

Universidad de la Empresa  
Facultad de Ciencias Agrarias

**“EFECTO DE LA APLICACIÓN DE CORRECTORES DE LA  
ACIDEZ DEL SUELO EN UN SISTEMA PASTORIL INTENSIVO”**

Emiliano Eugui Oliver  
Gabriel Geymonat Rostán

Tutor: Ing. Agr. PhD J. Andrés Quincke  
Cotutor: Ing. Agr. PhD Verónica Ciganda

Tesis presentada como  
uno de los requisitos para obtener  
el título Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO  
2019



# **EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE CORRECTORES DE LA ACIDEZ DEL SUELO EN UN SISTEMA PASTORIL INTENSIVO**

Emiliano Eugui Oliver  
Gabriel Geymonat Rostán

**Tutor:**

Ing. Agr. PhD J. Andrés Quincke

**Cotutor:**

Ing. Agr. PhD Verónica Ciganda

MONTEVIDEO

2019

## **HOJA DE APROBACIÓN**

Tesis aprobada por:

-----  
Nombre completo y firma

-----  
Nombre completo y firma

-----  
Nombre completo y firma

Nota final: -----

Fecha: -----

Autores: -----

Emiliano Eugui Oliver

-----  
Gabriel Darío Geymonat Rostán

## **AGRADECIMIENTOS**

A los Ing. Agr. Andrés Quincke y Verónica Ciganda por darnos la oportunidad de poder realizar el trabajo final bajo su tutoría.

A la empresa Industria Sulfúrica S.A. por su apoyo para poder desarrollar este trabajo de investigación.

Al Ing. Agr. Luis Mullin, gran referente y orientador en todo el transcurso del experimento.

A la Ing. Agr. Elena Patrón, por su apoyo en todo momento además de ser desencadenante del presente trabajo.

Al Sr. Oscar Amestoy quien nos permitió realizar el ensayo en su establecimiento.

Al equipo docente de facultad, pero en especial a Ernesto Elgue y a Ximena Lagomarsino por su gran ayuda en la elaboración del informe.

A nuestras familias y amigos por el incondicional apoyo.

## **TABLA DE CONTENIDO**

HOJA DE APROBACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
TABLA DE CONTENIDO .....	V
ÍNDICE DE TABLAS .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
1. RESUMEN .....	1
2. SUMMARY .....	3
3. INTRODUCCIÓN .....	5
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
4.1. Limitantes en suelos ácidos.....	6
4.2. Situación mundial .....	8
4.3. Situación en Uruguay .....	10
4.4. La práctica del encalado.....	10
4.5. Nuevas tecnologías .....	12
4.6. Características del material corrector .....	13
4.7. Resultados nacionales.....	14
5. OBJETIVOS .....	17
5.1. Objetivo general.....	17
5.2. Objetivos específicos.....	17
6. MATERIALES Y MÉTODOS .....	17
6.1. Ubicación e historia del sitio .....	17
6.4. Diseño de investigación.....	19
6.5. Variable de respuesta en planta y suelo.....	21

6.6.	Secuencia de labores y actividades del experimento .....	24
6.7.	Técnica de procesamiento y análisis de datos .....	25
7.	RESULTADOS.....	26
7.1.	Precipitaciones .....	26
7.2.	Resultados de suelo .....	27
7.2.1.	Efectos sobre el pH del suelo.....	27
7.3.	Resultados de forraje.....	36
7.3.1.	Efecto sobre producción y calidad de forraje.....	36
7.3.2.	Disponible.....	37
8.	DISCUSIÓN .....	42
8.1.	Suelo .....	42
8.1.1.	pH en agua y en KCl .....	42
8.1.2.	Relación con % de saturación de bases totales. ....	45
8.2.	Forraje .....	46
8.2.1.	Forraje disponible.....	46
8.2.2.	Forraje remanente.....	49
8.2.3.	Forraje consumido.....	50
9.	CONCLUSIONES.....	51
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	52
11.	ANEXO .....	60

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Cantidades aproximadas de caliza necesarias para modificar de 5,5 a 6,5 el pH de la capa arable de suelos de diferentes texturas (Donahue, citado por Rabuffetti 2017).....	9
<b>Tabla 2.</b> Efecto del aumento del pH de los horizontes superficiales de suelos originalmente fuertemente ácidos en la cantidad de Al intercambiable, bases totales y capacidad de intercambio catiónica efectiva, CICE. (Rabuffetti 2017) .....	12
<b>Tabla 3.</b> Equivalentes químicos de materiales de encalados puros (Espinoza y Molina 1999) .....	13
<b>Tabla 4.</b> Eficiencia granulométrica de los materiales calcáreos para uso agrícola (Vázquez y Pagani, 2015) .....	14
<b>Tabla 5.</b> Síntesis de los principales resultados sobre el efecto del encalado en pasturas provenientes de la experimentación llevada a cabo en la zona noreste del Uruguay durante el período 1978-1990 (Rabuffetti 2017) .....	15
<b>Tabla 6.</b> Síntesis de los principales resultados sobre el efecto del encalado en pasturas provenientes de la experimentación llevada a cabo en la zona sur y litoral del Uruguay durante el período 1978-1990 (Rabuffetti 2017).....	16
<b>Tabla 7.</b> Descripción de los horizontes del perfil del suelo .....	19
<b>Tabla 8.</b> Tratamientos .....	20
<b>Tabla 9.</b> Enmiendas.....	20
<b>Tabla 10.</b> Laboratorios y determinación de parámetros .....	21
<b>Tabla 11.</b> Fecha de muestreo de suelo.....	22
<b>Tabla 12.</b> Valores de análisis de suelo para muestreo de Marzo según profundidad de muestreo.....	22
<b>Tabla 13.</b> Resumen de los análisis de la varianza para la variable pH al agua y al cloruro de potasio .....	27

<b>Tabla 14.</b> Valores promedios de pH al agua medido en el suelo para los distintos tratamientos según profundidad de muestreo .....	28
<b>Tabla 15.</b> Valores promedios de pH al cloruro de potasio medido en el suelo para los distintos tratamientos según profundidad de muestreo ....	30
<b>Tabla 16.</b> Porcentaje de saturación de bases totales y separación de medias para los distintos tratamientos.....	34
<b>Tabla 17.</b> Porcentaje de saturación de K, Ca y Mg, y separación de medias para los distintos tratamientos según profundidad de muestreo .....	36
<b>Tabla 18.</b> Resumen de análisis de la varianza de los parámetros materia seca, proteína y energía en forraje disponible, remanente y consumido .....	37
<b>Tabla 19.</b> Materia seca disponible y acumulada en kg/ha y separación de medias .....	38
<b>Tabla 20.</b> Proteína disponible acumulada en kg/ha y separación de medias .....	39
<b>Tabla 21.</b> Energía neta de lactación de Mcal/ha disponible acumulada .....	40
<b>Tabla 22.</b> Promedio de materia seca, proteína y energía acumulado en el forraje remanente y consumido en los cuatro cortes del período experimental .....	42

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 1.</b> Disponibilidad de nutrientes en el suelo en función de su pH (Lalavolta, citado por Prochnow et al, 2009).....	6
<b>Figura 2.</b> Rendimiento relativo de cultivos en rotaciones de maiz, cereales y leguminosas a distintos valores de pH del suelo (Estación Agrícola Experimental de Ohio, citado por Casanova 2015).....	7
<b>Figura 3.</b> Rango óptimo de pH para diferentes especies forrajeras (Sierra, 1982).....	8
<b>Figura 4.</b> Precipitaciones totales mensuales (mm/mes) para el período diciembre 2017 a enero 2019, y promedios históricos (INUMET 2019) .....	26
<b>Figura 5.</b> Evolución del pH al agua en el estrato de 0 a 5 cm para todos los tratamientos.....	29
<b>Figura 6.</b> Evolución del pH al agua en el estrato de 5 a 15 cm para todos los tratamientos.....	29
<b>Figura 7.</b> Evolución del pH al cloruro de potasio en el estrato de 0 a 5 cm para todos los tratamientos .....	31
<b>Figura 8.</b> Evolución del pH al cloruro de potasio en el estrato de 5 a 15 cm para todos los tratamientos .....	31
<b>Figura 9.</b> Relación entre pH del suelo al agua y al KCl para la capa mas superficial del suelo (0 a 5 cm).....	32
<b>Figura 10.</b> Relación entre pH del suelo al agua y al KCl para la capa mas profunda del suelo (5 a 15 cm).....	32
<b>Figura 11.</b> Relación entre el porcentaje de saturación en bases totales y pH al agua en el suelo .....	33
<b>Figura 12.</b> Relación entre el porcentaje de saturación de H, Ca, Mg y K, y pH al agua en el suelo .....	35
<b>Figura 13.</b> Materia seca disponible en kg/ha por tratamiento para cada momento de muestreo .....	38

<b>Figura 14.</b> Proteína disponible en kg/ha por tratamiento para cada momento de muestreo .....	39
<b>Figura 15.</b> Energía neta de lactación en Mcal/ha disponible por tratamiento para cada momento de muestreo .....	41
<b>Figura 16.</b> Forma de la pendiente en el potrero. ....	60
<b>Figura 17.</b> Ubicación del potrero en la zona media del paisaje.....	60
<b>Figura 18.</b> Aplicación del acondicionador granulado. Fecha 15 febrero de 2018.....	61
<b>Figura 19.</b> Delimitación de unidades experimentales según tratamientos.....	61
<b>Figura 20.</b> Implantación de la pastura. Fecha 3 julio de 2018.....	62
<b>Figura 21.</b> Forraje remanente en el primer corte de la pastura. Fecha 28 de agosto de 2018.....	62
<b>Figura 22.</b> Forraje disponible en segundo corte de la pastura. Fecha 13 octubre de 2018.....	63
<b>Figura 23.</b> Forraje remanente en segundo corte de la pastura. Fecha 15 octubre de 2018.....	63
<b>Figura 24.</b> Análisis de varianza y separación de medias para la variable materia seca disponible en kg/ha para cada tratamiento y cada momento de muestreo (Infostat).....	64
<b>Figura 25.</b> Análisis de varianza y separación de medias para la variable proteína disponible en kg/ha para cada tratamiento y cada momento de muestreo (Infostat).....	65
<b>Figura 26.</b> Análisis de varianza y separación de medias para la variable energía neta de lactación disponible en Mcal/ha para cada tratamiento y cada momento de muestreo (Infostat).....	66
<b>Figura 27.</b> Análisis de varianza y separación de medias para la variable materia seca consumida en kg/ha para cada tratamiento y cada momento de muestreo (Infostat).....	67

**Figura 28.** Análisis de varianza y separación de medias para la variable proteína consumida en kg/ha para cada tratamiento y cada momento de muestreo (Infostat)..... 68

**Figura 29.** Análisis de varianza y separación de medias para la variable energía neta de lactación consumida en Mcal/ha para cada tratamiento y cada momento de muestreo (Infostat)..... 69

## **1. RESUMEN**

La acidificación del suelo es una problemática que se da en gran parte de las tierras productivas de todo el mundo. Esto lleva no sólo a condiciones que afectan el crecimiento vegetal directamente, sino también a limitantes en las propiedades del suelo. La práctica mayormente utilizada para corregir esta limitante es el encalado, sin embargo presenta ciertas dificultades prácticas en su logística de aplicación. Su eficiencia depende de las características físicas y químicas de los materiales utilizados, por tal motivo se han desarrollado nuevos productos, más eficientes y con ventajas desde el punto de vista práctico. El objetivo del trabajo fue evaluar la respuesta al encalado utilizando una enmienda tradicional y nuevo acondicionador sobre una pastura perenne en un sistema de producción pastoril-lechero intensivo. Se realizaron cuatro tratamientos con dos repeticiones donde se comparó un encalado tradicional, dos aplicaciones de un nuevo producto comercial y un testigo absoluto. La respuesta se midió a través del forraje producido y de parámetros de calidad nutricional de la pastura, durante el período setiembre a enero del primer año de crecimiento. Así mismo, se monitoreó el pH y la evolución del complejo de intercambio del suelo durante todo el período experimental. Se evidenciaron diferencias significativas entre los tratamientos (dolomita, acondicionador A, acondicionador B y testigo) para las variables materia seca disponible (14502, 15717, 13403 y 11757 kg/ha), energía neta de lactación disponible (20292, 22014, 18920 y 17239 Mcal/ha) y proteína disponible (2543, 2635, 2216 y 1990 kg/ha). No se detectaron diferencias significativas de estas variables para el forraje remanente y consumido. Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos para la variable pH al agua (5.51, 5.25, 4.99 y 4.89) y pH al KCl (4.89, 4.63, 4.41 y 4.34) en el estrato superficial del suelo. La variable porcentaje de saturación de bases totales presentó diferencias significativas únicamente en el estrato superficial del suelo (74,

66.9, 58.7 y 55.5%). Se comprobó que la acidez del suelo impone una restricción al rendimiento de la pastura evaluada. Así mismo para el sitio de estudio considerado, la aplicación de las enmiendas logró aumentos significativos de pH así como también de calcio y magnesio con respuesta positiva en la producción de forraje, no así en calidad medido a través del contenido de energía neta de lactación y proteína. Finalmente, la nueva enmienda evaluada generó respuestas similares a las enmiendas calcáreas tradicionales con ventajas operativas en cuanto a su aplicación y uso.

Palabras claves: Acidificación del suelo, encalado, pastura.

## **2. SUMMARY**

Soil acidification is a problem that occurs in large part of the productive land around the world. This leads not only to conditions that directly affect plant growth, but also to limitations on soil properties. The practice mostly used to correct this limitation is liming, however it presents certain practical difficulties in its application logistics. Its efficiency depends on the physical and chemical characteristics of the materials used, for this reason new products have been developed, more efficient and with advantages from the practical point of view. The objective of the work was to evaluate the liming response using a traditional and new conditioner amendment on a perennial pasture in an intensive pastoral-dairy production system. Four treatments were performed with two repetitions where a traditional liming, two applications of a new commercial product and an absolute control were compared. The response was measured through the forage produced and parameters of nutritional quality of the pasture, during the period September to January of the first year of growth. Likewise, the pH and the evolution of the soil exchange complex were monitored throughout the experimental period. Significant differences were evidenced between the treatments (dolomite, conditioner A, conditioner B and control) for the variables available dry matter (14502, 15717, 13403 and 11757 kg/ha), available net lactation energy (20292, 22014, 18920 and 17239 Mcal/ha) and available protein (2543, 2635, 2216 and 1990 kg/ha). No significant differences of these variables were detected for the remaining and consumed forage. Significant differences were observed between the treatments for the variable soil pH in water (5.51, 5.25, 4.99 and 4.89) and soil pH in KCl (4.89, 4.63, 4.41 and 4.34) in the most superficial soil stratum. The variable percentage of total base saturation showed significant differences only in the most superficial soil stratum (74, 66.9, 58.7 and 55.5%). It was found that the soil acidity imposes a restriction on the performance of the restricted pasture. Also for the study site considered, the application of amendments achieved significant increases in pH as well as calcium and

magnesium with a positive response in forage production, but not in quality measured through the net lactation energy content and protein. Finally, the new amendment evaluated generated similar responses to the traditional calcareous amendments with operational advantages in terms of their application and use.

Keywords: Soil acidification, liming, pasture.

### **3. INTRODUCCIÓN**

La acidificación y la pérdida de bases del suelo afectan el crecimiento vegetal de manera significativa (Bolan et al, 2003; Edmeades et al, citado por Tomic et al 2018; Lalande et al, 2009; Mijangos et al, 2006; Ryan, 2018; Tomic et al, 2018; Urquiza, citado por Bernal y Forero 2014; Zandoná et al, 2015). La condición ácida de un suelo es una problemática que se presenta de manera generalizada en diversas partes del mundo (Arunava y Khridinuo, 2013), ya sea por génesis, procesos naturales, o como consecuencia de su uso y manejo. La intensificación de la actividad agropecuaria y la migración de la agricultura hacia zonas del país con menor aptitud agrícola, han llevado a agudizar dicha problemática, lo que supone una gran limitante para la producción (Rabuffetti, 2017). El encalado es la práctica utilizada para contrarrestar dicha problemática (Bolan et al, 2003; Goulding et al, y Connor et al, citados por Goulding 2016; Grewel y Williams, citado por Tomic et al 2018; Kunhikrishnan et al, 2016; Mizel et al, 2015; Fageria y Baligar, citado por Moreira y Fageria 2010; Owen et al, 2008), ésta consiste en la aplicación de materiales básicos para lograr la neutralización de iones hidrógeno en el suelo (Holland et al, 2018; Kisinyo et al, 2014; Kowalenko y Ilnat, 2010; Rosa et al, 2015; Vázquez y Pinilla, 2015; Vlamis, citado por Rabuffetti, 2017). Sin embargo su eficiencia depende tanto de las características física como químicas del material utilizado (Espinoza y Molina, 1999; Nielsen, 1958; Rabuffetti, 2017). En la actualidad las nuevas tecnologías de producción han permitido obtener nuevos productos, más eficientes, que buscan atender la misma problemática y lograr el mismo efecto con menores dosis, aparte de presentar ventajas prácticas y logísticas (Mullin, com. pers.<sup>1</sup>).

---

<sup>1</sup> Com. pers. Mullin, L. 2018. Industria Sulfúrica S.A. Montevideo, Uruguay.

## 4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. LIMITANTES EN SUELOS ÁCIDOS

La acidez del suelo se cuantifica con el pH, que se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno en la solución del suelo (Athanase et al, 2013; Essington, citado por Girón et al, 2016; Onwuka et al, 2016; Rabuffetti, 2017). Esta acidez limita el crecimiento vegetal de manera directa, pero también de manera indirecta, disminuyendo la disponibilidad de nutrientes (D'Souza y Jayarama, 2011; Kowalenco y Inhat, 2011; Goulding, 2016; Su y Evans, citado por Tomic et al 2018) (figura 1), la actividad microbiana, favoreciendo la presencia de productos fitotóxicos como el aluminio (Athanase et al, 2013; Gupta et al, 2013; Goulding, 2016; Holland et al, 2018; Kuntastyuty y Muzaiyanah, 2017; Seguel et al, 2013), hidrógeno (Goulding, 2016; Mathur y Levesque, 1983), manganeso (Athanase et al, 2013; Goulding, 2016; Kuntastyuty y Muzaiyanah, 2017; Levesque y Mathur, 1983) y hierro (Holland et al, 2018; Kuntastyuty y Muzaiyanah, 2017), e incluso afectando la estructura y estabilidad del suelo (Casanova, 2015; Goulding, 2016; Onwuka et al, 2016; Vázquez y Pagani, 2015; Rabuffetti, 2017).

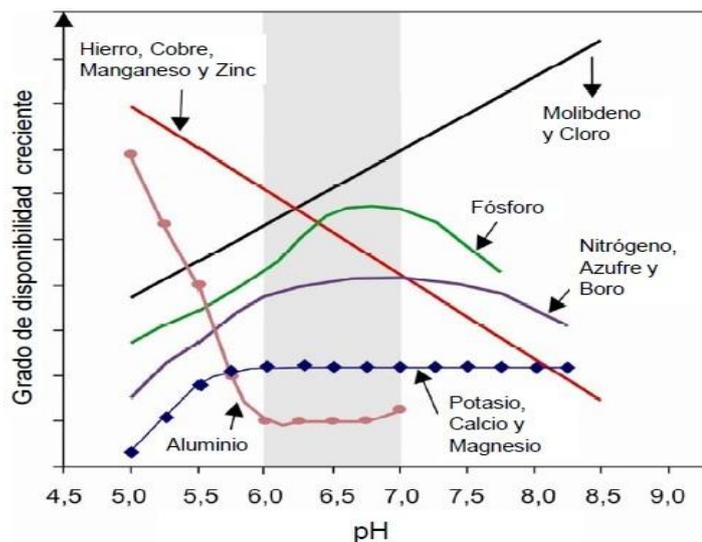


Figura 1. Disponibilidad de nutrientes en el suelo en función de su pH.

**Fuente:** Tomado de Malavolta citado por Prochnow et al 2009).

Las diferentes especies vegetales presentan distinta sensibilidad a la acidez del suelo para su normal crecimiento, desarrollo y reproducción (Casanova, 2015; Elliott et al, 1973; Goulding, 2016; Iqbal, 2012; Rabuffetti, 2017; Seguel et al, 2013; Sierra, 1982; Vázquez y Pagani, 2015), afectando así su productividad (figura 2).

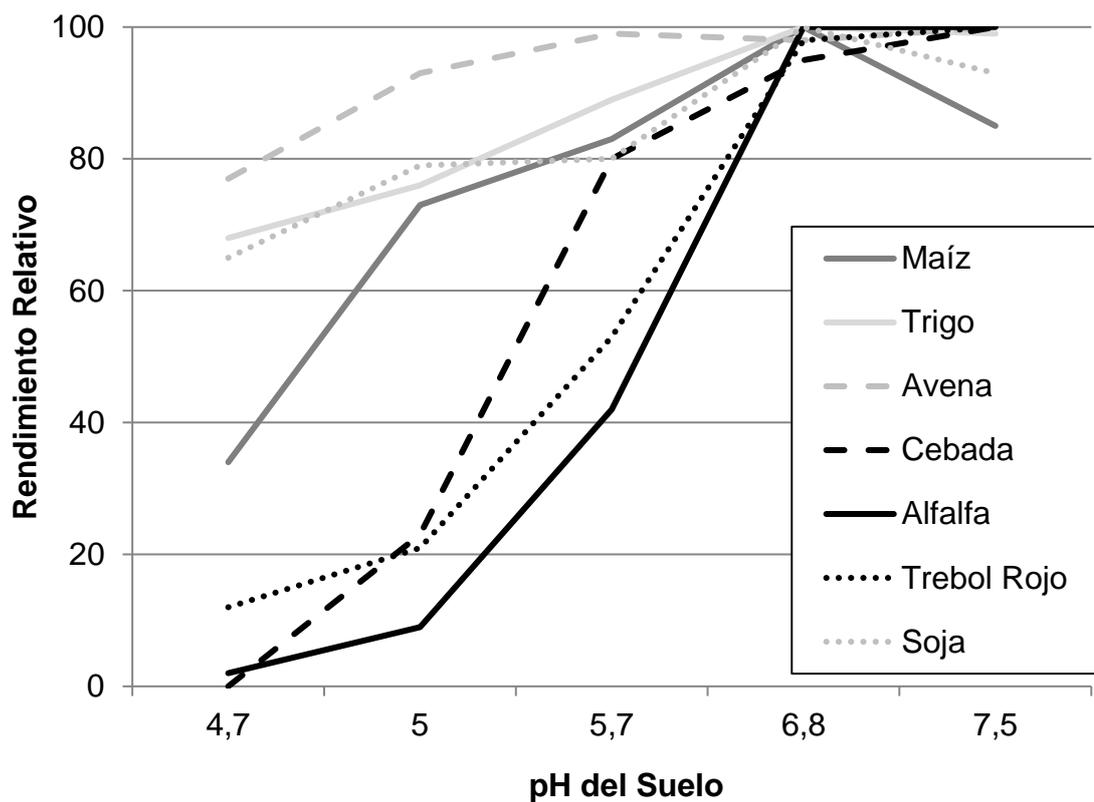


Figura 2. Rendimiento relativo de cultivos en rotaciones de maíz, cereales y leguminosas, a distintos valores de pH del suelo.

**Fuente:** Adaptado de Estación Agrícola Experimental de Ohio citado por Casanova 2015.

La literatura científica es convergente en manejar rangos de pH en el suelo dentro de los cuales cada especie vegetal se desarrolla de manera adecuada, estos rangos varían en valores y amplitud pero es aceptado como apropiado para la mayoría de las especies condiciones de neutralidad o de acidez ligera (Vázquez y Pagani, 2015; Sierra, 1982) (figura 3).

Especies	pH									
	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	
Alfalfa							■	■		
Trebol Rojo						■	■			
Bromus						■	■			
Falaris						■	■			
Sorgo					■	■	■			
Trebol Blanco					■	■	■			
Dactylis				■	■	■	■			
Trebol Subterraneo			■	■	■	■				
Festuca		■	■	■	■					

Figura 3. Rango óptimo de pH para diferentes especies forrajeras.

**Fuente:** Elaborado con base en Sierra 1982.

#### 4.2. SITUACIÓN MUNDIAL

Entre el 25 y 30% de los suelos del mundo están afectados de alguna manera por la acidez (Dalovic et al, 2012; Havlin et al, citado por Vázquez y Pagani, 2015; Kisinsyo et al, 2014; Uexküll et al, citado por Zu et al, 2014; Gupta et al, 2013) y aproximadamente el 50% de las tierras potencialmente cultivables son ácidas (Gupta et al, 2013). En América Latina el 81% de los suelos presentan esta problemática (International Atomic Energy Agency, citado por Ferro et al, 2015).

En zonas tropicales y subtropicales, la acidez es provocada por procesos naturales que llevan a la pérdida de bases del complejo de intercambio del suelo (Jure, 2015; Mathur y Levesque, 1983; Owen et al, 2008), consecuencia de su material generador, así como también del régimen pluviométrico y las altas temperaturas (Buri et al, 2005; Bolan et al, 2003; Rosa et al, 2015). Por otro lado, en zonas templadas la acidificación es consecuencia mayormente de factores antropogénicos (Iqbal, 2012; Vázquez y Pagani, 2015). Dentro de ellos, la alta remoción de bases por parte de los

cultivos con su posterior exportación, y las fertilizaciones con productos de alto índice de acidez son los de mayor significancia (Campbell y Zentner, 1984; Roba, 2018). Existen otros procesos que se dan en menor medida como la respiración por parte de los microorganismos, la descomposición de la materia orgánica, la fijación biológica de nitrógeno, hidrólisis de compuestos de hierro y aluminio y la secreción de protones por parte de las raíces, entre otras (Iqbal, 2012; Rabuffetti, 2017; Van Breemen et al, citado por Klein et al, 1997).

Todos estos procesos llevan a la disminución del pH a nivel de suelo. Sin embargo, la velocidad y la magnitud del cambio estarán determinadas en gran medida por sus características físico-químicas (tabla 1). Los dos componentes principales que influyen en el poder buffer del suelo son el contenido de materia orgánica y la proporción de arcillas en la fracción mineral (Curtin y Ukrainetz, 1997; Rabuffetti, 2017). Sin embargo los óxidos hidratados de hierro y aluminio así como el contenido de carbonatos de calcio y magnesio también influyen pero en menor medida. Por lo tanto el poder buffer de un suelo será mayor en la medida que mayor sea el contenido de arcillas y materia orgánica (Rabuffetti, 2017).

Tabla 1. Cantidades aproximadas de caliza necesarias para modificar de 5,5 a 6,5 el pH de la capa arable de suelos de diferentes texturas.

**Fuente:** Tomado de Donahue citado por Rabuffetti 2017.

<b>Textura</b>	<b>CIC meq/100g</b>	<b>Caliza kg/ha</b>
Franco arenoso	10	2000
Franco limoso	15	3000
Franco arcilloso	25	4000

### 4.3. SITUACIÓN EN URUGUAY

Para su condición natural, la mayoría de los suelos del Uruguay presentan valores de pH en el rango de 5,4 a 6,8 en los horizontes superficiales y por ello se denominan como suelos ligeramente ácidos a neutros. Estos suelos incluyen la mayoría de los suelos Melánicos como Vertisoles, Brunosoles y Argisoles Melánicos. Además, aunque ocupando áreas más reducidas, existen suelos con mayor acidez con valores de pH menores a 5,2 en el horizonte superficial. Estos son suelos Desaturados Lixiviados, que incluyen a los Alfisoles y Acrisoles dominantes en las unidades Tacuarembó y Rivera. Por último, existen también otros suelos naturalmente ácidos como algunos Planosoles situados al este de nuestro país, Argisoles Ocrícos del centro oeste sobre Areniscas Cretácicas y suelos Poco Desarrollados como los Cambisoles sobre Basamento Cristalino (Rabuffetti, 2017).

### 4.4. LA PRÁCTICA DEL ENCALADO

Para contrarrestar el problema del pH, tradicionalmente se ha acudido a la aplicación de enmiendas calcáreas (Bolan et al, 2003; Goulding et al y Connor et al, citados por Goulding 2016; Grewel y Williams, citado por Tomic et al 2018; Kunhikrishnan et al, 2016; Mizel et al, 2015; Fageria y Baligar, citado por Moreira y Fageria, 2010; Owen et al, 2008) tales como calcita, dolomita, cal viva o apagada, entre otras. La aplicación de estas enmiendas sobre suelos agrícolas es una práctica que data de la época romana y que se ha mantenido por siglos (Goulding et al y Connor et al, citados por Goulding 2016). Esta práctica se conoce con el nombre de encalado. La calcita es una roca rica en carbonato de calcio (90 a 95% de carbonato de calcio), la cual se extrae de minas y se muele a finuras de hasta 100 a 150 micras. La dolomita es otra roca rica en carbonatos de calcio y de magnesio, contiene

aproximadamente un 60 a 70 % de carbonato de calcio y un 20 a 30 % de carbonato de magnesio. El proceso físico que sufre la dolomita es igual a la calcita antes de ser comercializada (Espinoza y Molina, 1999).

El proceso de encalado implica no sólo la aplicación de calcita o dolomita sobre el suelo, sino también sucesivas incorporaciones que permitan un contacto más íntimo entre el suelo y la enmienda. Esto es debido a que el ion carbonato se disipa en forma de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y por ende su movilidad es limitada. A su vez es necesario respetar un tiempo de entre dos y cuatro meses antes de sembrar el cultivo, ya que pueden darse deficiencias de fósforo, zinc y manganeso entre otros nutrientes, debido a las reacciones que suceden en el suelo durante el proceso de neutralización (Rabuffetti, 2017).

Estos materiales básicos producen un aumento en el pH del suelo debido a la neutralización de iones hidrógeno, a la vez que hacen un aporte directo de calcio y magnesio (Holland et al, 2018; Kisinyo et al, 2014; Kowalenko y Ihnat, 2010; Rosa et al, 2015; Vázquez y Pinilla, 2015; Vlamis, citado por Rabuffetti, 2017). El incremento de pH disminuye la solubilidad del aluminio y aumenta la disponibilidad de algunos nutrientes (Kowalenko y Ihnat, 2010; Rosa et al, 2015; Sarker et al, 2014) (tabla 2). Así mismo mejora la estructura del suelo, aumenta la actividad de las lombrices, la macro porosidad y la conductividad hidráulica (Bolan et al, 2003; Haynes y Naidu, citados por Goulding 2016).

La eficiencia de una enmienda calcárea depende de sus características físicas y químicas (Espinoza y Molina, 1999; Nielsen, 1958, Rabuffetti, 2017). En la actualidad las nuevas tecnologías de producción han permitido obtener nuevos productos, más eficientes, que buscan atender la misma problemática y lograr el mismo efecto con menores dosis, aparte de presentar ventajas prácticas y logísticas (Mullin, com. pers.<sup>2</sup>).

---

<sup>2</sup> Com. pers. Mullin, L. 2018. Industria Sulfúrica S.A. Montevideo, Uruguay.

Tabla 2. Efecto del aumento del pH de los horizontes superficiales de suelos originalmente fuertemente ácidos en la cantidad de Al intercambiable, bases totales y capacidad de intercambio catiónica efectiva, CICE.

**Fuente:** Tomado de Rabuffetti 2017.

Suelos	Región	pH	BT meq	Al meq	% Sat. Al	CICE meq	Autores
Paleudult	Carolina del Norte, EE UU	Inicial: 4.5 Encalado: 5.9	0.20 1.60	0.91 0.10	82 6	1.11 1.70	Kamparth , 1970
Paleudult	Alabama, EE UU	Inicial: 4.7 Encalado: 5.7	0.68 2.14	1.08 0.09	61 4	1.76 2.23	Richburg y Adams, 1970
Hapludult	Tacuarembó, Uruguay	Inicial: 4.9 Encalado: 5.7	1.68 2.40	0.50 0.09	30 3	2.38 2.50	Alvez y De Souza, 1988
Haplidult	Tacuarembó, Uruguay	Inicial: 5.0 Encalado: 5.5	1.80 2.80	0.55 0.11	25 4	2.35 2.91	Pereira et al 1983

#### 4.5. NUEVAS TECNOLOGÍAS

En Uruguay existe un nuevo producto en el mercado comercializado por la empresa Industria Sulfúrica Sociedad Anónima. Su nombre es Isumax 26, está formulado en base a óxidos de calcio y/o magnesio y se presenta en gránulos, esto posibilita ser aplicado en cobertura de manera similar a un fertilizante común, mediante fertilizador tradicional y sin la necesidad de ser incorporado mecánicamente al suelo. Así mismo, permite ser aplicado inmediatamente antes de la siembra, en comparación con la antelación que implica la aplicación de las enmiendas calcáreas tradicionales.

El Isumax 26 es producido a partir de roca calcítica y dolomítica así como también sulfato de calcio, micropulverizadas a partículas menores a 37 micras e incineradas para transformar los carbonatos de calcio y magnesio en óxidos. Posteriormente se granula con el agregado también de polisacáridos

y ácidos húmicos para de esta forma obtener un producto final en gránulos de entre 2 y 4 mm (Mullin, com. pers.<sup>3</sup>).

#### 4.6. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL CORRECTOR

La composición química y la pureza de un material encalante determinan su capacidad de neutralizar la acidez en el suelo (Athanasie et al, 2013; Espinoza y Molina, 1999; Nielsen, 1958; Owen et al, 2008; Rabuffetti, 2017). El equivalente químico es un indicador utilizado para determinar el poder de neutralización de una enmienda en particular (tabla 3). Este se define como la capacidad de un material para neutralizar la acidez, comparado con el poder de neutralización del  $\text{CaCO}_3$ , químicamente puro, al cual se le asigna un valor 100 (Espinoza y Molina, 1999).

Tabla 3. Equivalentes químicos de materiales de encalado puros.

**Fuente:** Adaptado de Espinoza y Molina 1999.

<b>Material</b>	<b>Composición Química</b>	<b>Valor Neutralizante</b>
Calcita	$\text{CaCO}_3$	100
Dolomita	$\text{CaCO}_3.\text{MgCO}_3$	108
Óxido de calcio	$\text{CaO}$	178
Óxido de magnesio	$\text{MgO}$	250

Por otro lado la disolución de los materiales para el encalado también depende del tamaño de la partícula (Athanasie et al, 2013; Owen et al, 2008; Ratke et al, 2014). Para estimar la finura o eficiencia granulométrica de un material se pesa una cantidad determinada y se cierne en una secuencia de tamices de diferente tamaño (Espinoza y Molina, 1999). A medida que el

<sup>3</sup> Com. pers. Mullin, L. 2018. Industria Sulfúrica S.A. Montevideo, Uruguay.

material es más fino, aumenta su eficiencia granulométrica (Owen et al, 2008) (tabla 4).

Tabla 4. Eficiencia granulométrica de los materiales calcáreos para uso agrícola.

**Fuente:** Tomado de Vázquez y Pagani 2015.

<b>Tamiz IRAM (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Eficiencia Relativa</b>
850	0,17
425	0,30
250	0,55
150	0,80
75	1,00
<75	1,25

Para valorar en forma conjunta la pureza química y la finura de los materiales de encalado se utiliza un parámetro denominado poder relativo de neutralización total (PRNT) (Owen et al, 2008). Este parámetro se obtiene multiplicando la eficiencia granulométrica por el equivalente químico y este producto se divide por 100 (Espinoza y Molina, 1999). El PRNT indica qué porcentaje de la cal, expresada por su equivalente químico, es capaz de reaccionar en un período de 3 meses. Cuanto mayor sea el PRNT, más reactivo será el material (Espinoza y Molina, 1999). El PRNT de este nuevo producto es sensiblemente mayor al de las enmiendas tradicionales. Esto implica que puedan utilizarse menores dosis que las enmiendas usualmente utilizadas para lograr el mismo efecto (Mullin, com. pers.<sup>4</sup>).

#### 4.7. RESULTADOS NACIONALES

A nivel de nuestro país se ha trabajado para cuantificar el efecto del pH sobre la producción de materia seca en pasturas para diferentes tipos de suelos. Varios de estos resultados se presentan en las tablas 5 y 6.

<sup>4</sup> Com. pers. Mullin, L. 2018. Industria Sulfúrica S.A. Montevideo, Uruguay.

Tabla 5. Síntesis de los principales resultados sobre efecto del encalado en pasturas provenientes de la experimentación llevada a cabo en la zona noreste del Uruguay durante el período 1978-1990.

Fuente: Tomado de Rabuffetti 2017.

Región: Material Madre	Suelos		Propiedades químicas				Cultivo	Caliza ton/ha	Rend t/ha	
	MGAP	TS	pH	MO %	BT	Al				
Noreste (Areniscas de Tacuarembó)								0,0	5,7	
							Pradera: T.Rojo, Raigrás	1,5	7,8	
								4,5	10,3	
		Acrisoles	Hapludult	4,9	1,8	1,9	0,6		0,0	12,1
							Pradera: T.Blanco, Lotus, Raigrás	1,5	12,0	
								4,5	14,8	
								0,0	1,4	
							T.Rojo	1,5	4,7	
								2,5	5,7	
								0,0	2,2	
		Alisol	Hapludult	4,8	-	1,9	0,3	T. Blanco	1,5	3,1
								2,5	2,8	
							0,0	3,8		
						Lotus	1,5	6,2		
							2,5	8,3		

Tabla 6. Síntesis de los principales resultados sobre efecto del encalado en pasturas provenientes de la experimentación llevada a cabo en las zonas sur y litoral oeste del Uruguay durante el período 1978-1990.

**Fuente:** Tomado de Rabuffetti 2017.

Región: Material Madre	Suelos MGAP	Propiedades químicas				Cultivo	Caliza ton/ha	Rend t/ha
		pH	MO %	BT	AT			
Litoral Oeste (Areniscas Cretácicas)	Argisoles Dístricos	5,2	1,9	4,8	2,5	Pradera: T.Blanco Lotus Raigrás	0,0	7,5
							1,5	8,1
							3,0	8,0
	Planosol Dístrico	5,0	1,8	2,7	1,7	T.Blanco	0,0	2,4
							1,3	2,9
							2,5	2,6
0,0							9,2	
Sur	Brunosol Subéutrico	5,5	4,5	14,6	2,2	Alfalfa	0,0	8,7
							2,5	10,2
							5,0	12,4
							0,0	6,6
Vertisol Rúptico	5,8	2,9	17,4	5,3	Alfalfa	2,5	7,2	
						5,0	8,0	

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general del estudio fue evaluar y comparar dos tipos de enmiendas para encalado de suelos en un sistema pastoril-lechero intensivo, considerando parámetros en suelos y en pasturas.

### **5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Cuantificar la producción de materia seca y la calidad (contenido de proteína y energía neta de lactación) de una pastura permanente para pastoreo directo, en respuesta a la aplicación de dolomita e Isumax.

Evaluar la evolución del pH así como contenido de calcio, magnesio, potasio e hidrógeno en el complejo de intercambio del suelo, en las primeras estaciones de crecimiento de la pastura, en respuesta a la aplicación de dolomita e Isumax.

## **6. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **6.1. UBICACIÓN E HISTORIA DEL SITIO**

El ensayo se desarrolló en un predio lechero en la localidad de Libertad, departamento de San José, propiedad del señor Oscar Amestoy (34°37'30.3"S 56°39'34.7"W). El suelo sobre el cual se desarrolló el ensayo fue un Brunosol Eutrico de la unidad Libertad en la carta a escala 1:1.000.000. Según la carta de CONEAT es un suelo 10.8 b, con un índice de productividad CONEAT de 192.

El potrero venía de dos años de raigrás (*Lolium multiflorum*) variedad Feast y trébol blanco (*Trifolium repens*) variedad Zapicán para pastoreo

directo (2016 y 2017). La fertilización sobre esta pastura consistió en la aplicación de 500 kg/ha/año de superfosfato de calcio (0-18/20-0+12S+20Ca) y 500 kg/ha/año de cloruro de potasio (0-0/0-60) previo a las implantaciones, y de 100 kg/ha de fosfato diamónico (18-46/46-0) al surco al momento de la siembra. En cada uno de los años se aplicaron adicionalmente un total de 500 kg/ha de urea (46-0/0-0) en refertilizaciones. Desde el 2008, momento en el que comenzó con el asesoramiento de la Ing. Agr. Elena Patrón, el manejo de la fertilización fue similar con pasturas de raigrás, trébol blanco y achicoria siempre para pastoreo directo. Desde 1994 momento en el que el productor adquiere el campo y hasta el 2008, el potrero se destinó a la producción de forraje para pastoreo y corte con manejo tradicional. Anteriormente a la adquisición del predio por parte del productor, dicho potrero estuvo destinado a la producción de papa.

## 6.2. DESCRIPCIÓN DEL PAISAJE

El paisaje presenta ondulaciones leves con pendientes que oscilan entre 1 y 4%. Sin embargo, el potrero donde se realizó el ensayo se sitúa en una planicie ubicada en la zona media del paisaje (ver anexo figura 16). La forma de la pendiente del potrero es prácticamente plana con valores menores a 0,2 % (ver anexo figura 17). La rocosidad es de grado cero, por no existir afloramientos del estrato rocoso, mientras que la pedregosidad es nula.

El drenaje del potrero se caracteriza como moderadamente bien drenado, en virtud de que el suelo se satura por períodos cortos, su permeabilidad es lenta debido a un Bt bien desarrollado y presenta un alto contenido de arcillas en todo el perfil. No existe riesgo de inundación ya que se ubica en una zona media del paisaje.

### 6.3. DESCRIPCIÓN DEL PERFIL

En la tabla 7 se presentan los distintos horizontes encontrados en el perfil del suelo, su profundidad, así como también sus características.

Tabla 7. Descripción de los horizontes del perfil del suelo.

Horizonte /Prof.	Descripción
<b>A</b> 0-25 cm	Color en suelo húmedo: matriz 10YR, value 2 y croma 2. Color en suelo seco: matriz 10YR, value 3 y croma 1. Textura franco arcillo limosa. No se detectó presencia de carbonatos ante el agregado de ácido clorhídrico.
<b>AB</b> 25-55 cm	Color en suelo húmedo: matriz 10YR, value 2 y croma 1. Color en suelo seco: matriz 10YR, value 4 y croma 2. Textura arcillo limoso. No se detectó presencia de carbonatos ante el agregado de ácido clorhídrico.
<b>Bt1</b> 55-85 cm	Color en suelo húmedo: matriz 10YR, value 2 y croma 1. Color en suelo seco: matriz 10YR, value 2 y croma 2. Textura arcillosa. No se detectó presencia de carbonatos ante el agregado de ácido clorhídrico.
<b>Bt2</b> 85-125 cm	Color en suelo húmedo: matriz 10YR, value 3 y croma 1. Color en suelo seco: matriz 10YR, value 4 y croma 3. Textura arcillosa. Se detectó presencia leve de carbonatos ante el agregado de ácido clorhídrico, sin evidenciarse concreciones.
<b>Ck</b> >125 cm	Color en suelo húmedo: matriz 10YR, value 6 y croma 4. Color en suelo seco: matriz 10YR, value 4 y croma 2. Textura limosa. Se detectó presencia de concreciones de carbonato en todo el horizonte.



### 6.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño experimental comprendió cuatro tratamientos con dos repeticiones, resultando en un total de ocho parcelas, o sea un diseño

completamente al azar con dos repeticiones. Cada parcela ocupó una superficie de 240 m<sup>2</sup> (12 m de ancho por 20 m de largo) totalizando el área del ensayo 1920 m<sup>2</sup>. Los tratamientos se detallan en tabla 8, mientras que las características fisicoquímicas de las enmiendas utilizadas se describen en tabla 9.

Tabla 8. Tratamientos.

Número de tratamiento	Tratamientos	kg/ha
1	Encalado tradicional	3750
2	Acondicionador dosis alta (A)	1100
3	Acondicionador dosis baja (B)	400
4	Testigo	

Tabla 9. Enmiendas

	Enmienda Calcárea	Acondicionador Granulado
<b>Nombre del producto</b>	Dolomita	Isumax 26
<b>Composición</b>	25% MgCO <sub>3</sub> + 63% CaCO <sub>3</sub>	26% CaO + 13% MgO + 3% S
<b>Granulometría</b>	100% pasa malla 2,0 mm 70 % pasa malla 0,8 mm 50 % pasa malla 0,3 mm	100% pasa malla 0,044 mm 80 % pasa malla 0,037 mm
<b>PRNT</b>	65	95
<b>Estado físico</b>	Polvo	Granulado (2-4 mm)

La aplicación del calcáreo se hizo por intermedio de una empresa tercerizada, dejando la zona central para las aplicaciones del producto comercial y el testigo absoluto, ya que de otra manera hubiera dificultado su operativa.

Diseño de parcelas al azar con repeticiones

1	2	3	4	4	3	2	1
---	---	---	---	---	---	---	---

## 6.5. VARIABLE DE RESPUESTA EN PLANTA Y SUELO

Los parámetros medidos a nivel de suelo fueron:

- pH en agua.
- pH en cloruro de potasio.
- Bases intercambiables (calcio, magnesio, potasio e hidrógeno).

Para la caracterización inicial del suelo, se determinó además la capacidad de intercambio catiónico (a pH del suelo), materia orgánica y fósforo extractable. Se extrajeron las muestras y se enviaron a los laboratorios Waypoint Analytical Tennessee y LAVSA donde se determinaron los parámetros antes mencionados con la metodología descrita en la tabla 10.

Tabla 10. Laboratorios y parámetros de determinación.

<b>Parámetro</b>	<b>Laboratorio</b>	<b>Determinación</b>
<b>pH al KCl</b>	LAVSA	Peachimetro
<b>pH al H<sub>2</sub>O</b>	Waypoint Analytical Tennessee	Peachimetro
<b>Calcio</b>	Waypoint Analytical Tennessee	Mehlich 3
<b>Magnesio</b>	Waypoint Analytical Tennessee	Mehlich 3
<b>Potasio</b>	Waypoint Analytical Tennessee	Mehlich 3
<b>Sodio</b>	Waypoint Analytical Tennessee	Mehlich 3
<b>Hidrógeno</b>	Waypoint Analytical Tennessee	Mehlich 3
<b>CIC</b>	Waypoint Analytical Tennessee	Mehlich 3
<b>Fósforo</b>	Waypoint Analytical Tennessee	Mehlich 3
<b>Materia Orgánica</b>	Waypoint Analytical Tennessee	Ignición

Los momentos de muestreo y los parámetros a determinar se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Fechas de muestreos de suelo.

	<b>Marzo</b>	<b>Julio</b>	<b>Octubre</b>	<b>Enero</b>
<b>CIC</b>	Si	No	No	No
<b>pH al H<sub>2</sub>O</b>	Si	Si	Si	Si
<b>pH al KCl</b>	Si	Si	Si	Si
<b>Mat. Org.</b>	Si	No	No	No
<b>Fósforo</b>	Si	No	No	No
<b>Calcio</b>	Si	Si	Si	Si
<b>Potasio</b>	Si	Si	Si	Si
<b>Magnesio</b>	Si	Si	Si	Si
<b>Sodio</b>	Si	No	No	No
<b>Hidrógeno</b>	Si	Si	Si	Si

En la tabla 12 se presentan los valores de análisis de suelo para el mes de Marzo.

Tabla 12. Valores de análisis de suelo para muestreo de marzo según profundidad de muestreo.

		<b>Profundidad</b>	
		<b>0-5 cm</b>	<b>5-15 cm</b>
<b>CIC</b>	cmol.kg <sup>-1</sup>	15	13
<b>pH al H<sub>2</sub>O</b>		4.9	5.1
<b>pH al KCl</b>		4.2	4.3
<b>Materia Orgánica</b>	%	4.7	3.1
<b>Fósforo</b>	ppm	83	31
<b>Calcio</b>	cmol.kg <sup>-1</sup>	6.6	6.5
	% saturación	44	50
<b>Potasio</b>	cmol.kg <sup>-1</sup>	0.5	0.2
	% saturación	3.3	1.6
<b>Magnesio</b>	cmol.kg <sup>-1</sup>	1.1	1.1
	% saturación	7.4	8.5
<b>Sodio</b>	cmol.kg <sup>-1</sup>	0.2	0.2
	% saturación	1.3	1.6
<b>Hidrógeno</b>	cmol.kg <sup>-1</sup>	6.6	4.9
	% saturación	44	38

Los parámetros medidos a nivel de pastura fueron:

- Materia seca (kg)
- Proteína cruda (%)
- Energía neta de lactación (Mcal)

Las muestras de pasturas se enviaron a Laboratorio Oriental Dolores, donde se determinó:

- Contenido de materia seca mediante eliminación de agua libre por método de calor (100-105°C) a peso constante y determinación de peso del residuo.
- Contenido de proteína cruda determinando el contenido de nitrógeno por el método Kjeldahl y multiplicando este valor por un factor de 6,25, para luego expresarlo como porcentaje de la base seca.
- Energía neta de lactación a través de ecuaciones de predicción ( $ENL \text{ (Mcal/kg MS)} = -0,12 + 0,0245 \times (\% \text{ DMO} \times \% \text{ MO}/100)$ ) para la cual se determinó el valor de fibra detergente ácida (por digestión ácida) y fibra detergente neutra (por digestión neutra) para con ambas estimar la digestibilidad de la materia orgánica.
- Finalmente el contenido de cenizas por incineración de la muestra en horno a 550°C por tres horas.

Por su parte la producción total de materia seca se determinó mediante el peso en fresco de los cortes, corregidos por el contenido de materia seca de las muestras remitidas al laboratorio. Estos cortes se efectuaron durante todo el período que duró el experimento y se hicieron en cada una de las parcelas, sobre una superficie de pradera de 1.6 metros cuadrados, lo que corresponde al corte de ocho cuadros de 0.2 metros cuadrados cada uno (40 x 50 cm cada uno).

Dado que el ganado pastoreó directamente la pastura, se determinó el volumen de forraje ofrecido (previo al ingreso de los animales) y el volumen de forraje remanente (luego de la salida de los animales) para así determinar

el volumen de forraje consumido. En cada uno de estos cortes se analizó, a nivel de la pastura, los parámetros antes mencionados. Visto que el ganado accedió al forraje en franjas diarias, se hicieron medidas repetidas en el tiempo y en la misma sección del potrero. El número total de corte estuvo en función de la tasa de crecimiento de la pastura y el volumen de forraje disponible. Fueron cinco los cortes realizados durante el experimento y correspondieron a los meses de agosto, octubre, noviembre, diciembre y enero.

Las precipitaciones al momento de la siembra e implantación de las pasturas fueron óptimas. Sin embargo, los eventos de lluvia ocurridos previo y durante el primer pastoreo, ocasionaron un mal aprovechamiento de la pastura lo que motivó a descartar los datos obtenidos en el corte de agosto (ver anexo figura 21).

#### 6.6. SECUENCIA DE LABORES Y ACTIVIDADES DEL EXPERIMENTO

El 30 de agosto del 2017 se aplicaron 300 kg/ha de superfosfato de calcio (0-18/20-0+12S+20Ca) y la misma cantidad de cloruro de potasio (0-0/0-60). El 20 de diciembre se dio una pasada de disquera a todo el potrero. El 21 de diciembre se aplicó la dolomita y se incorporó con dos pasadas cruzadas de disquera más rastra de dientes. El 12 de enero se dio otra pasada de disquera más rastra de dientes. El 15 de febrero se aplicó el nuevo producto comercial en los tratamientos correspondientes. Se realizó un control de malezas el 5 de febrero aplicándose Round Up Full (glifosato) y Preside (flumetsulam) a razón de 2 L/ha y 0,5 L/ha respectivamente. El 13 de abril se implantó la pastura perenne compuesta por festuca Rizomat, festuca Fortuna, trébol rojo Antares, trébol blanco Zapicán y lotus San Gabriel, en cantidades de 13.5, 13.5, 10.0, 3.6 y 3.6 kilogramos de semillas por hectárea respectivamente. Se sembró con sembradora directa más rastra de dientes y se fertilizó con 100 kg/ha de fosfato diamónico (18-46/46-0) aplicado en la línea de siembra.

Se extrajeron muestras de suelo a 15 cm de profundidad y se dividieron en dos sub muestras, una de 0 a 5 cm y otra de 5 a 15 cm. Estas fueron tomadas con un calador manual, con un patrón de muestreo de una toma cada dos pasos, dentro de cada una de las parcelas, caminando las diagonales. De la misma manera se hicieron todos los muestreos posteriores.

#### 6.7. TÉCNICA DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

El análisis estadístico se realizó en distintas etapas. En primer lugar se realizó un ANOVA para las variables de respuesta (de suelo y de forraje) separadamente en cada fecha de muestreo. Esto permitió reconocer el patrón general de respuesta a los tratamientos, así como la magnitud del error (coeficiente de variación) y verificar la posible existencia de datos atípicos. En segundo lugar, tanto para suelo como para forraje, se realizó un ANOVA con medidas repetidas en el tiempo. Además, la producción y calidad de forraje también fueron analizadas como la suma de cortes, o sea producción (materia de seca, energía y proteína) en forma acumulada durante el período de estudio. En tercer lugar, se relacionó las respuestas vegetales observadas con las respuestas en el suelo. Para interpretar los análisis de varianza se consideró un valor alfa de 5% utilizándose el estadístico Pillai. La comparación de medias se hizo utilizando el método de Hotelling-Bonferroni. Se realizó correlación de Pearson entre pH al agua y pH al cloruro de potasio a nivel del suelo, entre porcentaje de saturación de bases totales y pH al agua, y entre pH al agua del suelo y calcio, magnesio, potasio e hidrógeno. Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el programa Infostat.

## 7. RESULTADOS

### 7.1. PRECIPITACIONES

Durante el primer trimestre del ensayo hubo condiciones de déficit hídrico severo con precipitaciones acumuladas muy por debajo del promedio histórico. Durante los meses de julio y agosto se dieron condiciones de exceso hídrico con precipitaciones copiosas. Finalmente en el último trimestre las precipitaciones fueron superiores a la media histórica de la zona.

En la figura 4 se presentan las precipitaciones registradas para el período en el que se desarrolló el ensayo.

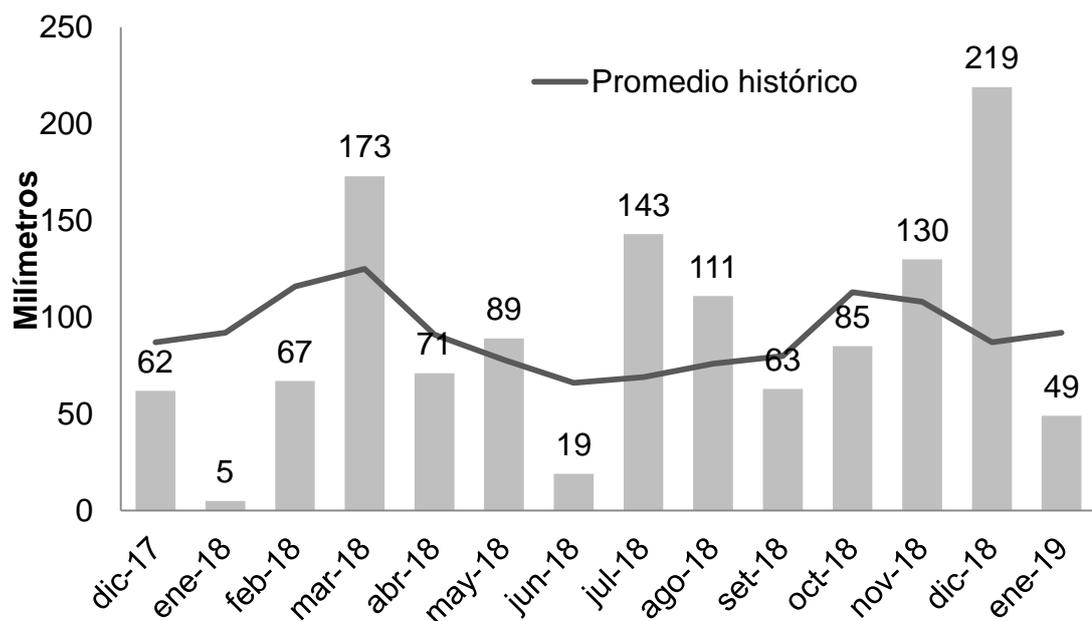


Figura 4: Precipitaciones totales mensuales (mm/mes) para el período diciembre 2017 a enero 2019, y promedios históricos.

**Fuente:** Tomado de INUMET 2019.

## 7.2. RESULTADOS DE SUELO

### 7.2.1. Efectos sobre el pH del suelo

Se presenta el resumen del ANOVA con los valores de p-valor para el pH del suelo al agua y al cloruro de potasio en los dos diferentes estratos del suelo y para el efecto tratamiento, tiempo y su interacción (tabla 13). Hubo efecto significativo del tratamiento sobre el pH al agua y al cloruro de potasio en el estrato más superficial del suelo. Sin embargo, no hubo efecto significativo del tiempo ni de su interacción con el tratamiento.

Tabla 13. Resumen de los análisis de la varianza para las variables pH al agua y al cloruro de potasio.

Profundidad (cm)	p-valor			
	Tratamiento	Tiempo	Tratamiento * Tiempo	
pH al agua	0 – 5	0.0086	0.5681	0.5164
	5 – 15	0.2565	0.6894	0.9695
pH al KCl	0 – 5	0.0026	0.3034	0.1437
	5 - 15	0.3648	0.2076	0.5026

#### 7.2.1.1. pH al agua

En la tabla 14 se presentan los valores de pH al agua para los diferentes tratamientos en las dos profundidades estudiadas, así como también su separación de medias. En el estrato 0 – 5 cm, el promedio de 5.51

registrado para dolomita fue significativamente distinto a los valores de 4.99 y 4.89 correspondientes al testigo y al acondicionador B, respectivamente. Por su parte, el acondicionador A no se diferenció del resto de los tratamientos. En el estrato de 5 – 15 cm, los promedios registrados de 5.46 para dolomita, 5.19 para acondicionadores A, 5.15 para acondicionador B y 5.14 para el testigo no lograron diferenciarse significativamente entre sí.

Tabla 14. Valores promedios de pH al agua medido en el suelo para los distintos tratamientos según profundidad de muestreo.

<b>Profundidad</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Promedio</b>	
0 a 5 cm	Dolomita	5.51	B
	Acondicionador A.	5.25	A B
	Acondicionador B.	4.99	A
	Testigo	4.89	A
5 a 15 cm	Dolomita	5.46	A
	Acondicionador A.	5.19	A
	Acondicionador B.	5.15	A
	Testigo	5.15	A

A pesar de que no fue significativo el efecto tiempo ni su interacción con el tratamiento (tabla 13), se presenta de manera gráfica la evolución del pH al agua para las dos profundidades del estudio (figuras 5 y 6). Las dos profundidades parecen mostrar tendencias ligeramente distintas. En la primera profundidad el mayor efecto parece manifestarse en la segunda fecha de muestreo, pues todos los tratamientos muestran una caída en el valor de pH de la tercera fecha de muestreo. En cambio en la segunda profundidad de muestreo el aumento de pH se sostiene hasta la tercera fecha de muestreo.

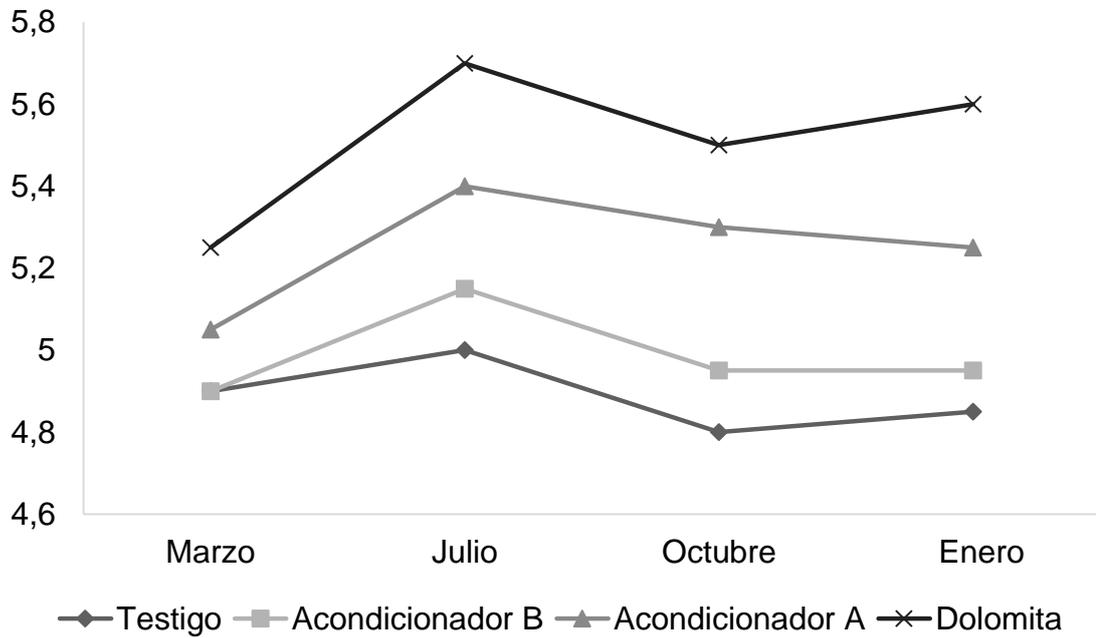


Figura 5. Evolución del pH al agua en el estrato de 0 a 5 cm para todos los tratamientos.

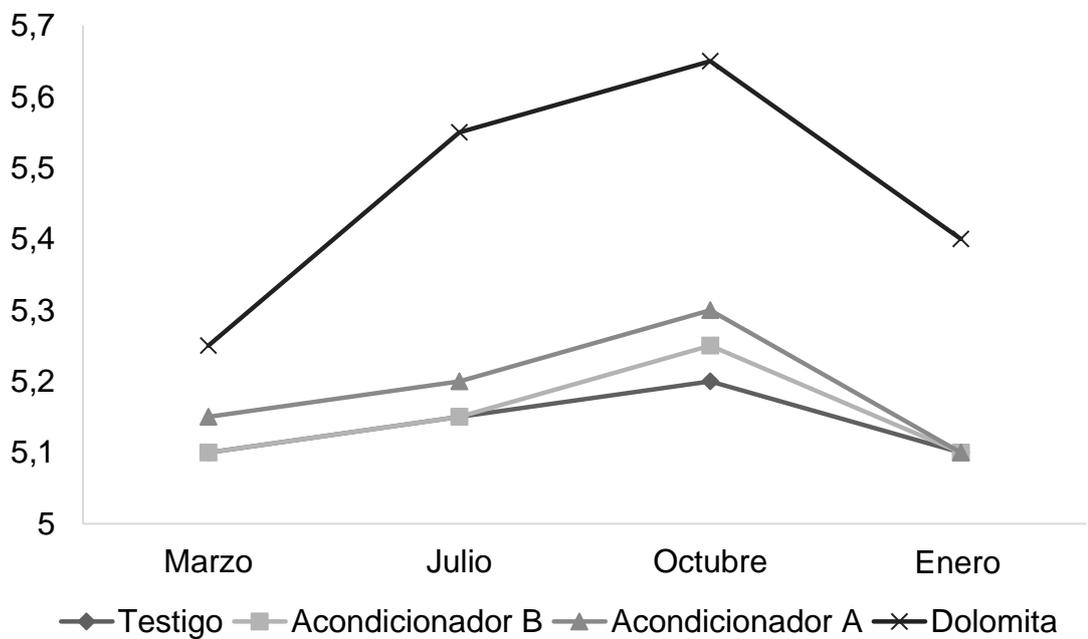


Figura 6. Evolución del pH al agua en el estrato de 5 a 15 cm para todos los tratamientos.

### 7.2.1.2. pH al cloruro de potasio

En la tabla 15 se presentan los valores de pH en cloruro de potasio para los diferentes tratamientos en las dos profundidades estudiadas, así como también su separación de medias. En el estrato 0 – 5 cm, el promedio de 4.89 registrado para dolomita fue significativamente distinto a los valores de 4.34 y 4.41 correspondientes al testigo y al acondicionador B, respectivamente. Por su parte, el acondicionador A no se diferenció del resto de los tratamientos. En el estrato de 5 – 15 cm, los promedios registrados de 4.62 para dolomita, 4.50 para acondicionador A, 4.43 para acondicionador B y 4.40 para el testigo no lograron diferenciarse significativamente entre sí.

Tabla 15. Valores promedio de pH al cloruro de potasio medido en el suelo para los distintos tratamientos según profundidad de muestreo.

<b>Profundidad</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Promedio</b>	
0 a 5 cm	Dolomita	4.89	B
	Acondicionador A.	4.63	A B
	Acondicionador B.	4.41	A
	Testigo	4.34	A
5 a 15 cm	Dolomita	4.62	A
	Acondicionador A.	4.50	A
	Acondicionador B.	4.43	A
	Testigo	4.40	A

A pesar de que no fue significativo el efecto tiempo ni su interacción con el tratamiento (tabla 13), se muestra la evolución del pH al KCl para las dos profundidades muestreadas (figura 7 y 8). En oposición al pH en agua, las curvas para pH en KCl de ambas profundidades parecen mostrar patrones similares, con una tendencia de aumento sostenido en el tiempo.

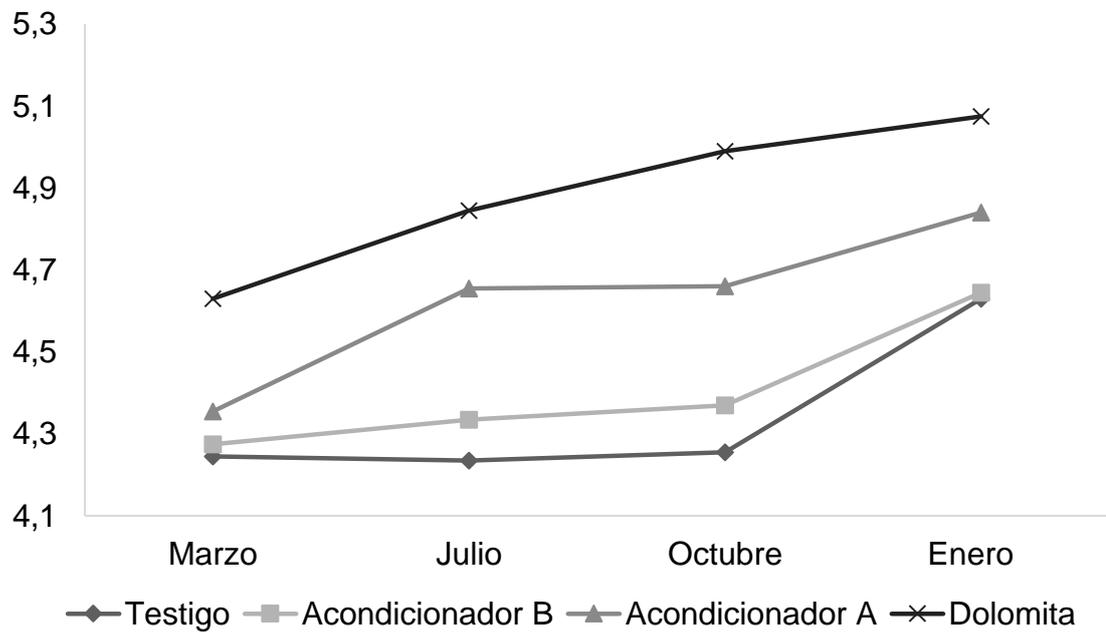


Figura 7. Evolución del pH al cloruro de potasio en el estrato de 0 a 5 cm para todos los tratamientos.

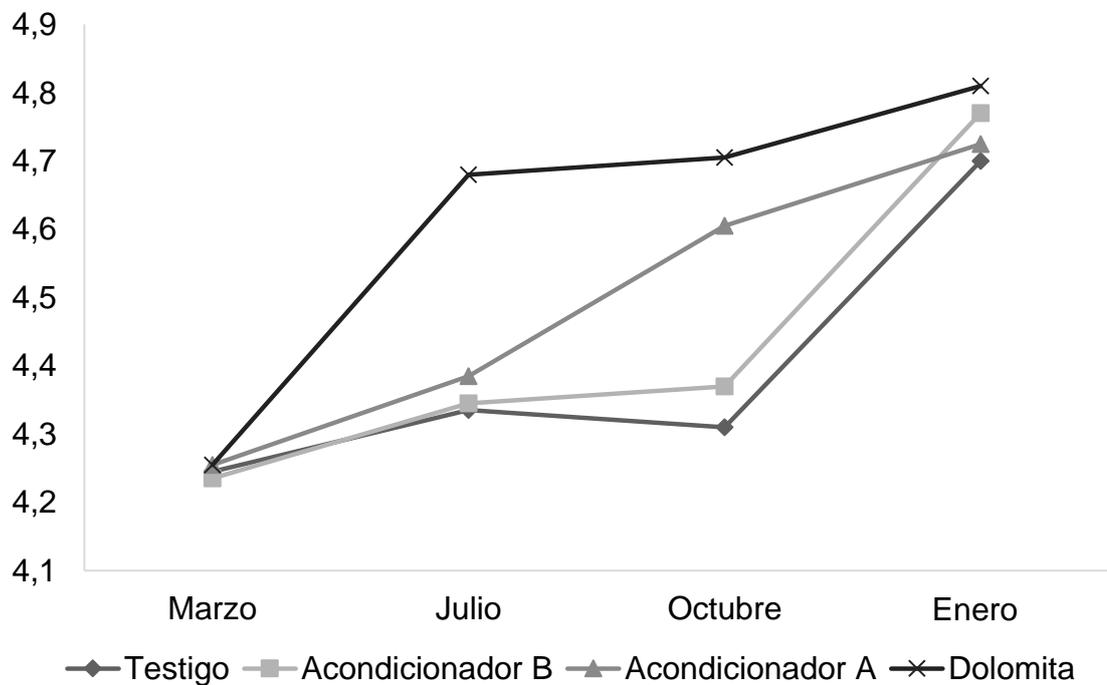


Figura 8. Evolución del pH al cloruro de potasio en el estrato de 5 a 15 cm para todos los tratamientos.

### 7.2.1.3. Relación entre pH al agua y pH al KCl

En las figuras 9 y 10 se presentan de manera gráfica las correlaciones entre el pH al agua y el pH al KCl del suelo para las profundidades de 0 a 5 cm ( $R = 0,76$ ;  $p\text{-valor} < 0,0001$ ) y de 5 a 15 cm ( $R = 0,48$ ;  $p\text{-valor} 0,005$ ) respectivamente. Existió una mayor correlación entre ambas variables para el estrato más superficial del suelo.

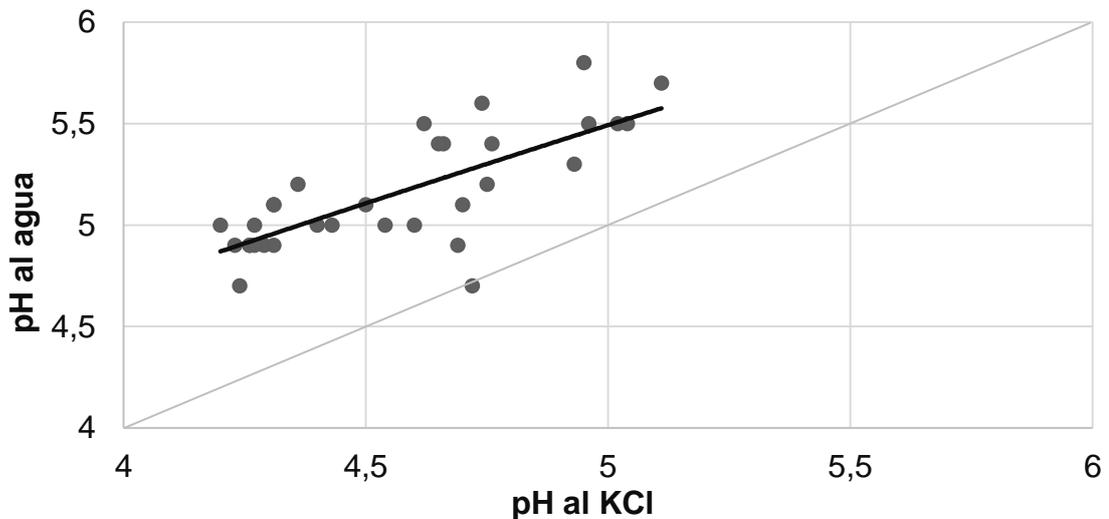


Figura 9. Relación entre pH del suelo al agua y al KCl para la capa más superficial del suelo (0 a 5 cm).

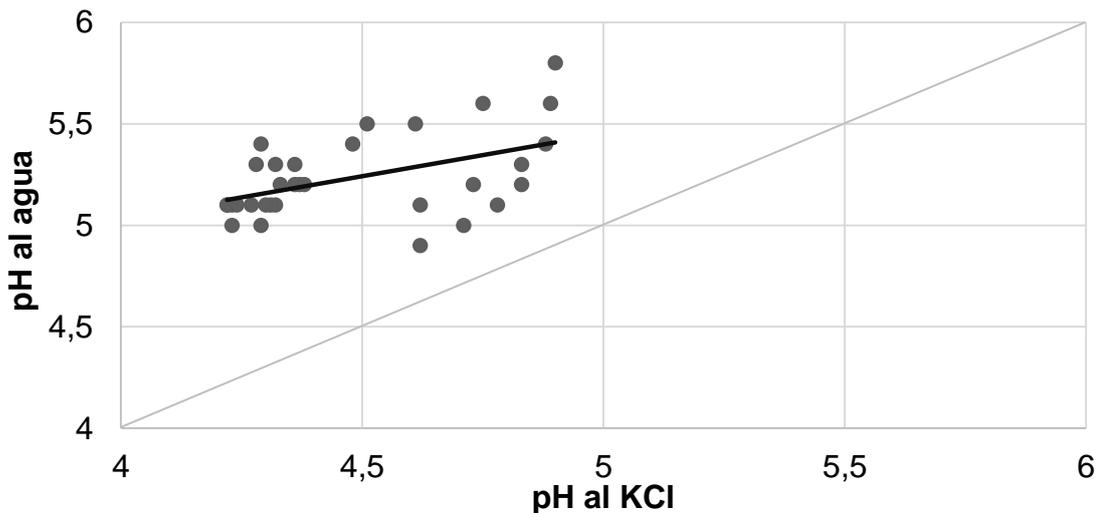


Figura 10. Relación entre pH del suelo al agua y al KCl para la capa más profunda del suelo (5 a 15 cm).

#### 7.2.1.4. Porcentaje de saturación de bases totales

En la figura 11 se presenta de manera gráfica la correlación entre el pH al agua del suelo y el porcentaje de saturación de bases totales ( $R = 1$ ;  $p$ -valor  $<0.0001$ ) para el total de análisis realizados durante el ensayo. Considerando que el valor del  $R$  es alto sería de esperar que cambios en el porcentaje de saturación de bases totales en el suelo se manifiesten como cambios en el pH al agua.

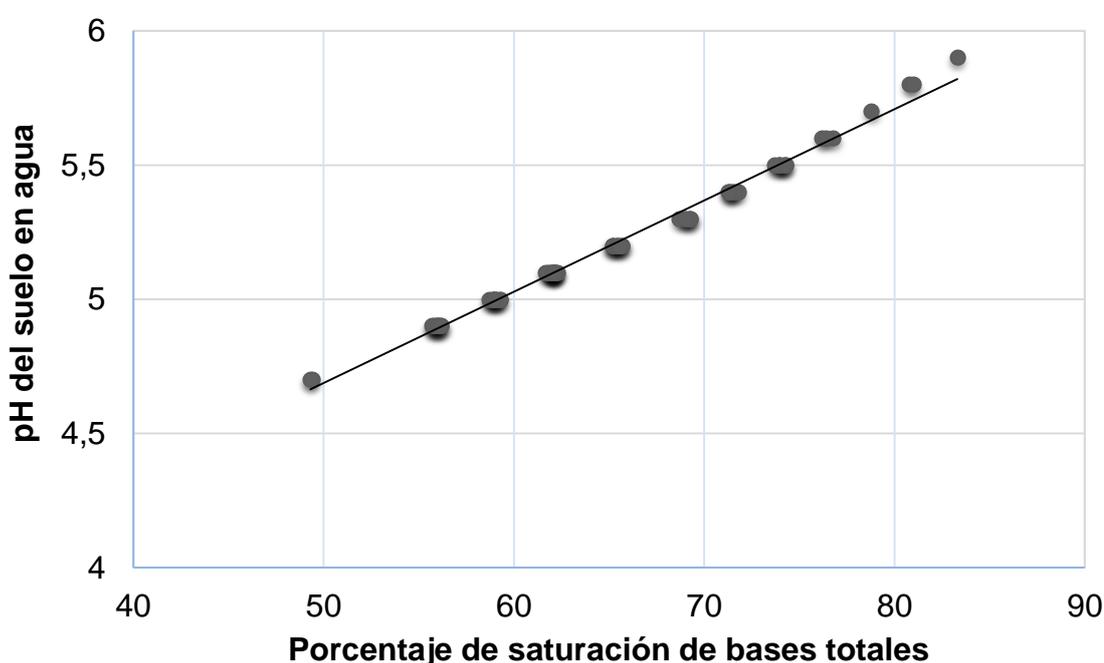


Figura 11. Relación entre el porcentaje de saturación en bases totales y pH al agua en el suelo.

En la tabla 16 se muestran los porcentajes de saturación de bases totales (calcio, magnesio y potasio) promedio para los diferentes tratamientos según profundidad de muestreo así como también su separación de medias. En el estrato 0 – 5 cm, el promedio de 73.9% registrado para dolomita fue significativamente distinto a los valores de 58.7 y 55.5% correspondientes al acondicionador B y al testigo, respectivamente. Por su parte, el acondicionador A no se diferenció del resto de los tratamientos. En el estrato de 5 – 15 cm, los promedios registrados de 72.7% para dolomita, 65.1% para

acondicionador A, 63.9% para acondicionador B y de 63.4% para testigo no lograron diferenciarse significativamente entre sí.

Tabla 16. Porcentaje de saturación de bases totales y separación de medias para los distintos tratamientos según profundidad de muestreo.

<b>Profundidad</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Promedio</b>	
0 a 5 cm	Dolomita	73.9	A
	Acondicionador A.	66.9	B A
	Acondicionador B.	58.7	B
	Testigo	55.5	B
5 a 15 cm	Dolomita	72.7	A
	Acondicionador A.	65.1	A
	Acondicionador B.	63.9	A
	Testigo	63.4	A

#### 7.2.1.5. Porcentaje de saturación de H, Ca, Mg y K.

En la figura 12 se presenta de manera gráfica la correlación hallada entre el pH al agua del suelo y los porcentajes de saturación de hidrógeno ( $R = -1$ ;  $p\text{-valor} < 0.0001$ ), calcio ( $R = 0.95$ ;  $p\text{-valor} < 0.0001$ ), magnesio ( $R = 0,87$ ;  $p\text{-valor} < 0.0001$ ) y potasio ( $R = -0.04$ ;  $p\text{-valor} 0.7532$ ) para el total de análisis realizados. Estas relaciones sugieren que el efecto de las enmiendas sobre el pH al agua operó a través de una sustitución de  $H^+$  por los cationes Ca y Mg, pero no del K, en el complejo de intercambio.

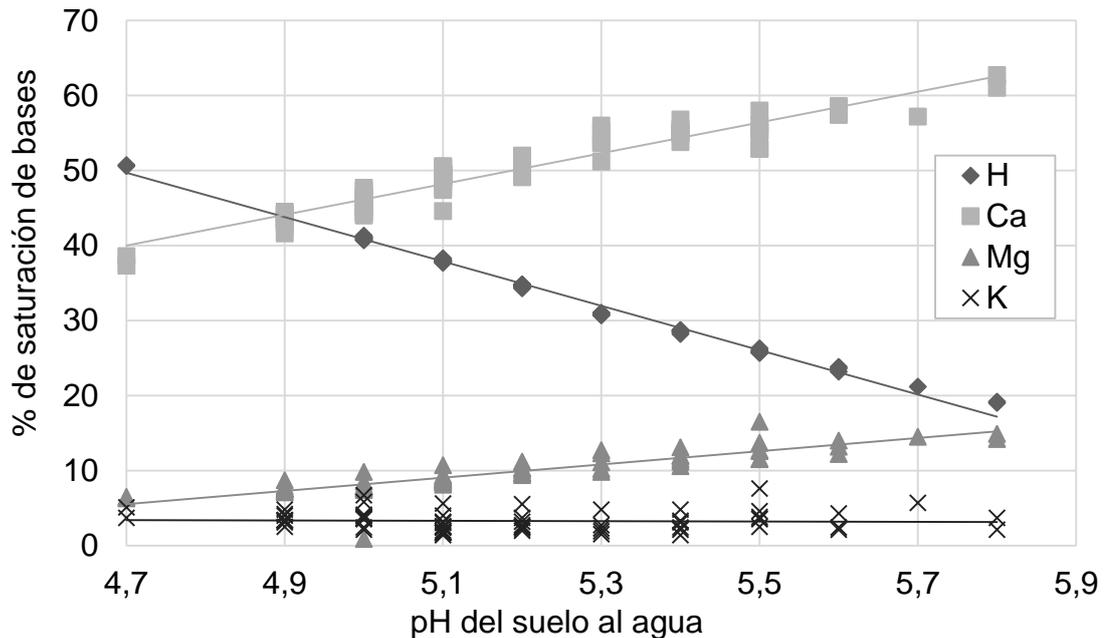


Figura 12. Relación entre el porcentaje de saturación de H, Ca, Mg y K, y pH al agua en el suelo.

En la tabla 17 se muestran los porcentajes de saturación de calcio, magnesio y potasio promedio de todo el experimento para los diferentes tratamientos según profundidad de muestreo, así como también su separación de medias.

En el estrato 0 – 5 cm, el porcentaje de saturación de magnesio fue superior en el tratamiento dolomita con 13% y significativamente diferente al resto de los tratamientos. Un valor intermedio obtuvo el acondicionador A con un 11%, diferente significativamente a los tratamientos acondicionador B y testigo con 8 y 7% respectivamente. Los tratamientos que lograron mayores porcentajes de saturación de calcio fueron el de dolomita y acondicionador A con 55 y 50% respectivamente. Estos valores no llegan a diferenciarse significativamente entre ellos, pero si se separan del resto de los tratamientos. Por su parte el acondicionador B y el testigo presentaron los menores porcentajes de saturación de calcio con valores de 45 y 43% respectivamente. No existieron diferencias significativas entre ellos.

En el estrato 5 – 15 cm, el porcentaje de saturación de magnesio fue superior en el tratamiento dolomita con 12% significativamente diferente a los

tratamientos acondicionador B y testigo mientras que el acondicionador A no logró diferenciarse significativamente del resto de los tratamientos. El tratamiento que logró mayor saturación de calcio fue el de dolomita con 56% significativamente diferente al resto de los tratamientos. Por otro lado, el acondicionador A, B y testigo presentaron valores de 52, 51 y 51% respectivamente sin diferencias significativas entre ellos. El porcentaje de saturación de potasio no presentó diferencias significativas entre los tratamientos para ambas profundidades de muestreo.

Tabla 17. Porcentaje de saturación de K, Ca y Mg, y separación de medias para los distintos tratamientos según profundidad de muestreo.

Profundidad	Tratamiento	Porcentaje de saturación					
		K	n.s.	Mg	<0.0001	Ca	<0.0001
0 a 5 cm	Dolomita	4	A	13	C	55	B
	Acondicionador A.	4	A	11	B	50	B
	Acondicionador B.	4	A	8	A	45	A
	Testigo	4	A	7	A	43	A
		K	n.s.	Mg	0.0107	Ca	0.00037
5 a 15 cm	Dolomita	2	A	12	B	56	B
	Acondicionador A.	2	A	10	A B	52	A
	Acondicionador B.	2	A	10	A	51	A
	Testigo	2	A	9	A	51	A

### 7.3. RESULTADOS DE FORRAJE

#### 7.3.1. Efecto sobre producción y calidad de forraje

##### 7.3.1.1. Tabla de resumen de ANOVA

Se presenta el resumen del ANOVA con los valores de p-valor para las variables materia seca, proteína y energía en el forraje disponible,

remanente y consumido, y para los efectos tratamiento, tiempo y la interacción entre éstos (tabla 18) (ver anexo figuras 24, 25 y 26). Hubo efecto significativo del tratamiento en el forraje disponible para las tres variables en estudio (materia seca, proteína y energía). Además, el efecto tiempo y su interacción con el tratamiento fueron significativos para la variable proteína disponible. Para las variables del forraje remanente y del forraje consumido no hubo efectos significativos del tratamiento, del tiempo ni de la interacción entre éstos (ver anexo figuras 27, 28 y 29).

Tabla 18. Resumen de análisis de la varianza de los parámetros materia seca, proteína y energía en forraje disponible, remanente y consumido.

	Variable	p-valor		
		Tratamiento	Tiempo	Tratamiento * Tiempo
Disponible	Materia seca	<0.0001	0.1027	0.2356
	Proteína	0.0001	0.0021	0.0300
	Energía	0.0040	0.2119	0.1908
Remanente	Materia seca	0.8243	0.2238	0.3985
	Proteína	0.7917	0.0789	0.1831
	Energía	0.7323	0.1377	0.2258
Consumo	Materia seca	0.2587	0.2534	0.7734
	Proteína	0.2587	0.2412	0.5278
	Energía	0.2680	0.6722	0.8235

### 7.3.2. Disponible

#### 7.3.2.1. Materia seca

La tabla 19 presenta los valores de materia seca disponible acumulada, así como también su separación de medias. El acondicionador A fue el que obtuvo mayor rendimiento en materia seca y fue significativamente superior al acondicionador B y al testigo. El tratamiento con dolomita se diferenció del testigo pero con comportamiento similar al acondicionador A y B.

Tabla 19. Materia seca disponible acumulada en kg/ha y separación de medias.

Tratamiento	Acumulado	<0.0001
Acondicionador A.	15717	C
Dolomita	14502	B C
Acondicionador B.	13403	A B
Testigo	11757	A

A pesar de que no fue significativo el efecto tiempo, ni su interacción con el tratamiento (tabla 18), se presenta de manera gráfica la evolución de la materia seca disponible (figura 13). Puede observarse una tendencia de mayor producción en los meses de noviembre y enero, mientras que en el mes de diciembre la producción tendió a ser la menor registrada.

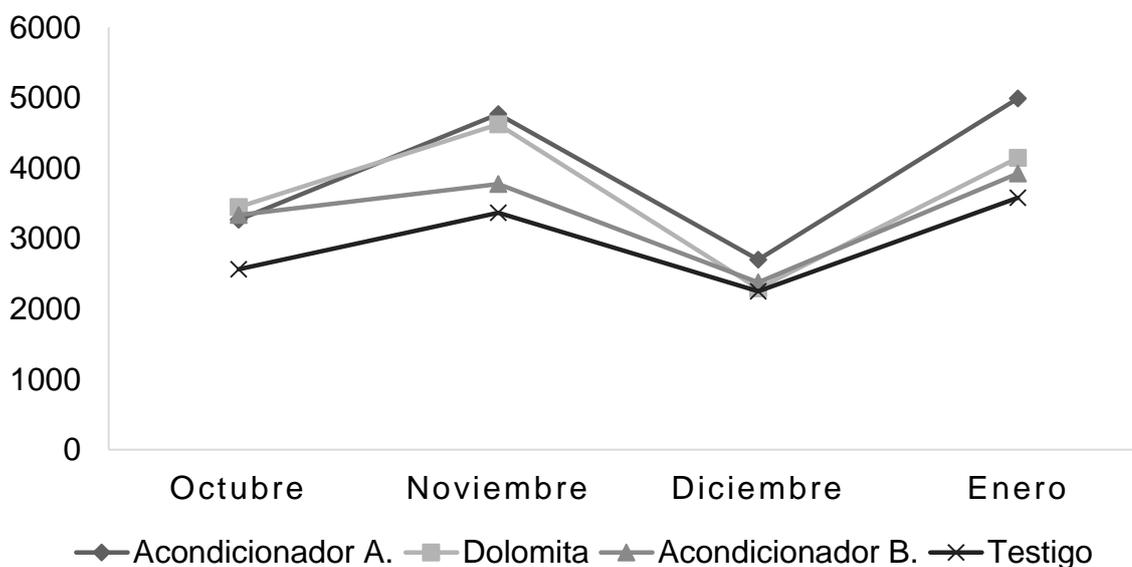


Figura 13. Materia seca disponible en kg/ha por tratamiento para cada momento de muestreo.

### 7.3.2.2. Proteína

En la tabla 20 se presenta el rendimiento de proteína disponible acumulado en kg/ha, así como también su separación de medias. El

tratamiento con al acondicionador A fue el que logró mayor producción de proteína, significativamente diferente al acondicionador B y al testigo. El tratamiento con dolomita se diferenció del testigo pero con comportamiento similar al acondicionador A y B.

Tabla 20. Proteína disponible acumulada en kg/ha y separación de medias.

Tratamiento	Acumulado	0.0001
Acondicionador A.	2635	C
Dolomita	2543	B C
Acondicionador B.	2216	A B
Testigo	1990	A

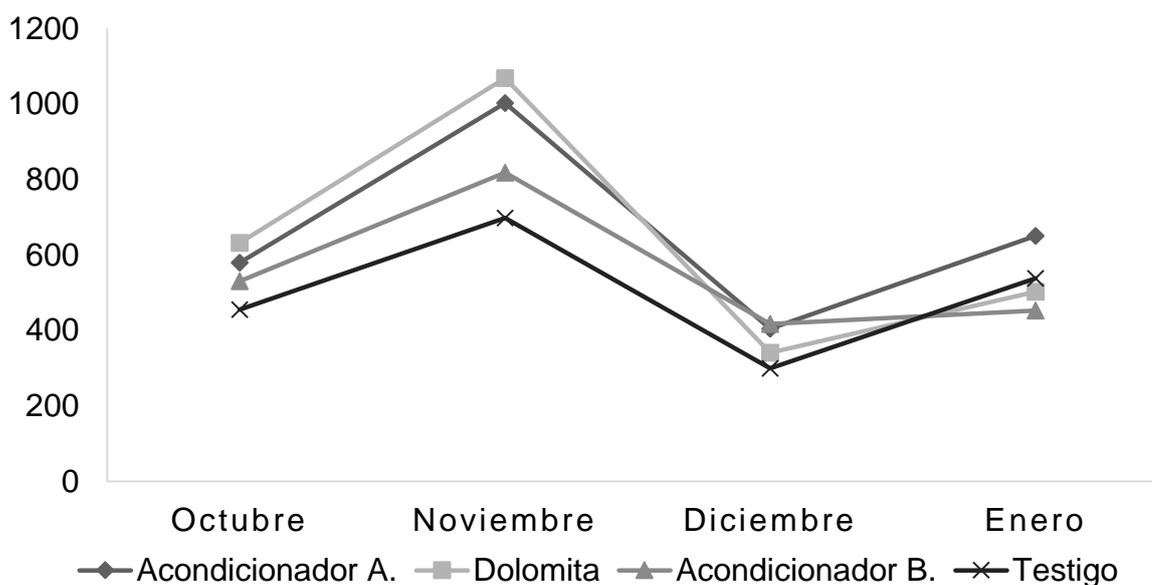


Figura 14. Proteína disponible en kg/ha por tratamiento para cada momento de muestreo.

Como se mostró en la tabla 18, los resultados obtenidos fueron afectados significativamente por el factor tiempo. En noviembre (segunda fecha de muestreo) fue cuando se registró la mayor producción de proteína, mientras que en diciembre (tercera fecha de muestreo) la producción de

proteína, fue la menor registrada durante todo el experimento. Por otro lado en octubre y enero (primer y cuarta fecha respectivamente) se lograron producciones intermedias.

En la tabla 18, se mostró el efecto significativo de la interacción tiempo con tratamiento. En octubre no se diferenciaron los tratamientos en cuanto a la producción de proteína. En noviembre los tratamientos dolomita y acondicionador A lograron la mayor producción, diferenciándose significativamente del testigo. Por su parte el acondicionador B no se diferenció del resto.

En diciembre los tratamientos acondicionador A y B lograron la mayor producción, diferenciándose significativamente del testigo. Por su parte la dolomita no se diferenció del resto. Finalmente para enero el tratamiento acondicionador A logró la mayor producción, diferenciándose significativamente del acondicionador B. Por su parte el testigo y la dolomita no se diferenciaron del resto de los tratamientos.

### 7.3.2.3. Energía

En la tabla 21 se presenta el efecto de los tratamientos sobre la energía neta de lactación disponible acumulada y su separación de medias. El tratamiento con al acondicionador A fue el que produjo mayor energía disponible y fue significativamente mayor al acondicionador B y al testigo. El tratamiento con dolomita se diferenció del testigo pero con comportamiento similar al acondicionador A y B.

Tabla 21. Energía neta de lactación en Mcal/ha disponible acumulada.

<b>Tratamiento</b>	<b>Acumulado</b>	<b>0.0040</b>
Acondicionador A.	22014	C
Dolomita	20292	B C
Acondicionador B.	18920	A B
Testigo	17238	A

A pesar de que no fue significativo el efecto tiempo, ni su interacción con el tratamiento (tabla 18) se presenta de manera gráfica la evolución de energía neta de lactación disponible (figura 15). Puede observarse una tendencia de mayor producción en los meses de noviembre y enero, mientras que en el mes de diciembre la producción tendió a ser la menor registrada.

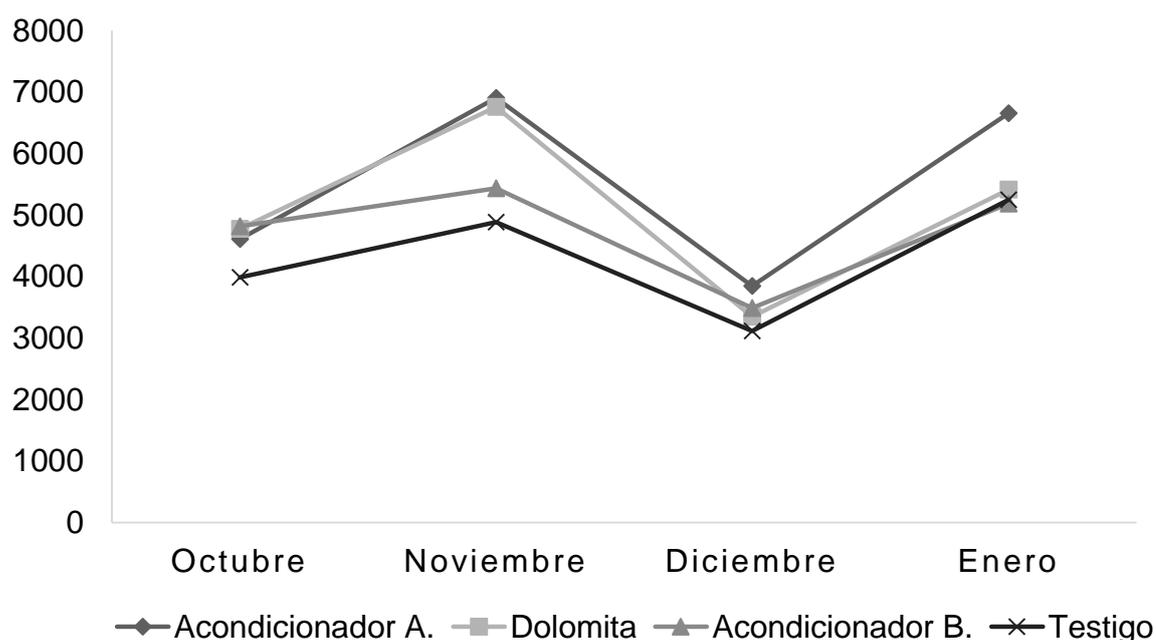


Figura 15. Energía neta de lactación en Mcal/ha disponible por tratamiento para cada momento de muestreo.

#### 7.3.2.4. Forraje remanente y consumido

En la tabla 22 se presentan los valores acumulados promedio de materia seca, proteína y energía para el forraje remanente y consumido durante todo el ciclo del ensayo. No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para las tres variables antes mencionadas tanto para el forraje remanente como para el forraje consumido (tabla 18).

Tabla 22. Promedio de materia seca, proteína y energía acumulado en el forraje remanente y consumido en los cuatro cortes del período experimental.

	<b>Materia Seca (kg/ha)</b>	<b>Proteína (kg/ha)</b>	<b>Energía (Mcal/ha)</b>
Remanente	3543	471	4525
Consumo	10301	1875	15041

## **8. DISCUSIÓN**

### **8.1. SUELO**

#### **8.1.1. pH en agua y en KCl**

En virtud de que los resultados para pH en agua y en KCl fueron muy similares (tablas 14 y 15), su discusión será abordada en forma conjunta. El pH en agua consistentemente mostró valores ligeramente mayores que el pH en KCl (figuras 5, 6, 7 y 8). Podría deberse a que el pH al agua mide la concentración de iones  $H^+$  en la solución del suelo o sea la acidez actual. Por su parte el pH al cloruro de potasio determina no solo los iones  $H^+$  en la solución sino también los iones  $H^+$  y  $Al^{+3}$  retenidos en el suelo denominados acidez de reserva. Esto ocurre por un efecto de sustitución de  $H^+$  en los coloides por el  $K^+$  del extractante, aumentando de esta manera la concentración de iones  $H^+$  en solución del suelo (Rabuffetti, 2017; Soriano, 2018; Vázquez y Pagani, 2015).

##### **8.1.1.1. De 0 a 5 cm de profundidad**

El PRNT de la dolomita es sensiblemente menor al del acondicionador granulado, sin embargo la mayor dosis utilizada por la enmienda en relación a las utilizadas de éste último, podrían explicar la mayor neutralización de acidez producida por la dolomita y detectados por análisis en el suelo.

La ausencia de diferencia significativa entre los acondicionadores B y A puede ser explicada porque el error experimental del estudio no haya permitido detectar diferencias superiores a la diferencia mínima significativa. Sin embargo, este último mostró una tendencia algo superior en cuanto a la magnitud del cambio lo que podría estar explicado por la dosis empleada para cada caso.

Pudo haber existido también un efecto del laboreo aplicado sólo al tratamiento dolomita el que pudo haber favorecido la deposición de una fracción de suelo más profunda, con niveles de acidez sensiblemente menores, en el estrato más superficial del suelo (Tarkalson et al, citado por Kahlon y Singh 2014). Lopez-Fando y Pardo, citado por Neugschwandtner et al 2014, informaron niveles de pH superiores en condiciones de laboreo con arado de vertedera que en condiciones de no laboreo para la capa más superficial del suelo.

La aplicación de dolomita fue la que produjo el aumento de pH al agua de mayor magnitud, aunque el acondicionador granulado fue el que produjo el mayor aumento de pH por unidad de producto aplicado. El acondicionador logró incrementos de 0.33 y 0.25 puntos de pH por tonelada de producto aplicado para los tratamientos A y B respectivamente en el estrato superior del suelo. Así mismo se alcanzaron niveles de corrección de 0.17 puntos de pH por tonelada de caliza aplicada; estos datos coinciden con los reportados en nuestro país por Bordoli, citado por Casanova 2015.

#### 8.1.1.2. De 5 a 15 cm de profundidad

Si bien no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos para el estrato de suelo más profundo, la aplicación de dolomita mostró consistentemente niveles más altos de pH (tablas 14 y 15). Resultados similares fueron obtenidos por Pinilla, 2001. Esto podría explicarse por la incorporación en el perfil de la enmienda calcárea, lo que permitió llegar al estrato más bajo del perfil. Esto no ocurrió con el acondicionador granulado ya que fue aplicado en superficie sin incorporación.

La aplicación del acondicionador granulado no produjo aumentos significativos de pH en el estrato de 5 a 15 cm (tablas 14 y 15). Esto pudo deberse a la no incorporación en profundidad de este producto. En estos casos la neutralización del pH en profundidad dependerá de la capacidad que tengan las sustancias alcalinas como el  $\text{HCO}_3^-$  u  $\text{OH}^-$ , que surgen de las reacciones de la enmienda en el suelo, de moverse a las capas profundas del perfil (Sumner, citado por Caires et al, 2005). Sin embargo, este movimiento dependerá de la concentración de cationes ácidos en las capas superficiales del suelo, de la reactividad del material encalante, así como también la dosis de enmienda aplicada (Caires et al, 2005).

Un experimento de campo se realizó en el período comprendido entre 1993 y 2003 en el estado de Paraná, Brasil por Caires et al (2005), para evaluar en el largo plazo, el avance en profundidad del efecto de una enmienda calcárea aplicada en superficie. Estos investigadores constataron aumentos significativos de pH en profundidades de 10 a 20 cm cuando el pH ( $\text{CaCl}_2$ ) en la capa más superficial del suelo (0 – 5 cm) fue superior a 5.0 y la enmienda había reaccionado totalmente. Esto sucedió en el quinto año de aplicada la enmienda en superficie.

#### 8.1.1.3. Relación entre pH al agua y pH al KCl.

Se encontró una mayor correlación entre ambos métodos de determinación de pH, en el horizonte más superficial del suelo y menor correlación en el horizonte más profundo (figuras 9 y 10). Resultados similares fueron notificados por Beery y Wilding en 1971 en Ohio, Estados Unidos, sobre suelos Molisoles. Sin embargo en suelos Ultisoles y Alfisoles, más meteorizados, con menos materia orgánica y con arcillas predominantes del tipo 1:1 la correlación fue alta en todos los horizontes.

Por otro lado, Čapka et al (2009), correlacionaron ambos métodos de determinación de pH en tres suelos diferentes. Notaron la máxima correlación sobre suelo ácido, una correlación intermedia en suelo neutro y la mínima correlación en suelo alcalino de Croacia.

Según Gabriloaiei (2012), la presencia de sales solubles en una muestra de suelo puede influir en el valor de pH medido al cloruro de potasio. Es por ello que algunos investigadores prefieren medirlo en una mezcla con otros cloruros ( $\text{CaCl}_2$ ) para enmascarar las diferencias entre estas dos variables.

La desviación en la correlación se debe al efecto amortiguador del aluminio a pH bajo y a la presencia de carbonato a pH alto (Gabriloaiei, 2012). Así mismo, la fuerza iónica, las interacciones intercambiables (Na, K, Ca, Mg y Al) como también el Al y Mn extraídos, podrían influir en las mediciones del pH del suelo (Little y Aust, citado por Gabriloaiei 2012).

#### 8.1.2. Relación con % de saturación de bases totales.

Se encontró una alta correlación entre el porcentaje de saturación de bases totales y el pH al agua en el suelo, independientemente de la profundidad de muestreo y del tratamiento (figura 11).

Esta alta correlación observada, coincide con los resultados publicados por Morón en el 2000. Ocurre la neutralización de iones  $\text{H}^+$  por los  $\text{OH}^-$  que se producen por la disolución de las enmiendas cuando entran en contacto con el agua del suelo. Éstas se van disolviendo a medida que los iones  $\text{OH}^-$  son removidos de la solución a través de la neutralización de los iones  $\text{H}^+$  para formar agua. Esta reacción continúa en la medida que aparezcan iones  $\text{H}^+$  en la solución del suelo provenientes de los sitios de intercambio, llamada acidez de reserva. Los iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  que se generan por efecto de la reacción de las enmiendas, van a ocupar los sitios de intercambio que dejan los  $\text{H}^+$  (Espinosa y Molina, 1999; Rabuffetti, 2017).

Por otro lado, la alta correlación entre el porcentaje de saturación de iones hidrógeno y el pH al agua del suelo (figura 12) era esperable dado que el pH al agua es la cuantificación de la actividad de iones  $\text{H}^+$  en la solución del suelo (Rabuffetti, 2017).

La correlación entre pH al agua y el porcentaje de saturación de calcio y el porcentaje de saturación de magnesio también fue alta (figura 12). Esto

se puede explicar por efecto de las enmiendas aplicadas ya que ambas son fuentes de éstos nutrientes. En la medida que los iones  $\text{CO}_3^{-2}$  van reaccionando con los  $\text{H}^+$  de la solución del suelo, los cationes ácidos retenidos en el complejo de intercambio pasan a la solución del suelo y los iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  van a ocupar dichos sitios de intercambio (Espinosa y Molina, 1999).

Por su parte el porcentaje de saturación de potasio presentó un R bajo con respecto al pH al agua del suelo (figura 12). Esto pudo deberse a que los coloides del suelo presentan mayor afinidad por los iones Ca y Mg que por el ion K (Sadeghian y Zapata, 2012). Como consecuencia los iones Ca y Mg pudieron haber ocupado de manera preferencial los sitios de intercambio libres.

## 8.2. FORRAJE

### 8.2.1. Forraje disponible

#### 8.2.1.1. Materia seca de forraje disponible

Los tratamientos que lograron mayor rendimiento de materia seca fueron los de dolomita y acondicionador A. Esto podría explicarse por el incremento de pH logrado en estos tratamientos, ya sea determinado en agua como en cloruro de potasio. De acuerdo a los resultados de la sección 7.2.1.1, por efecto de estos tratamientos el pH en agua subió de 4.90 a 5.70 y 5.40 para la dolomita y el acondicionador A respectivamente.

La bibliografía es consistente en que condiciones de neutralidad o ligera acidez son adecuadas para el crecimiento de la mayoría de las especies (Porta et al, citado por Vázquez y Pagani, 2015; Sierra, 1982; Vázquez y Pagani, 2015). Según Sierra (1982), los rangos de pH al agua óptimos en el suelo para *Trifolium pratense* (trébol rojo) oscila entre 6.0 y 7.0, para el *Trifolium repens* (trébol blanco) oscila entre 5.5 y 7.0 y para el caso de la *Festuca arundinacea* (festuca) oscila entre 4.5 y 6.5. Por su parte el *Lotus*

*corniculatus* (lotus) logra los mejores niveles de producción con valores de pH en agua entre 6.4 y 6.6 (Langer, 1981).

En primer lugar, los efectos observados de la dolomita y del acondicionador A podrían estar explicados por una mayor disponibilidad y absorción de Ca y Mg. Para el caso del cultivo de soja, se reportaron respuestas al encalado que se explicaron no por el aumento en el pH, sino por el aumento en la concentración de calcio en suelo (Barbieri et al, 2015). El cambio a nivel nutricional se puede explicar por dos efectos. Por un lado, el uso de materiales encalantes ricos en Ca y Mg, provoca un aumento en los niveles de estos nutrientes en la solución del suelo, lo cual lleva a mayor disponibilidad y posibilidad de absorción por parte de los vegetales (Vázquez y Pagani, 2015). Por otro lado, la absorción de Ca y Mg en condiciones de pH bajo, está fuertemente afectada por la competencia de otros cationes como puede ser Al, Mn, H y K. Esto ocasiona que en condiciones de suelo donde no se aumente el pH, no se mejorará la absorción de Ca y Mg por el sólo hecho de aumentar su concentración en la solución del suelo. Esta competencia directa con otros cationes se supera al aumentar el pH del suelo, por lo que la absorción de Ca y Mg también aumenta por esta vía (Casanova, 2015; Vázquez y Pagani, 2015).

En segundo lugar, los mayores rendimientos en materia seca de los tratamientos dolomita y acondicionador A podrían estar explicados por un mayor porcentaje de saturación de bases totales, 73.9 y 66.9% respectivamente. Según Usón et al (2010), ningún cultivo soporta niveles de saturación de bases totales en el entorno del 40% o inferiores, los niveles deseables para la mayoría de las especies vegetales varían entre 75 y 90%.

En tercer lugar, la mayor producción de materia seca del tratamiento dolomita y acondicionador A podría ser atribuida al porcentaje de saturación de calcio (55 y 50% respectivamente) y magnesio (13 y 11% respectivamente) significativamente diferentes a los demás tratamientos. Sería deseable que el porcentaje de saturación esté en el entorno de 65% de Ca, 10% de Mg para la mayoría de los suelos (Bear y Toth, citados por Sadeghian 2012). Por su

parte, Sadeghian (2012) considera que un 10% de saturación de magnesio es adecuado para la mayoría de los suelos. Por otro lado, el porcentaje de saturación de calcio debería ser superior al 70% para suelos con arcillas montmorilloníticas y en el entorno del 40 al 50% para suelos con arcillas caoliníticas.

En cuarto lugar, en los tratamientos dolomita y acondicionador A puede haber existido un efecto beneficioso de la corrección del pH sobre la fijación biológica del nitrógeno. La acidez del suelo (asociada o no a la presencia de  $Al^{+3}$  y  $Mn^{+2}$ , y deficiencia de  $Ca^{+2}$ ) interfieren en el crecimiento de las leguminosas y en la fijación de nitrógeno en varias de sus etapas: afectan a la bacteria rizobio en vida libre, el inicio de la nodulación, la funcionalidad de los nódulos y por lo tanto el crecimiento de la planta (Baraibar, 1994).

Por último, la mayor producción en los tratamientos antes mencionados pudo deberse a la neutralización de elementos tóxicos en el suelo como el aluminio, manganeso e hidrógeno. El aluminio soluble ( $Al^{+3}$ ) es el factor más limitante para el crecimiento y la producción de los cultivos en suelos ácidos (Tang et al, 2002; Álvarez et al, 2005; Liao et al, 2006; Cristancho et al, citados por Rivera et al 2016). A nivel del suelo, disminuye la solubilidad del fósforo, molibdeno así como también la concentración de macronutrientes en la solución (Rout et al, citado por Rivera et al 2016). A nivel de planta, altera el metabolismo general, especialmente inhibiendo el crecimiento radicular, ocasionando así una reducción en la capacidad del vegetal de captar agua y nutrientes (Ma et al, Barceló y Poschenrieder, citados por Rivera et al, 2016). La práctica del encalado disminuye el  $Al^{+3}$  en el suelo precipitándolo y disminuyendo así su efecto fitotóxico (Rabuffetti, 2017). El manganeso aumenta su disponibilidad en suelos ácidos a razón de 100 veces por una unidad de descenso de pH (Kabata-Pendias y Pendias, citado por Gomez-Miguel y Sotés, 2014). Esta mayor disponibilidad puede ocasionar toxicidad en el vegetal causando degradación de las auxinas e interfiriendo en el metabolismo del calcio (Rodríguez y Morales, 2005). La práctica del

encalado disminuye sensiblemente el  $Mn^{+2}$  en suspensión e intercambiable precipitándolo en forma de  $MnO_2$  (dióxido de manganeso) (Gomez-Miguel y Sotés, 2014). El hidrógeno por su parte afecta la absorción de calcio, magnesio y potasio a nivel del suelo por un efecto competitivo. Sin embargo, puede también ocasionar deterioro de las membranas radiculares afectando así la capacidad de absorción de iones (Rabuffetti, 2017). La práctica del encalado disminuye sensiblemente la presencia de iones  $H^+$  como se comentó en la sección 8.1.2.

#### 8.2.1.2. Proteína en forraje disponible

Los tratamientos que presentaron mayor producción de proteína fueron dolomita y acondicionador a altas dosis. Esto se puede explicar no por un cambio en el contenido de proteína por unidad de materia seca, sino por mayor producción de materia seca, lo cual conlleva a que la cantidad de proteína producida aumente.

Los resultados obtenidos coinciden con otros trabajos de investigación donde se observa que el contenido de proteína en planta no varió significativamente con aplicaciones de dolomita (Rodd et al, 2010).

#### 8.2.1.3. Energía en forraje disponible

Los tratamientos que presentaron mayor producción de energía neta de lactación fueron los tratados con dolomita y acondicionador A. De forma similar al caso de proteína, esto podría explicarse por la mayor producción de forraje y no por mayor contenido de energía por unidad de materia seca.

### 8.2.2. Forraje remanente

No se observaron diferencias significativas en cuanto a los niveles de materia seca remanente, esto podría ser atribuible al sistema de pastoreo empleado en el establecimiento. Éste consiste en pastorear con cargas muy altas la parcela, presionando a los animales a consumir todo el forraje

disponible sin tener posibilidad de seleccionar, logrando de esta manera porcentajes de utilización del forraje superiores al 85% (ver anexo figuras 7 y 8) (Patrón, com. pers.<sup>5</sup>).

Los remanentes de proteína y ENL tampoco presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. Esto podría deberse a que la materia seca de rechazo en los diferentes tratamientos no presentó diferencias. Así mismo, tampoco varió el porcentaje de proteína ni las megacalorías de energía neta de lactación en el forraje remanente.

### 8.2.3. Forraje consumido

Los consumos de materia seca, proteína y energía neta de lactación en los diferentes tratamientos no mostraron diferencias significativas, aunque sí se observó una tendencia que se asemeja a los resultados del disponible para las tres variables (ver anexo figuras 27, 28 y 29).

El forraje consumido es la diferencia entre el promedio de los ocho cortes por cada una de las ocho unidades experimentales para el forraje disponible y remanente. Esto disminuye el número de observaciones a ocho para la variable forraje consumido, comparado con las sesenta y cuatro para forraje disponible y remanente. Al disminuir el número de observaciones, aumenta la varianza muestral, obteniendo así mayores diferencias entre los datos de la muestra con respecto a los datos poblacionales, y dificultando la detección de diferencias a nivel estadístico (Milton, 2007).

---

<sup>5</sup> Com. pers. Patrón, E. 2018. Asesor privado. José Enrique Rodó, Uruguay.

## **9. CONCLUSIONES**

Se demostró la respuesta positiva al encalado en rendimiento de forraje asociada a aumentos del pH del suelo, así como también en el contenido de calcio y magnesio para un sitio que sufrió acidificación bajo un uso intensivo lechero. Sin embargo no se logró detectar cambios en la calidad de forraje producido, medido a través del contenido de energía neta de lactación y proteína en la pastura.

Con respecto al conocimiento nacional existente, este trabajo aporta información cualitativa en cuanto a la corrección de pH a nivel del suelo y su respuesta positiva en la producción del forraje. Se comprobó para un predio lechero comercial que la acidez del suelo impone una restricción al rendimiento de la pastura mezcla de gramíneas y leguminosas. En el mismo sentido la nueva enmienda evaluada puede generar respuestas similares a las enmiendas calcáreas tradicionales con ventajas operativas en cuanto a su aplicación y uso.

Dado que el trabajo consistió en un estudio de respuesta en un único sitio, en un período determinado de tiempo, no aporta información sobre probabilidad ni magnitud de respuesta en otros tipos de pasturas o ambientes.

Trabajos futuros en esta línea deberían comprender la caracterización de las especies forrajeras actualmente utilizadas en nuestro país para determinar su sensibilidad a la acidez del suelo. De igual manera se deberían discriminar los diferentes cultivares dentro de cada especie. Además, se entiende necesario generar más información sobre la respuesta de nuevos materiales correctores de pH en diferente tipo de ambientes y evaluarlos en el largo plazo para generar nuevas recomendaciones. Finalmente sería importante comprender y evaluar los procesos conducentes a la acidificación del suelo, que permitan orientar estrategias de prevención de dicha problemática.

## 10. **BIBLIOGRAFÍA**

- ARUNAVA, P.; KHRIDINUO, P. 2013. Aluminium toxicity tolerance in crop plants: present status of research. *African Journal of Biotechnology*. 12(24): 3752-3757.
- ATHANASE, N.; VICKY, R.; JAYE, M.; SYLVESTRE, H. 2013. Soil acidification and lime quality: source of soil acidity, its effect on plants nutrients, efficiency of lime and liming requirements. *Agricultural Advances*. 2(9): 259-269.
- BARAIBAR, A. 1994. Fijación biológica de nitrógeno. Estrategias para su maximización. Montevideo. INIA. p. 23-26 (Serie técnica n° 42).
- BARBIERI, P.; ECHEVERRÍA, H.; SAINZ, H.; MARTINEZ, J. 2015. Soybean and wheat response to lime in no-till Argentinian mollisols. *Soil and Tillage Research*. 152: 29-38.
- BEERY, M.; WILDING, L. 1971. The relationship between soil pH and base saturation percentage for surface and subsoil horizons of selected mollisols, alfisols and ultisols in Ohio. *The Ohio Journal of Science*. 1(71): 43-55.
- BERNAL, A.; FORERO, F. 2014. Evaluación de especies vegetales para el manejo de la acidez en suelos sulfatados ácidos de Paipa, Boyacá. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 2(15): 229-236.
- BOLAN, N.; ADRIANO, D.; CURTIN, D. 2003. Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. *Advances in Agronomy*. 78: 215-272.
- BURI, M.; ISSAKA, R.; WAKATSUKI, T. 2005. Extent and management of low pH soils in Ghana. *Soil Science and Plant Nutrition*. 51(5): 755-759.
- CAIRES, E.; ALLEONI, L.; CAMBRI, M.; BARTH, G. 2005. Surface Application of Lime for Crop Grain Production Under a No-Till System. *Agronomy Journal*. 97: 791-798.

- CAMPBELL, C.; ZENTNER, R. 1984. Effect of fertilizer on soil pH after 17 years of continuous cropping in southwestern Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*. 64: 705-710.
- ČAPKA, D.; KISIĆ, I.; ZGORELEC, Z.; MESIĆ, M.; JURIŠIĆ, A. 2009. Determination of Soil pH in Dominant Soil Types in the Republic of Croatia. *Agriculturae Conspectus Scientificus*. 74: 13-19.
- CASANOVA, O. 2015. Acidez y encalado en suelos del Uruguay. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía Universidad de la República. Departamento de suelos y agua. Curso de fertilidad. 24 p.
- CURTIN, D.; UKRAINETZ, H. 1997. Acidification rate of limed soil in a semiarid environment. *Canadian Journal of Soil Science*. 77(3): 415-420.
- D'SOUZA, M.; JAYARAMAN, T. 2011. Soil acidity and its management (liming). Central Coffe Research Institute, p.12-14.
- DALOVIC, I.; JOCKOVIC, D.; DUGALIC, G.; BEKAVAC, G.; PURAR, B.; SEREMESIC, S.; JOCKOVIC, M. 2012. Soil acidity and mobile aluminum status in pseudogley soils in Čačak-Kraljevo basin. *Journal of the Serbian Chemical Society*. 77(6): 833-843.
- ELLIOTT, C.; HOYT, P.; NYBORG, M.; SIEMENS, B. 1973. Sensitivity of several species of grasses and legumes to soil acidity. *Canadian Journal of Plant Science*. 53: 113-117.
- ESPINOZA, J.; MOLINA, E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. 1a. ed. Costa Rica. International Plant Nutrition Institute. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. 42 p.
- FERRO, D.; MILLÁN, G.; MERANI, V.; MACHETTI, N.; LARRIEU, L.; NUGHES, L.; VÁZQUEZ, M. 2015. Efectos del agregado de dolomita y fertilizantes cálcicos -magnésicos en el rendimiento de Avena sativa L. en suelos ácidos de la región templada argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. 19: 22-25.
- GAVRILOAIEI, T. 2012. The influence of electrolyte solutions on soil pH measurements. *Revista de Chimie*, 63(4): 396-400.

- GIRÓN, P.; MACHIAVELLO, A.; BARRACO, M.; OTTAVIANO, C.; FERRO, D.; VÁZQUEZ, M. 2016. Aplicación de correctores básicos y fertilizantes cálcicos-magnésicos en el cultivo de soja. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. 24: 20-23.
- GOMEZ-MIGUEL, V.; SOTÉS, V. 2014. El manganeso y la viticultura: una revisión. Madrid. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 19 p.
- GUPTA, N.; GAURAV, S.; KUMAR, A. 2013. Molecular basis of Aluminium toxicity in plants: A Review. *American Journal of Plant Science*. 4: 21-37.
- HOLLAND, J.; BENNETT, A.; NEWTON, A.; WHITE, P.; MCKENZIE, B.; GEORGE, T.; PAKEMAN, R.; BAILEY, J.; FORNARA, D.; HAYES, R. 2018. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A Review. *Science of the Total Environment*. 610-611:316-332.
- INUMET (Instituto Uruguayo de Meteorología, Uruguay). Boletín pluviométrico. (En línea). Consultado 06 julio 2019. Disponible en: <https://www.inumet.gub.uy/clima/recursos-hidricos/boletin-pluviometrico>
- IQBAL, M. 2012. Acid tolerance mechanisms in soil grown plants. *Malaysian Journal of Soil Science*. 16: 1-21.
- KAHLON, M.; SINGH, G. 2014. Effect of tillage practices on soil physico-chemical characteristics and wheat straw yield. *International Journal of Agricultural Sciences*. 4: 289-293.
- JURE, C. 2015. Soil acidification and liming in grassland production and grassland soil fertility in Slovenia. *Acta Agriculturae Slovenica*, 103: 15-25.
- KISINYO, P.; OPALA, P.; GUDU, S.; OTHINOO, C.; OKALEBO, J.; PALAPALA, V.; OTINGA, A. 2014. Review: Recent advances towards understanding and managing Kenyan acid soils for improved crop production. *African Journal of Agricultural Research*. 9: 2397-2408.

- KLEIN, C.; MONAGHAN, R.; SINCLAIR, A. 1997. Soil acidification: A provisional model for New Zealand pastoral systems. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 40: 541-557.
- KOWALENKO, C.; IHNAT, M. 2010. Effect of limestone application of soil pH and extractable elements in a cauliflower field study. *Canadian Journal of Soil Science*. 90: 655-665.
- KOWALENKO, C.; IHNAT, M. 2011. Fraser oat and soil extraction responses to zinc and manganese applied to a soil with historic limestone treatment. *Canadian Journal of Soil Science*. 91: 647-659.
- KUNHIKRISHNAN, A.; THANGARAJAN, R.; BOLAN, N.; XU, Y.; MANDAL, S.; GLEESON, D.; SESHADRI, B.; ZAMAN, M.; BARTON, L.; TANG, C.; LUO, J.; DALAL, R.; DING, W.; KIRKHAM, M.; NAIDU, R. 2016. Functional relationships of soil acidification, liming, and greenhouse gas flux. *Advances in agronomy*, 139: 1-71.
- KUNTYASTUTY, H.; MUZAIYANAH, S. 2017. Effect of organic fertilizer and its residual on cowpea and soybean in acid soils. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*. 5: 987-994.
- LANGER, R.; 1981. *Las pasturas y sus plantas*. Montevideo: Editorial hemisferio sur. 514 p.
- LALANDE, R.; GAGNON, B.; ROYER, I. 2009. Impact of natural or industrial liming materials on soil properties and microbial activity. *Canadian Journal of Soil Science*. 89: 209-222.
- LEVESQUE, M.; MATHUR, S. 1983. Effect of liming on yield and nutrient concentration of reed canarygrass grown in two peat soils. *Canadian Journal of Soil Science*. 63: 469-478.
- MATHUR, S.; LEVESQUE M. 1983. Effect of liming on the yield, nutrition and copper status of potatoes, carrots and onions grow sequentially in two peat soils. *Canadian Journal of Soil Science*. 63: 229-244.
- MIJANGOS, I.; GARBISU, C.; ARISTEGIETA, A.; IBARRA, A.; MENDARTE, S.; ALBIZU, I. 2006. Wood ash as fertilizer and soil acidity corrector:

- effects on soil quality and crop yield. *Grassland Science in Europe*. 11: 808-810.
- MILTON, S. 2007. *Estadística para biología y ciencias de la salud*. 3ª edición ampliada. Madrid: Editorial McGraw-Hill Interamericana. 744 p.
- MIZEL, N.; SHARPE, W.; SWISTOCK, B. 2015. Efficacy of pelletized lime versus limestone sand for forest regeneration enhancement in Pennsylvania, USA. *Open Journal of Forestry*. 5: 221-234.
- MOREIRA, A.; FAGERIA, N. 2010. Liming influence on soil chemical properties, nutritional status and yield of alfalfa grown in acid soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 34: 1231-1239.
- MORÓN, A. 2000. Tecnología en alfalfa. Boletín de divulgación N° 69, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, p. 39.
- NEUGSCHWANDTNER, R.; LIEBHARD, P.; KAUL, H.; WAGENTRISTL, H. 2014. Soil chemical properties as affected by tillage and crop rotation in a long-term field experiment. *Plant Soil Environ*, 60: 57-62.
- NIELSEN, K. 1958. Rate of change of pH in some acid soils due to liming. *Canadian Journal of Soil Science*. 38: 114-119.
- ONWUKA, M.; OZURUMBA, U.; NKWOCHA, O. 2016. Changes in soil pH and exchangeable acidity of selected parent materials as influenced by amendments in south east of Nigeria. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 4: 80-88.
- OWEN, J.; LEBLANC, S.; TONER, P.; NDUWAMUNGU, C.; FAVA, E. 2008. Evaluation of fresh and aged clam processing wastes as potential agricultural liming materials for coastal area vegetable production soils. *Canadian Journal of Soil Science*. 88: 559-569.
- PINILLA, H. 2001. Acidez de los suelos y enmiendas calcáreas en cero labranza. Temuco, Chile. Universidad de la Frontera, p. 10.
- PROCHNOW, L.; MORAES, M.; STIPP, S. 2009. Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. En: Simposio fertilidad (5, 2009, Rosario, Argentina. MALAVOLTA, E. ABC da

análise de solos e folhas: amostragem, interpretação e sugestões de adubação. São Paulo, Brasil, Agrônoma Ceres.

- RABUFETTI, A. 2017. La fertilidad del suelo y su manejo. Volumen I. Montevideo: Editorial hemisferio sur. 396 p.
- RATKE, R.; PEREIRA, H.; GOMEZ, J.; FRAZAO, J.; BARBOSA, J.; DIAS, B. 2014. Root growth, nutrition and yield of maize with applied different limestone particle size in the cerrado soil. *American Journal of Plant Sciences*. 5: 463-472.
- RIVERA, Y.; MORENO, L.; HERRERA, M.; ROMERO, H. 2016. La toxicidad por aluminio ( $Al^{+3}$ ) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite. *Revista Palmas*. 37: 11-23.
- ROBA, T. 2018. Review on: The effect of mixing organic and inorganic fertilizer on productivity and soil fertility. *Open Access Library Journal*. 5: 1-11.
- RODD, A.; MCRAE, K.; MACLEOD, J.; WARMAN, P.; GRIMMETT, M. 2010. Surface application of cement kiln dust and lime to forage land: Effect on forage yield, tissue concentration and accumulation of nutrients. *Canadian Journal of Soil Science*. 90: 201-213.
- RODRIGUEZ, M.; MORALES, V. 2005. Toxicidad por manganeso en huertos de mango Haden en Venezuela. *Informaciones agronómicas IMPOFOS*, 56: 9-11.
- ROSA, C.; MARCHETTI, M.; SERRA, A.; ROSA, M.; ENSINAS, S.; CONRAD, V.; ALTOMAR, P.; POTRICH, D.; MARTINEZ, M. 2015. Short-term effects of lime management in soybean no-tillage system implementation in Brazilian Savannah. *Australian Journal of Crop Science*. 9: 232-241.
- RYAN, P. 2018. Assessing the role of genetics for improving the yield of Australia's major grain crops on acid soils. *Crop & Pasture Science*, 69: 242-264.
- SADEGHIAN, S. 2012. Efecto de los cambios en las relaciones de calcio, magnesio y potasio intercambiables en suelos de la zona cafetera colombiana sobre la nutrición de café (*Coffea arabica* L.) en la etapa

- de almácigo. Tesis de Doctorado. Medellín. Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 181 p.
- SADEGHIAN, S.; ZAPATA, R. 2012. Propiedades relacionadas con la adsorción de cationes intercambiables en algunos suelos de la zona cafetera de Colombia. *Revista Cenicafé*. 63: 79-89.
- SARKER, A.; KASHEM, M.; OSMAN, K. 2014. Influence of lime and phosphorous of growth performance and nutrient uptake by indian spinach (*Basella alba* L.) grown in soil. *Open Journal of Soil Science*. 4: 98-102.
- SEGUEL, A.; CUMMING, J.; KLUGH-STEWART, K.; CORNEJO, P.; BORIE, F. 2013. The role of arbuscular mycorrhizas in decreasing aluminium phytotoxicity in acidic soils: a review. *Mycorrhiza*, 23: 167-183.
- SIERRA, C. 1982. La acidez y alcalinidad de los suelos (pH). Estación experimental Remehue. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile. Boletín técnico N°49.
- SORIANO, M. 2018. Ph del suelo. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Producción Vegetal, p. 3-4.
- TOMIC, D.; STEVOVIĆ, V.; ĐUROVIĆ, D.; LAZAREVIĆ, D. 2012. The impact of soil liming on the productivity of grass-legume mixture of red clover (*Trifolium Pratense* L.) and italian ryegrass (*Lolium Italicum* L.) *Acta Agriculturae Serbica*, 17: 21-29.
- TOMIC, D.; STEVOVIĆ, V.; ĐUROVIĆ, D.; BOKAN, N.; POPOVIĆ, B.; KNEŽEVIĆ, J. 2018. Forage yield of a grass-clover mixture on an acid soil in the third year after soil liming. *Journal of Central European Agriculture*, 19: 482-489.
- USÓN, A.; BOIXADREA, J.; BOSCH, A.; MARTÍN, A. 2010. Tecnologías de suelos: estudios de casos. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza. 99 p.
- VÁZQUEZ, M.; PAGANI, A. 2015. Calcio y magnesio. Manejo de fertilización y enmiendas. En: ECHEVERRÍA, E; GARCÍA, O. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. 2a ed. Buenos Aires. p. 317-355.

- ZANDONÁ, R.; BEUTLER, A.; BURG, G.; BARRETO, C.; SCHMIDT, M. 2015. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 45: 128-137.
- ZU, C.; LI, Z.; YANG, J.; YU, H.; SUN, Y.; TANG, H.; YOST, R.; WU, H. 2014. Acid soil is associated with reduced yield, root growth and nutrient uptake in black pepper (*Piper nigrum* L.). *Agricultural Science*, 5: 466-473.

## 11. ANEXO



Figura 16. Forma de la pendiente en el potrero.



Figura 17. Ubicación del potrero en la zona media del paisaje.



Figura 18. Aplicación del acondicionador granulado. Fecha 15 de febrero de 2018.



Figura 19. Delimitación de unidades experimentales según tratamientos.



Figura 20. Implantación de la pastura. Fecha 3 de julio de 2018.



Figura 21. Forraje remanente en el primer corte de la pastura. Fecha 28 de agosto de 2018.



Figura 22. Forraje disponible en segundo corte de la pastura. Fecha 13 de octubre de 2018.



Figura 23. Forraje remanente en segundo corte de la pastura. Fecha 15 de octubre de 2018.

Análisis de la varianza multivariado

Cuadro de Análisis de la Varianza (Wilks)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,68	9,32	3	60	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza (Pillai)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,32	9,32	3	60	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza (Lawley-Hotelling)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,47	9,32	3	60	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza (Roy)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,47	9,32	3	60	<0,0001

Matriz A

Define combinaciones lineales de las columnas de la matriz de parámetros B

Variable	Col(1)
OCTUBRE 2018	1,00
NOVIEMBRE 2018	1,00
DICIEMBRE 2018	1,00
ENERO 2019	1,00

Prueba de Hotelling con nivel corregido por Bonferroni Alfa=0.05

Error: Matriz de covarianzas común gl: 60

Tratamiento	BA(1)	n
Testigo	11756,56	16 A
ISUMAX 400	13402,94	16 A B
Dolomita 3850	14501,88	16 B C
ISUMAX 1100	15716,69	16 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Figura 24. Análisis de varianza y separación de medias para la variable materia seca disponible en kg/ha para cada tratamiento y cada momento de muestreo (Infostat).

Análisis de la varianza multivariado

Cuadro de Análisis de la Varianza (Wilks)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,69	8,79	3	60	0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza (Pillai)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,31	8,79	3	60	0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza (Lawley-Hotelling)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,44	8,79	3	60	0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza (Roy)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,44	8,79	3	60	0,0001

Matriz A

Define combinaciones lineales de las columnas de la matriz de parámetros B

Variable	Col(1)
OCTUBRE 2018	1,00
NOVIEMBRE 2018	1,00
DICIEMBRE 2018	1,00
ENERO 2019	1,00

Prueba de Hotelling con nivel corregido por Bonferroni Alfa=0.05

Error: Matriz de covarianzas común gl: 60

Tratamiento	BA(1)	n
Testigo	1989,94	16 A
ISUMAX 400	2216,13	16 A B
Dolomita 3850	2543,38	16 B C
ISUMAX 1100	2635,25	16 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Figura 25. Análisis de varianza y separación de medias para la variable proteína disponible en kg/ha para cada tratamiento y cada momento de muestreo (Infostat).

Análisis de la varianza multivariado

Cuadro de Análisis de la Varianza (Wilks)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,74	7,03	3	60	0,0004

Cuadro de Análisis de la Varianza (Pillai)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,26	7,03	3	60	0,0004

Cuadro de Análisis de la Varianza (Lawley-Hotelling)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,35	7,03	3	60	0,0004

Cuadro de Análisis de la Varianza (Roy)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,35	7,03	3	60	0,0004

Matriz A

Define combinaciones lineales de las columnas de la matriz de parámetros B

Variable	Col(1)
OCTUBRE 2018	1,00
NOVIEMBRE 2018	1,00
DICIEMBRE 2018	1,00
ENERO 2019	1,00

Prueba de Hotelling con nivel corregido por Bonferroni Alfa=0.05

Error: Matriz de covarianzas común gl: 60

Tratamiento	BA(1)	n
Testigo	17238,44	16 A
ISUMAX 400	18919,81	16 A B
Dolomita 3850	20292,06	16 B C
ISUMAX 1100	22013,94	16 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Figura 26. Análisis de varianza y separación de medias para la variable energía neta de lactación disponible en Mcal/ha para cada tratamiento y cada momento de muestreo (Infostat).

### Análisis de la varianza multivariado

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (Wilks)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,40	1,98	3	4	0,2587

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (Pillai)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,60	1,98	3	4	0,2587

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (Lawley-Hotelling)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	1,49	1,98	3	4	0,2587

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (Roy)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	1,49	1,98	3	4	0,2587

#### Matriz A

Define combinaciones lineales de las columnas de la matriz de parámetros B

Variable	Col(1)
OCTUBRE 2018	1,00
NOVIEMBRE 2018	1,00
DICIEMBRE 2018	1,00
ENERO 2019	1,00

#### Prueba de Hotelling con nivel corregido por Bonferroni Alfa=0.05

Error: Matriz de covarianzas común gl: 4

Tratamiento	BA(1)	n
Testigo	8125,00	2 A
ISUMAX 400	9718,00	2 A
Dolomita 3850	11009,50	2 A
ISUMAX 1100	12353,00	2 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Figura 27. Análisis de varianza y separación de medias para la variable materia seca consumida en kg/ha para cada tratamiento y cada momento de muestreo (Infostat).

Análisis de la varianza multivariado

Cuadro de Análisis de la Varianza (Wilks)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,40	1,98	3	4	0,2587

Cuadro de Análisis de la Varianza (Pillai)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,60	1,98	3	4	0,2587

Cuadro de Análisis de la Varianza (Lawley-Hotelling)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	1,49	1,98	3	4	0,2587

Cuadro de Análisis de la Varianza (Roy)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	1,49	1,98	3	4	0,2587

Matriz A

Define combinaciones lineales de las columnas de la matriz de parámetros B

Variable	Col(1)
OCTUBRE 2018	1,00
NOVIEMBRE 2018	1,00
DICIEMBRE 2018	1,00
ENERO 2019	1,00

Prueba de Hotelling con nivel corregido por Bonferroni Alfa=0.05

Error: Matriz de covarianzas común gl: 4

Tratamiento	BA(1)	n
Testigo	1524,50	2 A
ISUMAX 400	1724,00	2 A
Dolomita 3850	2099,50	2 A
ISUMAX 1100	2150,50	2 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Figura 28. Análisis de varianza y separación de medias para la variable proteína consumida en kg/ha para cada tratamiento y cada momento de muestreo (Infostat).

#### Análisis de la varianza multivariado

##### Cuadro de Análisis de la Varianza (Wilks)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,41	1,92	3	4	0,2680

##### Cuadro de Análisis de la Varianza (Pillai)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	0,59	1,92	3	4	0,2680

##### Cuadro de Análisis de la Varianza (Lawley-Hotelling)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	1,44	1,92	3	4	0,2680

##### Cuadro de Análisis de la Varianza (Roy)

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Tratamiento	1,44	1,92	3	4	0,2680

##### Matriz A

Define combinaciones lineales de las columnas de la matriz de parámetros B

Variable	Col(1)
OCTUBRE 2018	1,00
NOVEMBRE 2018	1,00
DICIEMBRE 2018	1,00
ENERO 2019	1,00

##### Prueba de Hotelling con nivel corregido por Bonferroni Alfa=0.05

Error: Matriz de covarianzas común gl: 4

Tratamiento	BA(1)	n
Testigo	12539,50	2 A
ISUMAX 400	14086,00	2 A
Dolomita 3850	15817,50	2 A
ISUMAX 1100	17721,50	2 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Figura 29. Análisis de varianza y separación de medias para la variable energía neta de lactación consumida en Mcal/ha para cada tratamiento y cada momento de muestreo (Infostat).