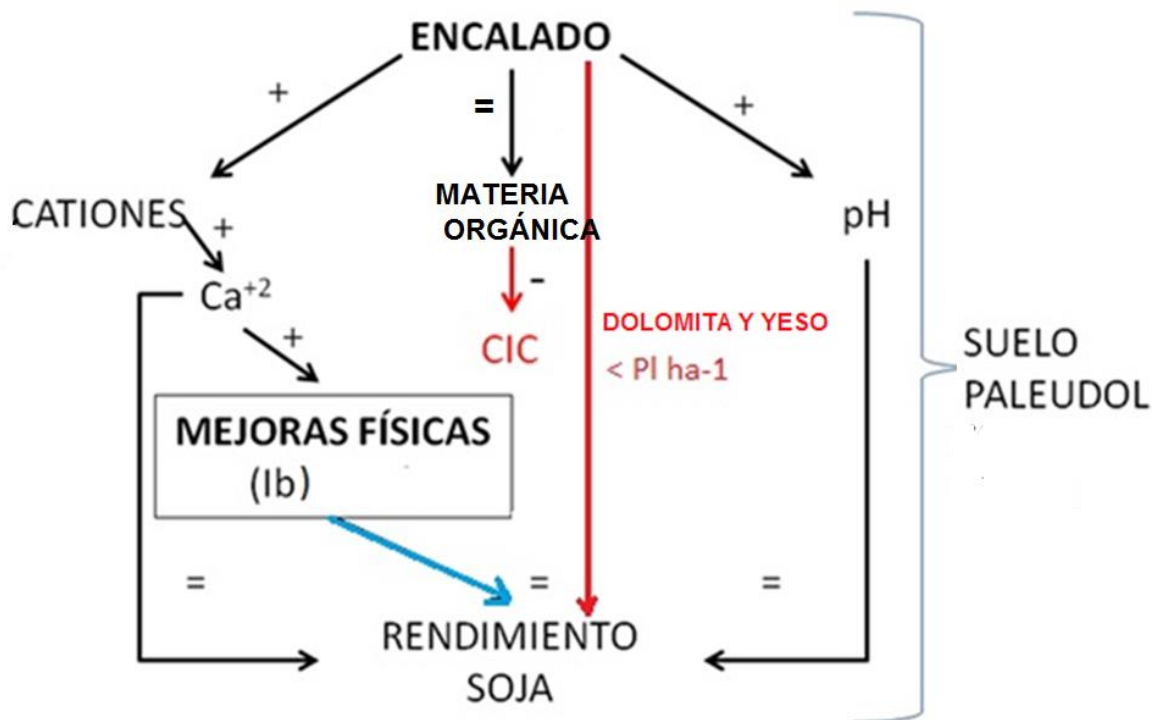
En las Figuras 5.1; 5.2 y 5.3 se observan los principales aportes de esta tesis acerca de la dinámica de las enmiendas en suelos acidificados y sus efectos sobre el rendimiento.



**Figura 5.1** Efectos del encalado sobre el suelo y rendimiento de alfalfa en un Hapludol con diferentes dosis de dolomita y tránsito agrícola.



**Figura 5.2** Efectos del encalado con diferentes dosis de dolomita sobre el suelo y rendimiento de soja en un Argiudol,



**Figura 5.3** Efectos del encalado con diferentes dosis de dolomita sobre el suelo y rendimiento de soja en un Paleudol.

Las enmiendas actuaron de forma diferencial sobre los tres suelos evaluados. En el *Hapludol*, que es un suelo más arenoso y de mayor fragilidad estructural, el efecto de las enmiendas fue mas claro, impactando sobre todo en su calidad física. La adición de enmiendas produjo aumento creciente de pH hasta los dos años evaluados. La mínima dosis de dolomita adicionada,  $1000 \text{ kg ha}^{-1}$ , produjo mayor capacidad de intercambio catiónica (CIC), que se relacionó con el contenido de carbono orgánico total. Este efecto produjo mejoras en la estabilidad estructural, mostrando un posible beneficio sobre las propiedades hidrofísicas como infiltración básica (Ib) y retención hídrica (RH). Si bien, dosis mayores no presentaron estos cambios, posiblemente debido al incremento en la actividad microbológica responsable de la mineralización, el mayor aporte de cationes estructurantes a partir de la adición de dosis crecientes de enmiendas habría provocado la disminución de la resistencia a la penetración (RP) hasta los 20 cm de profundidad. En el *Argiudol* y *Paleudol* la adición de enmiendas produjo aumentos de pH, calcio y las mejoras en las condiciones físicas edáficas se deberían al aporte directo de cationes.

En los tres suelos se observó incremento de pH y  $\text{Ca}^{+2}$  con la adición de dolomita y yeso, pero el magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ) y la CIC con dosis altas no presentaron dicho comportamiento.

Debido a los efectos mencionados de las enmiendas sobre el complejo de cambio, el carbono orgánico y las propiedades físicas, no existe evidencia suficiente para rechazar la **hipótesis 1** que propone que " *La aplicación de enmiendas cálcico-magnésicas y yeso al suelo produce efectos opuestos sobre las propiedades hidrofísicas y estructurales*

*superficiales debido a que incrementa el contenido de cationes intercambiables favoreciendo la agregación, pero estimula la mineralización de la materia orgánica. En los suelos de texturas más finas estos efectos se manifiestan con mayores dosis de enmiendas, por tener mayor capacidad reguladora".*

En el Hapludol el rendimiento de alfalfa se incrementó con la adición de dolomita y yeso, mientras que el rendimiento de soja en el Argiudol y el Paleudol no se modificó con la adición de enmienda, probablemente, debido a que las enmiendas redujeron la cantidad de plantas por hectárea de soja, lo que podría corregirse anticipando aún más el encalado respecto a la siembra. Si bien algunos componentes del rendimiento se incrementaron ante esta disminución, no fue suficiente para obtener incrementos de rendimiento. Debido al diferente comportamiento observado en los sitios de ensayo y especies vegetales, y que la disminución de plantas de soja podría minimizarse, no existe evidencia suficiente para rechazar la **hipótesis 2** que propone que *"El aporte de correctivos cálcicos al suelo aumentará el rendimiento de los cultivos leguminosos si se cumple un tiempo mínimo entre el encalado y la siembra, según la especie a implantar"*.

En el Hapludol, donde se evaluó el efecto de las enmiendas sobre propiedades físicas y rendimiento en situaciones de tránsito agrícola, se observó que la resistencia a la penetración, el diámetro medio ponderado y la materia seca de alfalfa se vieron afectadas por el tránsito. Debido a que las enmiendas pudieron mitigar el efecto del tránsito sobre el diámetro medio ponderado y la materia seca es que no existe evidencia suficiente para rechazar la **hipótesis 3** que propone que *"En suelos ácidos el agregado de enmiendas básicas a partir de la mejora en las propiedades hidrofísicas y estructurales superficiales, disminuirá el impacto negativo superficial del tránsito de maquinaria sobre el rendimiento de los cultivos"*.

## **5.2 UTILIDAD DE LA INFORMACIÓN GENERADA**

La información generada en esta tesis contribuye a seleccionar la dosis de dolomita para remediar la acidez en diferentes tipos de suelos y la conveniencia o no de adicionar yeso a partir de un enfoque sistémico, que no solo tiene en cuenta el rendimiento y las características de dotación del suelo, sino que también se enfoca en el abastecimiento y la dinámica de la materia orgánica, y las relaciones que de ello surgen.

Conocer los efectos y mecanismos de las enmiendas sobre propiedades químicas, fisico-químicas, físicas y el rendimiento según el suelo a tratar, es sumamente importante, ya que actúan de manera diferente y sus efectos no son proporcionalmente positivos con el incremento de la dosis.

En suelos arenosos, dosis bajas ( $1000 \text{ kg ha}^{-1}$ ) mostraron ser recomendables respecto a dosis altas ( $>2000 \text{ kg ha}^{-1}$ ), ya que beneficiaron al suelo física y químicamente, y el rendimiento fue semejante al obtenido con las dosis altas. En suelos de texturas más finas con mayor contenido de materia orgánica, las dosis altas generaron mejoras físicas, pero debe prestarse especial atención a que el transcurso entre el encalado y la siembra sea, mayor a 4 meses.

### 5.3 POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

De esta tesis surge:

- Efectos del encalado en capas sub-superficiales

Dado que se verificaron alteraciones en algunas propiedades físicas, pero no se pudieron relacionar con el encalado por falta de datos de propiedades químicas, sería de suma importancia profundizar los conocimientos sobre los efectos de las enmiendas en capas subsuperficiales,

- Efectos del encalado sobre la calidad de la materia orgánica, composición y actividad microbiológica, y su asociación con la estabilidad estructural.

Los resultados obtenidos en base a la dinámica del COT y su fraccionamiento físico (COP) con el encalado son promisorios en esta tesis, pero suficientes para mostrar efectos con la práctica e importancia como vínculo entre las propiedades físicas (abastecimiento) y químicas (dotación). Sería interesante profundizar en el estudio completo de los efectos del encalado sobre la calidad de la materia orgánica en diferentes suelos, sobre los cambios en la composición y actividad de los microorganismos del suelo y la incidencia de dichas modificaciones sobre la estabilidad estructural.

- Impacto del encalado a largo plazo en Argentina sobre el balance de macronutrientes

En esta tesis, si bien se realizó un estudio en el tiempo de los efectos del encalado sobre algunos nutrientes y la materia orgánica, se recomienda la evaluación de la frecuencia de aplicaciones con diferentes dosis sobre la estrategia de fertilización de N, P y S.

- Comparación de efectos edáficos y rendimiento de especies leguminosas con aplicaciones de dosis de enmiendas distribuidas en diferentes intervalos de tiempo.

Dado que las enmiendas utilizadas para la corrección de la acidez son de escasa solubilidad y que en esta tesis los resultados demostraron que dosis bajas producen efectos positivos en el suelo y en el rendimiento de alfalfa, y que dosis mayores con siembras posteriores próximas al encalado producían disminución en la emergencia de plantas de

soja, se propone comparar los efectos de la adición de dosis equivalentes de enmiendas con diferente periodicidad de aplicación sobre el suelo y el rendimiento de alfalfa y soja.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

Alakukku L.; P. Weiskopf; W.C.T. Chamen; F.G.J. Tjink; J.P. Van Der Linden; S. Pires; C. Sommer & G. Spoor. 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review Part. 1. Machine/soil interactions. *Soil and tillage research*, 73: 145-160.

Al-Adawi, S., & Reeder, R. 1996. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. *Transactions of the ASAE*, 39(5), 1641-1649.

Albuquerque J.A.; C.Bayer; P.R. Ernani.; A.L. Mafra & E.C.Fontana. 2003. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. *Rev. Brs. Ciênc. Solo* 27(5): 799-806

Almeida, J.P.F.; U.A. Hartwig; M. Frehner; J. Nösberger & A. Lüscher. 2000. Evidence that P deficiency induces N feedback regulation of symbiotic N<sub>2</sub> fixation in White clover (*Trifolium repens* L.). *J. Exp. Bot.* 51:1289-1297.

Alvear, M., C. Urrea; R. Huaiquilao; M. Astorga; F. Reyes. 2007. Actividades biológicas y estabilidad de agregados en un suelo del bosque templado chileno bajo dos etapas sucesionales y cambios estacionales. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 7(3): 38-50.

Amaral A.S.; I. Anghinoni; R. Hinrichs & I. Bertol. 2004. Movimentacao de particulas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 28 (2): 359-367.

Andrade FH & M. Ferreiro. 1996. Reproductive growth of maize, sun flower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crops Research*, 48: 155 –165

Andriulo A., B. Mary, J. Guérif. 1999. Modeling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*. 19: 365-377.

Arshad, M. & S.Martin. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88: 153-160.

ASAE Standards. 1993. Soil Cone Penetrometer (ASAE S 313.3), 40<sup>th</sup> ed. ASAE, St. Joseph, MI ASAE. American society of Agricultural Engineers. In Standard of Soil Cone Penetrometer. Ed. St. Joseph, Misuri. 611 p.

ASTM. 1975. D-4318 o D-423-66, BS 1377: 1975, Ensayo 2

ASTM. 1992. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

ASAE Standards. 1993. Soil Cone Penetrometer (ASAE S 313.3), 40<sup>th</sup> ed. ASAE, St. Joseph, MI ASAE. American society of Agricultural Engineers. In Standard of Soil Cone Penetrometer. Ed. St. Joseph, Misuri. 611 p.

Atwell, B. J. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environ. Exp. Bot.* 33(1): 27–40.

Balbuena, R.H.; A. Terminiello; J.A. Claverie; J.P. Casado & R. Marlats. 2000 Compactación del suelo durante la cosecha forestal. Evolución de las propiedades físicas. *Rev. Brs. de Engenharia Agrícola e Ambiental* 4(3): 453-459. Campina Grande, Brasil.

Baldock, J.A.; M. Aoyama; J.M. Oades; J. Susanto & C.D. Grant. 1994. Structural amelioration of South Australian Red-Brown carth using calcium and organic amendments. *Aust. J. Soil Res.* 32: 571-594.

Barber, S.A. 1984. Liming material and practices. In F. Adams (ed.) *Soil Acidity and Liming*. 2ed. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin. Agronomy. Monograph No 12:171-209.

Barbieri, P.A.; H. Echeverría; H.R. Sainz Rozas & J.P. Martínez. 2015. Soybean and wheat response to lime in no-till Argentinean mollisols *Soil and Tillage Research* 152 September 2015 (29-38).

Barrios, M., A. Buján, S. Debelis, A. Sokolowski, A. Blasón, H. Rodríguez, S. López, J. De Grazia, C. Mazo & M. Gagey. 2014. Relación biomasa de raíz/biomasa total de soja (*Glycine max*) en dos sistemas de labranza. *Terra Latinoamericana* 32(3): 221-230.

Benavidez, R. M. 1971. Mécanisme d'action du chaulage. Tesis doctoral. Faculté des Sciences de Paris. 65 pp. Tesis doctoral

Bengough, A. G. 1991. The penetrometer in relation to mechanical resistance to root growth. In: Smith, K. A., and CH. Mullins (eds). *Soil Analysis. Physical Methods*. Marcel Dekker, Inc. New York. pp: 431–445.

Benito, E., G. Giovannini & F. Diaz-Fierros. 1991. Effect of ph on the dispersión of various colloids in soil in its relationship with structure stability. *Agrochimica* 35: 34-45.

Bennardi, D., A. Díaz Gorostegui, L. Juan, G.J. Millán, A. Pellegrini & M.E. Vázquez. 2018. Evaluación de la capacidad buffer de suelos ácidos de la Región Pampeana. *Ciencia del suelo* 36: 30-38

Black, C.A. 1965 (Ed.). *Methods of soil analysis Part 2* pag. 1003 - 1009.

Blake, G.R. & K.H. Hartge. 1986. Bulk density. *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Minerological Methods*. Agronomy Monograph N° 9. Second edition, p. 363-376.

Blomquist, J., S. Magnus, E. Ararso & B. Kerstin. 2017. Structure liming enhances aggregate stability and gives varying crop responses on clayey soils, *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B, Soil & Plant Science*,

Board, J. 2000. Light interception efficiency and light quality affect yield compensation of soybean at low plant population. *Crop Science*. V 40 (5). p 1285- 1294. 3

Bolsa de cereales, 2019. <http://www.bolsadecereales.com/ver-cierre-de-campana-105>. Último acceso: 05-2019.

Bolsa de comercio Bs As. 2018. <http://www.bolsadecereales.com/imagenes/informes/2018-08/59-curitiba2018-bolsadecereales.pdf> Último acceso 11-2019

Bonde, TA & T Rosswal. 1987. Seasonal variation of potentially mineralizable nitrogen in four cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 1508-1514.

Bordeleau, L. M. & D. Prevost. 1994. Nodulation and nitrogen fixation in extreme environments. *Plant Soil* 161: 115–124.

Bossuyt, H., K. Deneff, J. Six, S.D. Frey, R. Merckx & K. Paustian. 2001. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Appl. Soil Ecol.* 16, 195–208

Botta, G.; D. Jorajuría; R. Balbuena & H. Rosatto. 2004. Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine max L.*) yields. *Soil and Tillage Research* 78: 53-58.

Botta, G.F., D. Jorajuria, H.G. Rosatto & C. Ferrero. 2006. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil & Tillage Research* 86: 9-14.

Botta, G.F., A. Tolon Becerra; F. Bellora & M. Tourn 2008. Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil & Tillage Research* 103: 381-386

Brink, R.H., P. Dubach & D.L. Lynch. 1960. Measurement of carbohydrates in soil hydrolysates with anthrone. *Soil Sci.* 89: 157-166.

Brockwell, J., A. Pilka & R. A. Holliday. 1991. Soil pH is a major determinant of the numbers of naturally-occurring *Rhizobium meliloti* in non-cultivated soils of New South Wales.

*Aust J Exp Agric* 31: 211–219.

Barrera, Arturo. 2011. *Nuevas Realidades, Nuevos Paradigmas: La nueva Revolución Agrícola*. COMICA, Enero-Julio 2011. IICA



Bonomelli, C., P. Gil & B. Schaffer. 2019. Effect of Soil Type on Calcium Absorption and Partitioning in Young Avocado (*Persea Americana* Mill.) Trees. *Agronomy* 9:837

Bonomelli, C. & R. Ruiz. 2010. Effects of Foliar and Soil Calcium Application on Yield and Quality of Table Grape cv. "Thompson Seedless". *Journal of Plant Nutrition*, 33:3, 299 – 314

Botou, M.; Yaelis, V.; Lazou, P.; Zantza, I.; Papakostas, K.; Charalambous, V.; Mikros, E.; Flemetakis, E.; Frillingos, S. 2020. Specificity profile of NAT/NCS2 purine transporters in *Sinorhizobium* (*Ensifer*) *meliloti*. *Mol. Microbiol.* 00:1–21.

Caride, C.; Piñeiro, G. & Paruelo, J. M. How does agricultural management modify ecosystem services in the Argentine Pampas? The effects on soil C dynamics *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 154, 23-33

Carrizo, M.E., M.A. Pilatti, C.A. Alesso & S. Imhoff. 2011. Atributos químicos de suelos argiudoles cultivados y no cultivados del departamento Las Colonias (Santa Fe). *Ciencia del Suelo* 29: 173-179.

Carrizo, ME, C.A. Alesso, H. Billoud & M.A. Pilatti. 2014. Comparación del poder de neutralización de enmiendas calcáreo-magnésicas en suelos de la Pampa llana santafesina. *Rev. FCA UNCUYO*. 2014. 46(2): 73-82. ISSN impreso 0370-4661. ISSN (en línea) 1853-8665.

Carter, M.R. 1988. Penetration resistance to characterize the depth and persistence of soil loosening in the tillage studies. *Can.J. SoilSci.* 68: 657-668

Ceccon, Eliane. 2008. La revolución verde tragedia en dos actos. *Ciencias*, Vol.1, Núm.91, julio septiembre. Universidad Autónoma de México. Pp. 21-29.

Chan, K.Y. & D.P. Heenan. 1998. Effect of lime ( $\text{CaCO}_3$ ) application on soil structural stability of a red earth. *Aus. J. Soil Res.* 36: 73-86.

Chan, K.Y., M.K. Conyers & B.J. Scott. 2007. Improved structural stability of an acidic hardsetting soil attributable to lime application. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38, 15–16.

Chaplain, V., P. Défossez, G. Delarue, J. Roger-Estrade, A.R. Dexter; G. Richard & D. Tessier. 2011. Impact of lime and mineral fertilizers on mechanical strength for various soil pHs. *Geoderma*, 167, 360-368.

Cheshire, M.V. 1979. Nature and origin of carbohydrates in soils. Academic Press, London, pp. 216.

Chico Ruiz, J. 2016. Efecto del aluminio y el pH en el crecimiento de raíces de *Phaseolus vulgaris* var. caballero en condiciones de laboratorio. *REBIOL* 2016; 36(2): 4-15, Julio-

Diciembre. Revista Científica de la Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo. Perú. ISSN: 2313-3171.

Chien, SH; Gearhart, MM; Collamer, DJ. 2001. Los fertilizantes Nitrogenados y la Acidificación del Suelo. Internacional Fertilizer Development Center.

Chien, S.H., M.M. Gearhart & D.J. Collamer. 2008. The effect of different ammoniacal nitrogen sources on soil acidification. *SoilSci.* 173:544-551.

CIAFA. 2018. Consumo de fertilizantes nitrogenados en Argentina.

Crossen, I.; Harris, M.J.; Arnold, N.F.; Yiğit, E. 2009. Modeled effect of changes in the CO<sub>2</sub> concentration on the middle and upper atmosphere: sensitivity to gravity wave parameterization. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics.* 71:1484-1496.

Comisión de Métodos Analíticos. 1973. Determinaciones Analíticas en Suelos. Normalización de métodos. Ed. Edaf. y Agrob.XXXII (11-12), 1153-1172.

Comisión Nacional de Riego. 2008. La compactación de los suelos agrícolas (origen, efectos, prevención y corrección). <http://www.abccagro.com/riego/compactación>. Consultado por última vez 20/2/16.

Costantini, A.; H. De-Polli; C Galarza; R. Pereyra Rossiello & R. Romaniuk. 2006. Total and mineralizable soil carbon as affected by tillage in the Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.*, 88: 274-278.

Corre, MD; R Schnabel & WL Stout. 2002. Spatial and seasonal variation of gross nitrogen transformations and microbial biomass in a Northeastern US grassland. *Soil Biol. Biochem.* 34: 445-457.

Correa, O. S. & A. J., Barneix. 1997. Cellular mechanisms of pH tolerance in *Rhizobium loti*. *World J Microbiol Biotechnol* 13: 153–157.

Costa, J.L. & P. Godz. 1999. Aplicación de yeso a un Natracuol del sudeste de la Pampa Deprimida. *Ciencia del Suelo* 17(2): 21-27.

Cox, W.J., J. H. Cherney, E. Shields. 2010. Soybeans Compensate at Low Seeding Rates but not at High Thinning Rates W. *Agronomy Journal.* V102 (4). p 1238- 1243.

Cruzate, G.A. & R. Casas. 2012. Extracción de nutrientes en la agricultura argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* No. 6:7-14.

Cruzate, G.A., y R.R. Casas. 2017. Balance de nutrientes en los suelos agrícolas de la Argentina en la campaña 2015/16. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 28:14-23.

- De Juan Valero, J. A. & Fabeiro Cortéz, C. 2003. Fundamentos de agricultura ecológica: Realidad actual y perspectiva. Pag 63-109 373 pág
- De León-González, F., M. M. Hernández S., J. Etchevers B., F. Payán Z., & V. Ordaz Ch. 2000. Short-term compost effect on macroaggregation in a sandy soil under low rainfall in the valley of Mexico. *Soil Tillage Res.* 56: 213-217
- Drobbs, H.T. & J.M. Yeomans. 1982. Capillary condensation and prewetting between spheres. *Gifu Shika Gakkai Zasshi*, 4: 10133-10138.
- Duan L, Y. Q. Zhang, Z. Wang, Y. Pan & T. Larssen. 2016. Acid deposition in Asia: emissions, deposition, and ecosystem effects. *Atmospheric Environment* 146: 55-69.
- Edmeades, D.C. 1980: Calcium-magnesium exchange equilibria in a range of New Zealand soils. *Australian journal of soil research* 18: 251-255.
- Emerson, W.W. & D.J. Greenland. 1990. Soil aggregates. Formation and stability pp. 485-511. In De Boodt, M.F., M.H.B. Hayes & A. Herbillon (eds.). *Soil colloids and their associations in aggregates*. NATO series. Serie B, Physics; V. 215. Plenum Press, New York, 1990.
- Espinoza, J. & E. Molina. 1999. Acidez y encalado de los suelos. Impofos primera edición. 42p.
- Fabrizzi, K.P.; F.O. García; J.L. Costa & L.I. Picote. 2005. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.*, 81: 57-69
- FAO. 2015. <http://www.fao.org/soils-portal/manejo-del-suelo/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-acidos/es/>. Último acceso: 11/2018
- FAO. 2017. El futuro de la alimentación y la agricultura Tendencias y desafíos. <http://www.fao.org/3/a-i6881s.pdf>. Último acceso: 11/2018
- Farina, M.P.W., P. Channon & G.R. Thibaud. 2000. A comparison of strategies for ameliorating subsoil acidity: I. Long-term growth effects. *SoilSci. Soc. Am. J.* 61: 646-651
- Galantini, J.A. 2005. Tecnologías en análisis de suelos. Separación y análisis de las fracciones orgánicas. Ed. Marban L. y Ratto S. AACS. 4(2):103-114.
- Gale, W.J., C.A. Cambardella & T.B. Bailey. 2000. Surface residue—and root-derived carbon in stable and unstable aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64 (1), 196–201.
- Gambaudo, S., L. Picco; A. Cervetti & P. Soldano. 2007. Encalado en soja. Experiencia en la campaña 2006/2007. Información técnica cultivo de verano campaña 2007.
- García, M.G. & M.E. Vázquez. 2012. Valoración económico-ecológica de la pérdida de nutrientes básicos de los suelos santafesinos. *Revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica (Revibec)* 19: 29-41.

- García Lamothe A., J. A. Quincke & Sawchik J. 2017. Respuesta del cultivo de soja al azufre en argiudoles típicos del sudoeste de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*. Volumen 21 2:44-53.
- Gelati P. & M. Vázquez. 2007. Extracción agrícola de bases en el norte de la provincia de Buenos Aires, Argentina: costo de su remediación e implicancias económicas. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica* Vol. 7: 117-129
- Geo INTA. [geointa.inta.gov.ar/visor/](http://geointa.inta.gov.ar/visor/). Consultado 2/3/2016.
- Giddens, J., & H. F. Perkins. 1960. Influence of molybdenum on growth and composition of alfalfa and distribution of molybdenum in a Cecil-Lloyd soil. *Soil Science Society of America Journal* 24 (6):496–497
- Gijsman, A.J. & R. J. Thomas. 1995. Aggregate size distribution and stability of an Oxisol under legume-based and pure grass pastures in the eastern Columbian savannas. *Australian Journal of Soil Research* 33: 153-165.
- Graham, P.H. & C.P. Vance. 2000. Nitrogen fixation in perspective: an overview of research and extension needs. *Field Crops Res.* 65: 93–106.
- Grant, C.D. & A.R. Dexter. 1990. Air entrapment and differential swelling as factors in the mellowing of moulded soil during rapid wetting. *Aust. J. Soil Res.* 28:361-369.
- Green, T.; L. Ahuja & J. Benjamín. 2003. Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma* 1986: 1- 25.
- Gregorich, E. G., M. R. Carter, D.A. Angers, C. M. Monreal & B. H. Ellert. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74:367–385
- Gregorich, EG; MH Beare; UF McKim & JO Skjemstad. 2006. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 975-985.
- Guerif, J. 1989. Effects of changing straw disposal on soil physical properties. In *Energy saving by reduced soil tillage*. Report EUR 11258 CEE. Pp 117-126
- Hakansson, I. & R.C. Reeder. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. *Soil and Tillage Research* 29(2–3): 277–304.
- Hamblin, A. P. 1985. The influence of soil structure on water movement crop growth and water uptake. *Adv. Agron.*, 38: 95-158
- Haynes, R.J. & R. Naidu. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nut. Cycl. Agroecosyst.* 51: 123-137

- Haynes, R.J. 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biol. Biochem.* 32: 211-219.
- Henin, S, G. Monnier & A. Combeau. 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.* 9: 73-92
- Herrera, A. & R. Rotondaro. 2019. Relevamiento de fertilidad de los suelos pampeanos ¿Qué nos dicen los análisis de suelo? *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 28.
- Hillel, D. 1982. *Introduction to Soil. Physics* Academic Press Inc. 1250 Sixth Avenue San Diego, California. 364 p.
- Høgh-Jensen, H. 2003. The effect of potassium deficiency on growth and N<sub>2</sub>-fixation in *Trifolium repens*. *Physiol. Plant.* 119:440-449
- Høgh-Jensen, H.; J.K. Schjoerring & J.F. Soussana. 2002. The influence of phosphorus deficiency on growth and nitrogen fixation of white clover plants. *Ann. Bot. - London.* 90:745-753
- Hocking, B., S.D. Tyerman, R.A. Burton & M. Gilliam. 2016. Fruit Calcium: Transport and Physiology. *Frontiers in Plant Science* Vol 7.
- Hossne García, A.J.; G.E. Paredes Barrios; R.R. Carvajal Poreza; E.J. Santaella Barreto & J. P. Malaver Aguiar. 2012. Coherencia interpartículas de un suelo agrícola franco arenoso de sabana. Monagas, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola* 12 (2): 313-323. 2012
- Imhoff, S. 2000. Aplicaciones de la curva de resistencia en el control de la calidad física de un suelo bajo pastoreo. *Revista Brasileña de Investigación Agrícola*, Brasilia, v.35, p.1493-1500
- INTA. 1989. *Degradación de los Suelos en el Norte de la Región Pampeana*. Publicación Técnica N° 6. Proyecto de Agricultura Conservacionista, 1989.
- INTA Informa. 2016. Región Pampeana: suelos más ácidos y con menos micronutrientes <https://inta.gob.ar/noticias/region-pampeana-suelos-mas-acidos-y-con-menos-micronutrientes>. Último acceso: 11/2018
- INTA Balcarce y la Asociación Fertilizar. 2019. Los suelos de la región pampeana presentan un elevado estado de acidificación. Conferencia AAPRESID 2019.
- IRAM. 1997. Instituto Argentino de Normalización. Norma N° 22451. Materiales calcáreos para uso agropecuario. Requisitos y métodos de ensayos. 18 p.
- Iturri, L.A.; D.E. Buschiazzi & M. Díaz-Zorita. 2011. Acidification evidences of notilled soils of the central region of Argentina. *Ciencia del Suelo.* 29(1), 13-19.

- Iturri, L. 2015. Evidencias de acidificación de suelos loésicos agrícolas de Argentina. Tesis de doctorado. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Jolivet, C., D.A. Angers, M.H. Chantigny, F. Andreux & D. Arrouays. 2006. Carbohydrate dynamics in particle-size fractions of sandy spodosols following forest conversion to maize cropping. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 2834-2842.
- Jorajuría, D. & L. Draghi. 1997. The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. *Journal of Agricultural Engineering Research* 66(4): 261-265.
- Karley A. & White P.J. 2009. Moving Cationic Minerals to Edible Tissues: Potassium, Magnesium, Calcium. *Curr Opin Plant Biol*
- Kinraide, T.B., 2003. Toxicity factors in acidic forest soils: attempts to evaluate separately the toxic effects of excessive  $Al_3^+$  and  $H^+$  and in sufficient  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$  upon root elongation. *Eur. J. Soil Sci.* 549, 323–333.
- Kraemer, F.B.; P.L. Fernández; M.B. Ceddia; C.I. Chagas & H. Morras. 2016. Efectividad de distintos pretratamientos en el análisis granulométrico de tres suelos contrastantes de la región pampeana. *Ciencia del suelo* 34 (1): 163-172. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo
- Lal, R. 1996. Axle load and tillage effects on crop yields on a Mollic Ochragualf in Northwest Ohio. *Soil and Tillage Research* 37: 143-160.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627.
- Lanfranco, J.W. 1988. Carta de suelos de la Estación Experimental Julio Hirschhorn. Inédito.
- Lawrence GB, Burns DA, Riva-Murray K. 2016. A new look at liming as an approach to accelerate recovery from acidic deposition effects. *Sci Total Environ.* Aug 15; 562:35-46.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* 47: 425-437.
- Lemenih M., E.Karltonb & M. Olssonb. 2004. Assessing soil chemical and physical property responses to deforestation and subsequent cultivation in small holders farming system in Etiopía. *Agriculture, Ecosystems&Environment* 81:103-112.
- León, R.J.C., D. Bran, M. Collantes, J.M. Paruelo & A. Soriano 1998. Grandes unidades de vegetación de la Patagonia. *Ecología Austral* 8: 125-144.
- Liebig, M.A., G.E. Varvel, J.W. Doran & B.J. Wienhold. 2002. Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the western corn belt. *SoilSci. Soc. Am. J.* 66: 596-601.

López-Martínez, J.D., G. Gutiérrez-Puente & S. Berúmen-Padilla. 2000. Labranza de conservación usando coberturas de abono orgánico en alfalfa. *Rev. TERRA* 18: 161-171.

Maathuis, F. J. 2009. Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3), 250–258.

Manna, M.C., A. Swarup, R.H. Wanjari, B. Mishra & D.K. Shahi. 2007. Longterm fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields. *Soil & Tillage Research* 94 397–409.

Manuel-Navarrete, D.; M. Blanco; M. Díaz Zorita; D. Ferraro; H. Herzer; P. Larreta; M.R. Murmis; G.P. Podestá; J. Ravinobich; E.H. Satorre; F. Torres & E. F.Viglizzo. 2009. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas. *Environ Dev Sustain* 11, 621–638 (2009).

Marschner, B., Waldemar Wilczynski, A. 1991. The effect of liming on quantity and chemical composition of soil organic matter in a pine forest in Berlin, Germany. *Plant Soil* 137, 229–236.

Masola, M.J.; M.E. Carrizo; C.A. Alesso & S. del C. Imhoff. 2019. Lotes-nocheros y encalado: una alternativa para recuperar un Argiudol degradado de Santa Fe. *Ciencia del suelo* vol. 37, N° 1, 2019, pág 21-25.

McCay, T. S., Cardelús, C. L., & Neatrou, M. A. (2013). Rate of litter decay and litter macroinvertebrates in limed and unlimed forests of the Adirondack Mountains, USA. *Forest Ecology and Management*, 304, 254–260.

Meena, R.S., V. Vijayakumar; G.S. Yadav & T. Mitran. 2018. Response and interaction of *Bradyrhizobium japonicum* and arbuscular mycorrhizal fungi in the soybean rhizosphere. *Plant Growth Regul* 84, 207–223.

Mengel K. & E.A. Kirby. 2000. *Principios de nutrición vegetal*. 4ª Edición. 1º en español. Instituto Internacional de la Potasa. Basilea, Suiza., pp. 607.

Millán, G., M. Vázquez, A. Terminiello & D. Santos Sbuscio. 2010. Efecto de las enmiendas básicas sobre el complejo de cambio en algunos suelos ácidos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 28(2): 131-140.

MINAGRI. 2019. <https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/estimaciones/> Último acceso: 05/2019

Mora, M.L., M. Alfaro, P. Williams, W. Stehr & R. Demanet. 2004. Effect of fertilizer input on soil acidification in relation to growth and chemical composition of a pasture, and animal production. *R. C. Suelo Nutr. Veg.* 4(1):29-40

- Mulyani A. 2006. Potential of dry acid soil for agriculture development. *Warta Penelitian dan Pengembangan Pertanian* 28: 16-17.
- Návar, J. & T. Synnott. 2000. Soil infiltration and land use in Linares, N.L., México. *Terra* 18: 255-262.
- Nelson, P.N. & J.M. Oades. 1998. Organic matter, sodicity and soil structure, p. 67-9. In M.E. Summer and R. Naidu (eds) *Sodic soils*. Oxford University Press, New York.
- Nicolodi, M.; I. Anghinoni & C. Gianello. 2008. Indicadores da acidez do solo para recomendação de calagem no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.237-247.
- Noyes, P.D.; McElwee, M.K.; Miller, H.D.; Clark, B.W.; Van Tiem, L.A.; Walcott, K.C.; Erwin, K.N.; Levin, E.D. 2009. The toxicology of climate change: environmental contaminants in a warming world. *Environment international*. 35:971-986.
- Ohep, F.; M. Spiridione Pudzzar & C. Colmenárez. 2002. *Bioagro*. 14(1): 37-45.
- Olivera, M.; N. Tejera; C. Iribarne; A. Ocaña & C. Lluch. 2004. Growth, nitrogen fixation and ammonium assimilation in common bean (*Phaseolus vulgaris*): effect of phosphorus. *Physiol. Plant*. 121:498-505.
- Orret, F.M., L.E. Scriven & A.P. Rivas. 1975. Pendular rings between solids, meniscus properties and capillary force. *J. Fluid Mech*. 67 (4): 723-742.
- Osorno, H. 2012. Mitos y realidades de las cales y enmiendas en Colombia. *Maestría en Ciencias, geomorfología y suelos*. Universidad de Medellin, Colombia, 70 p.
- Panigatti, J.L. 2010. Argentina: 200 años, 200 suelos. Ediciones INTA: Buenos Aires. pp 31-158
- Pardi, M. 2017. Datos meteorológicos de la Estación Experimental "Ing. Agr. Julio Hirschhorn" y la cátedra de Climatología y Fenología Agrícola de la FCAYF, U.N.L.P.
- Patiño G.R.; Y. J. Puentes-Páramo & J. C. Menjivar-Flores. 2017. Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria, Mosquera (Colombia)*, 18(3):529-541
- Pellegrini, A.E., Lanfranco, J.W. y Vázquez, M.E. 2005. Dinámica de los nutrientes básicos en alfalfa con el uso de enmiendas. *Revista Argentina de Producción Animal* 25: 137-141 (2005)
- Pellegrini, A.E., F.A. Sucunza, G. Millán & M.E. Vázquez. 2015. Comparación de metodologías analíticas para diagnosticar suelos con enmiendas básicas en el ámbito templado argentino. *Cienc suelo Argentina* 34(1): 1-12, 2016



- Pérez-Brandán, C; J. L. Arzeno; J. Huidobro; B. Grümberg; C. Conforto; S. Hilton; G. D. Bending; J. M. Meriles; S. Vargas-Gil. 2012. Long-term effect of tillage systems on soil microbiological, chemical and physical parameters and the incidence of charcoal rot by *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid in soybean. *Crop protection*. Volume (40): 73-82
- Perroux, K.M. & I. White. 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1205-121.
- Reboratti, Carlos. 2010. Un mar de soja: la nueva agricultura en Argentina y sus consecuencias. *Revista de geografía Norte Grande*, (45), 63-76.
- Renella, G.; L. Landi; F. Valori & P. Nannipieri. 2007. Microbial and hydrolase activity after release of low molecular weight organic compounds by a model root surface in a clayey and a sandy soil. *Appl. Soil Ecol.* 36, 124-129
- Rousk, J.; E. Baath; P.C. Brookes; C.L. Lauber; C. Lozupone; J.G. Caporaso; R. Knight & N. Fierer. 2010a. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in arable soil. *ISME J.* 4, 1340-1351.
- Rousk, J.; P.C. Brookes & E. Baath. 2010b. Investigating the mechanisms for the opposing pH-relationships of fungal and bacterial growth in soil. *Soil. Biol. Biochem.* 42, 926-934
- Rice, R.W. 2007. The physiological role of minerals in the plant. In: *Mineral nutrition and plant disease* (Datnoff, L.E., Elmer, W.H., Huber, D.M., eds). Chapter 2. The American Phytopathological Society, St. Paul, Minnesota, USA. pp. 9-30.
- Richards, L.A. 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science* 66(2):105-110
- Richter M. 1980. Mejoras en la determinación de amonio por destilación. *Rev.Fac.Agronomía* 1(2): 1 - 9.
- Richter, M. Von Wistinghausen, E. 1981. Unterscheidbarkeit von Humusfraktionen in Boden bei unterschiedlicher Bewirtschaftung. *Z. Pflanzenernaehr Bodenk.* 144. 395-406.
- Rillig, M., P. Ramsey, S. Morris & E. Paul. 2003. Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to soil-use change. *Plant Soil* 253(2): 293-299.
- Rosell, RA; JC Gasparoni & JA Galantini. 2001. Soil organic matter evaluation. In: R Lal et al. (eds). *Assessment Methods for Soil Carbon*. Serie *Advances in Soil Science*, CRC Press, Boca Raton, FL. Pp. 311-322.
- Roth, C.H. & M.A. Pavan. 1991. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. Ed. Elsevier. *Geoderma* 48: 351-361

Sadeghian Khalajabadi, S. & C. Díaz Marín. 2020. Corrección de la acidez del suelo: efectos en el crecimiento inicial del café. *Revista Cenicafé*, 71(1), 21-31.

Schulze, J.; G. Temple; S.J. Temple; H. Beschow & C.P. Vance 2006. Nitrogen fixation by white lupin under phosphorus deficiency. *Ann. Bot. London*. 98:731-740.

Sainz Rozas, H., H.E. Echeverría & H.P. Angelini. 2011. Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana argentina. *Informaciones Agronómicas*. 2:1-7.

Sainz Rozas, H.; M. Eyherabide; H.E. Echeverría; P. Barbieri; H. Angelini; G.E. Larrea; G. Ferraris & M. Barraco. 2013. Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? *Simposio Fertilidad 2013*.

Sainz Rosas, H. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. *Simposio de fertilidad 2019*. Rosario.

Salvada Wadt, P.G. & L.H. De Oliveira Wadt 1999. Movimentação de cátions em amostras de um Latossolo Vermelho- Amarelo incubadas com duas fontes de cálcio. *ScienciaAgricola* 56 (4): 1157-1164

Sá Mendonça, E; D Rowell & A Martins da Silva. 2006. Effect of pH on the development of acidic sites in clayey and sandy loam Oxisol from the Cerrado Region, Brasil. *Geoderma* 132:131-142

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.

Sasal, C. 2012. Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua. Tesis Doctoral. Área Ciencias Agropecuarias. Escuela para Graduados FAUBA. 144 p. Tesis doctoral

Sasal, M.C., A.E. Andriulo, & M.A. Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil & Tillage Research*. 87: 9–18.

StatSoft Inc. 2005. STATISTICA (data analysis software system), version 7.1. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).

Schindler, F., E. Mercer & J. Rice. 2007. Chemical characteristics of glomalin-related soil protein (GRSP) extracted from soils of varying organic matter content. *Soil Biol. Biochem.* 39: 320-329.

- Sharma, D.P. 1986. Effect of gypsum application on long term changes in soil properties and crop growth in sodic soils under field conditions. *J. Agron. Crop Sci.* 156(3): 166–172.
- Sherman, L.A., & Barak, P., 2000. The solubility and dissolution kinetics of dolomite in Ca–Mg–HCO<sub>3</sub>/CO<sub>3</sub> solutions at 25 °C and 0.1 MPa carbon dioxide. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 1959 – 1968.
- Sidhu, D. & S.W. Duiker. 2006. Soil compaction in conservation tillage: Crop impacts. *Agron. J.* 98: 1257-1264.
- Six, J., R.T. Conant, A. Paul & K. Paustian 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241: 155-176.
- Strudley, M.W.; T.R. Green & C.A. Ascough II. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil Till. Res.*, 99: 4-48.
- Studdert, G., G. Domínguez, M. Eiza, C. Videla & H. Echeverría. 2008. Materia orgánica particulada y su relación con la fertilidad nitrogenada en el sudeste bonaerense. p.53-70. En: *Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina*. Ed. J Galantini. Ed. Universidad Nacional del Sur. Argentina. 308 p
- Sumner, M.E., P.M.W. Farina & V.J. Hurst. 1978: Magnesium fixation-a possible cause of negative yield responses to lime applications. *Comunicação*.\ in soil science lind plant llnalysis 9: 995-1007.
- Tan, Z, R. Lal, L. Owens & R.C. Izaurralde. 2007. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. *Soil & Tillage Research* 92: 53-59
- Taylor, H.M. & L.F. Ratliff .1969. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. *SoilScience* 108: 113-119.
- Tessier, D. 2000. Material transmitido de forma personal a Cosentino D.J. Co-director de esta tesis
- Threadgill, E.D. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *Transaction of the ASAE* 25(4): 859-963
- Tisdall, J.M. & J.M. Oades. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*33: 141-163.
- Torres Duggan, M., R. Melgar, M.B. Rodriguez, R.S. Lavado & I.A. Ciampitti. 2012. Sulfur fertilization in the argentine Pampas region: a review. *Agronomía & Ambiente*, 32(1-2) 61- 73.

Torres Duggan, M.; M.B. Rodríguez & J.A. Lamelas. 2013. El azufre en los agro-ecosistemas: corrección de suelos y fertilización de cultivos. Tecnoagro and Argentinean Soil Science Association.

Unger, P.W. 1993. Paratill effects on loosening of Torric Paleustoll. *Soil Till. Res.* 26: 1 -9.

Van Bemmelen, J.M. 1890. Über die Bestimmung des Wassers, des Humus, des Schwefels, der in den colloidalen Silikaten gebundenen Kieselsäure, des Mangans u. s. w. im Ackerboden. *Die Landwirtschaftlichen Versuchs-Stationen* 37: 279-290.

Van Rensburg, H; A Claassens & D Beukes. 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. E. 2005. Acidez del suelo. En: *Tecnologías en análisis de suelos*. Liliana Marbán y Silvia Ratto. Buenos Aires: AACCS. pp: 69-88.

Vázquez, M. 2007. Calcio y Magnesio, Acidez y alcalinidad de suelo. EN: *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Ed: Echeverría, H.E y García, F.O. Cap. 8: 161:188. 175 p.

Vázquez, M., A. Terminiello, A. Duhour, M. García & F. Guilino. 2009. Efecto de correctores de acidez sobre las propiedades físicas de un Argiudol típico de la pradera pampeana. *Ciencia del Suelo* 27(1): 67-76.

Vázquez, M., A. Terminiello, A. Casciani, G. Millán, P. Gelati, F. Guilino, J. García, J. Kostirja & M. García. 2010. Evaluación del efecto de enmiendas básicas sobre la producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.) y propiedades edáficas en ámbitos templados argentinos. *Rev. Ciencia del Suelo* 28(2):131-140.

Vázquez, M., A. Terminiello, A. Casciani, G. Millán, D. Cánova, P. Gelati, F. Guilino, A. Dorronzoro A., Z. Nicora, L. Lamarche y M. 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. *Rev. Ciencia del Suelo* 30(1):43-56.

Vázquez, M., A. Terminiello, G. Millán, I. Daverede & E. Baridón. 2013. Dynamics of soil liming materials broadcast on a Thaptoargic Hapludoll soil in Argentina. *Rev. Ciencia del Suelo*. 31(1): 23-32.

Vázquez, M. & A. Pagani. 2015. Calcio y magnesio. Manejo de fertilización y enmiendas en: *fertilidad de suelos y fertilización de cultivos* 2º edición. Editores Echeverría E. y García F. Ed. INTA Argentina, p. 317-350. 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.

- Viglizzo, E. & E. Jobbágy (Editores). 2010. Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental. Ediciones INTA, Buenos Aires. 102 pp.
- Villar, M. M. & F. A. Ferrer. 2005. Técnicas de medida y control del agua en el suelo. *Agua y Agronomía* (1):25-86.
- Vivas, H. & O. Quaino. 1999. Fosforo y enmienda cálcica para la producción de alfalfa en dos suelos del centro este de Santa Fe. 1988/99
- Vivas, H. S. & H. Fontanetto. 2003. Fósforo, azufre y calcio en la producción de soja en el Departamento San Justo 2002/2003. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información Técnica de cultivos de verano. Campaña 2003. Publicación N° 100.
- Vivas, H. S. 2004. Fertilización con fósforo y azufre para la producción de Alfalfa en el centro de Santa Fe. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 22-25/6/2004. Entre Ríos, Paraná.
- Walkley, A. & I.A. Black. 1934. An examination of the Degjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromi acid titation method. *J. Amer. Soc. Agron.* 24, 256-275.
- Wander, M. 2004. Soil organic matter fractions and their relevance to soil function. In: K Magdoff & RR Weil (eds) *Soil organic matter in sustainable agriculture*. Pp. 67-102. CRC Press, Boca Raton, Florida, EEUU.
- Wang, X; C Tang; S Mahony; JA Baldock & CR Butterly. 2015. Factors affecting the measurement of soil pH buffer capacity: approaches to optimize the methods. *European Journal of Soil Science* 66:53–64.
- Whalen, J., C. Chang, G. Clayton & J. Carefoot. 2000. Cattle manure amendments can increase the pH of acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:962-966.
- White PJ, Broadley M. 2003. Calcium in plants. *Ann Bot*; 92:487– 511
- Winkler, A. & M. Knoche. 2019. Calcium and the physiology of sweet cherries: A review. *Scientia Horticulturae* 245: 107–115
- Wright S.F. & A. Upadhyaya. 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein from arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science* 161: 575-586.
- Wright S.F., M. Franckee-Snyder, J.B. Morton & A. Upadhyaya. 1996. Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. *Plant & Soil* 181: 193-203.

Wright, S.F. & A. Upadhyaya. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscularmycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 198: 97–107.

Wright S.F.; J.L. Starr & I.C. Paltineanu. 1999. Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage management transition. *Soil Science Society of America Journal* 63:1825-1829.

Wuddivira, M.N. & G. Camps-Roach. 2007. Effects of organic matter and calcium on soil structural stability. *Eur. J. Soil Sci.* 58, 722–727.

Xu, R; A Zhao; J Yuan & J Jiang. 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.

Yong, R. N., B.P. Warkentin, Y. Phadungchewit & R. Galvez. 1990. Buffer capacity and lead retention in some clay. *Water, Air, and Soil Pollution.* 53: 53-67.

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

Zárate M.A. 2003. Loess of southern South America, *Quaternary Science Reviews*, Vol. 22, pp. 1987-2006.