Tesis para optar al título de

Doctor de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales

Universidad Nacional de La Plata

CRITERIOS DIAGNÓSTICOS PARA FERTILIZACIÓN CÁLCICA DE SOJA (*Glycine max* L. Merr) Y RAIGRÁS (*Lolium multiflorum* L.) EN EL ÁMBITO TEMPLADO ARGENTINO

Daniel A. Ferro

Ing. Agr. - FCAyF, UNLP - 2014

Director: Ing. Agr. (PhD) José Augusto Imaz

Codirector: Lic. (Dr.) Carlos Guillermo Bartoli

Octubre de 2024

La Plata, Buenos Aires, Argentina

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA



“Al ponerle fecha a un sueño, se convierte en una meta.

Una meta dividida en pasos, se convierte en un plan.

Un plan apoyado por acciones, se vuelve realidad.”

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de la Plata y, particularmente, a la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales por darme la posibilidad de estudiar una carrera de grado y posgrado en forma gratuita, que sin ello no hubiera sido posible llegar hasta acá.

A mi director “el correntino” José Augusto Imaz por su dedicación, apoyo académico y anímico, y por su manera de pensar y actuar que motivan para seguir creciendo. A mi codirector “el Tolo” Carlos Bartoli por el apoyo brindado todo este tiempo, las sugerencias realizadas, su comprensión y su humanidad.

A mis amigo/as y compañero/as de Mecanización Agraria, Mecanización Forestal y Manejo y Conservación de Suelos: Victor Merani, Matilde Mur, Luciano Larrieu, Tatiana Cinquetti, Facundo Guilino, Juan Manuel Vázquez, Esteban Ivan Pereira, Maria Clara Donadelli, Florencia Bongiorno, Zoe Merani, Roberto Balbuena, Nicolás Polich y Guillermo Millán.

A los exestudiantes y hoy Ing. Agr. Manuel Aued, Nicolás Malchiodi, Lautaro Taraburelli y Brian Andreini por haber participado en la realización de ensayos, por su trabajo, dedicación, profesionalismo y amistad. Asimismo, a mi amigo/hermano y futuro colega Marcial Paradela, por su ayuda en las determinaciones analíticas de enero y el apoyo constante durante todos estos años.

A la Ing. Agr. (Dra.) Mabel E. Vázquez por participar en los inicios de este trabajo como directora y el aporte de los principales lineamientos del tema.

Al Ing. Agr. (Dr.) Carlos Germán Soracco por haber participado como director durante un período en esta tesis, y al Ing. Agr (Dr.) Luis Lozano por su ayuda y los comentarios realizados.

A los cursos de Manejo y Conservación de Suelos, Edafología y Física Aplicada, al Instituto de Fisiología Vegetal (INFIVE) y a la Unidad de Vivero Forestal de la FCAyF (UVF) por brindar instalaciones y/o recursos para la realización de estos estudios.

Al Lic. (Dr.) Diego Fanello por su ayuda, asesoramiento y profesionalismo.

A la Ing. Agr. Carolina Esterrlich, al Med. Vet. Eduardo Lacentre, al Ing. Agr. Zacarias Nicora y al Ing. Agr. Luciano Juan por su colaboración para la realización de los ensayos.

A la/os evaluadore/as de la tesis ya que sus valiosos comentarios contribuyeron sustancialmente a la mejora de este trabajo.

A mi familia y amigos por su apoyo y comprensión por los momentos perdidos para la realización de la carrera y de esta tesis.

A mi novia y compañera María Florencia Zanardi por su apoyo, su ayuda y por entender y compartir el esfuerzo que generó esta tesis.

A aquellas personas que estuvieron de una u otra manera en este largo proceso con alguna idea, palabra de aliento y/o charlas de catarsis que han permitido recorrer un arduo camino, pero que al final se pudo llegar a destino.

A todas y todos ¡muchas gracias!

Publicaciones derivadas de la tesis

REVISTAS

Ferro, Daniel A.; Lozano, Luis A.; Bartoli, Carlos G.; Fanello, Diego D.; Millán, Guillermo J. y C. Germán Soracco. 2020. Disponibilidad y relación de calcio y magnesio. Efecto sobre exportación y concentración en raigrás y soja. Publicación: Revista de la Facultad de Agronomía. Volumen: 119, Número: 2, Páginas: 1-10. ISSN (impresa): 0041-8676. ISSN (online): 1669-9513. Referato: SI.

Ferro, Daniel A.; Andreini, Brian; Lozano, Luis A.; Merani, Victor H.; Bongiorno, Florencia M.; Larrieu, L.; Millán, Guillermo J. y C. Germán Soracco. 2023. Predicción de la concentración de calcio soluble en suelos agrícolas de la provincia de Buenos Aires. Revista de Investigaciones Agronómicas de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario 41(23), e031. ISSN (impresa): 1853-4333. ISSN (online): 2250-8872. Referato: SI.

Ferro, Daniel A.; Andreini, Brian L.; Merani, Víctor H.; Larrieu, Luciano; Mur, Matilde; Guilino, Facundo; Pereira, Esteban; Cinquetti, Tatiana; Millán, Guillermo, Imaz, José Augusto. 2023. Adsorción y dosificación de Ca en suelos de Buenos Aires, Argentina. Revista Tecnología en Marcha 36(3): 99-114. Editorial Tecnológica de Costa Rica. ISSN electrónico: 2215-3241. Referato: SI.

Ferro, Daniel A.; Merani, Víctor H.; Millán, Guillermo; Larrieu, Luciano; Mur, Matilde; Cinquetti, Tatiana; Guilino, Facundo; Zanardi, Maria Florencia; Paradela, Marcial Pablo; Pereira, Esteban; Donadelli, Maria Clara, Imaz, José Augusto. 2024. Fertilizantes y enmiendas cálcicas en soja forrajera sobre molisoles de Buenos Aires, Argentina. Revista Argentina de la Ciencia del Suelo 42(1): 14-28. AACS. Referato: SI.

CONGRESOS

Ferro, Daniel A.; B.L. Andreini; V.H. Merani; F.M. Bongiorno; N.G. Polich, L. Larrieu; G.J. Millan, E.I. Pereira, L.A. Lozano y C.G. Soracco. 2020. Isotermas de adsorción de calcio en suelos agrícolas de la provincia de Buenos Aires. XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Corrientes. 13 al 16 de octubre. Póster y artículo publicado en actas del congreso.

Ferro, D.; L. Larrieu, V. Merani, L. Nughes, L. Juan, D. Bennardi y G. Millan. 2018. Calcio soluble, Generación de un modelo predictivo en función de parámetros de determinación rutinarios en suelo. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Tucumán. 13 al 18 de mayo. Póster y publicado en actas del congreso.

JORNADAS

Ferro, D. 2020. Criterios para la fertilización cálcica de soja y raigrás en el ámbito templado argentino. VIII Jornada de Intercambio Público-Privado. Disertante. General Villegas, Buenos Aires. INTA General Villegas – Bayer. 12 y 13 de marzo.

Ferro, D.A. y B.L. Andreini. 2019. Predicción de calcio soluble en suelos de la provincia de Buenos Aires, Argentina. XXVII Jornada de Jóvenes Investigadores de AUGM. Asistente y presentador de póster. Sao Carlos, Brasil. Universidad Federal de São Carlos (UFSCar) y Grupo Montevideo. 23 al 25 de octubre.

Tabla de Contenidos

CRITERIOS DIAGNÓSTICOS PARA FERTILIZACIÓN CÁLCICA DE SOJA (*Glycine max L.* Merr) Y RAIGRÁS (*Lolium multiflorum L.*) EN EL ÁMBITO TEMPLADO ARGENTINO

Tabla de Contenidos **1**
Índice de Figuras **4**
Índice de Tablas **6**
Abreviaturas **8**
Resumen **10**
Abstract **14**
Capítulo 1 - Introducción general **1-1**
1.1. Introducción 1-2
1.2. Objetivos 1-6
1.2.1. General *1-6*
1.2.2. Específicos *1-6*
1.3. Hipótesis 1-7
1.3.1. General *1-7*
1.3.2. Específicas *1-7*
1.4. Organización y esquema de la tesis 1-8
1.4.1. Organización *1-8*
1.4.2. Esquema *1-10*
Capítulo 2 - Revisión bibliográfica **2-1**
2.1. Sinapsis 2-2
2.2. Suelos de la Región Pampeana 2-2
2.3. Rol y dinámica del calcio en planta 2-5
2.4. Herramientas diagnóstico de suficiencia cálcica 2-8
2.5. Productos utilizados para el tratamiento de suelos 2-11
Capítulo 3 - Calcio en solución en contacto con las raíces. Efectos en soja forrajera y raigrás anual **3-1**
3.1. Sinapsis 3-2
3.2. Introducción específica 3-3
3.3. Objetivo específico 3-4
3.4. Hipótesis específica 3-4
3.5. Materiales y métodos 3-5
3.6. Resultados 3-7
3.6.1. Evaluación entre cultivos (soja y raigrás) *3-7*
3.6.2. Evaluación entre cortes de raigrás *3-10*
3.7. Discusión 3-13
3.8. Conclusiones parciales 3-20
3.9. Conclusiones relevantes para otros capítulos 3-20

Capítulo 4 - Estimación de calcio soluble-disponible en suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires 4-1

4.1. Sinapsis 4-2
4.2. Introducción específica 4-3
4.3. Objetivo específico 4-4
4.4. Hipótesis específica 4-4
4.5. Materiales y métodos 4-5
4.6. Resultados 4-7
4.6.1. Determinaciones analíticas de los suelos 4-7
4.6.2. Ecuación predictiva de CaExt 4-9
4.7. Discusión 4-11
4.8. Conclusiones parciales 4-15
4.9. Conclusiones relevantes para otros capítulos 4-15

Capítulo 5 - Dinámica de calcio soluble ante el agregado de fertilizantes cálcicos en suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires 5-1

5.1. Sinapsis 5-2
5.2. Introducción específica 5-3
5.3. Objetivo específico 5-5
5.4. Hipótesis específica 5-5
5.5. Materiales y métodos 5-6
5.5.1. Descripción de los suelos 5-7
5.5.2. Isotermas de adsorción 5-8
5.5.3. Pastas de saturación 5-10
5.5.4. Regresión y análisis estadístico 5-10
5.6. Resultados 5-12
5.6.1. Isotermas de adsorción 5-12
5.6.2. Pastas de saturación 5-14
5.6.3. Comparación de metodologías 5-15
5.7. Discusión 5-15
5.8. Conclusiones parciales 5-22
5.9. Conclusiones relevantes para otros capítulos 5-22

Capítulo 6 - Fertilizantes y correctores cálcicos en soja forrajera en suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires 6-1

6.1. Sinapsis 6-2
6.2. Introducción específica 6-3
6.3. Objetivo específico 6-5
6.4. Hipótesis específica 6-5
6.5. Materiales y métodos 6-6
6.6. Resultados 6-7
6.6.1. Planta 6-8
6.6.2. Suelo 6-10
6.6.3. BCaS 6-12
6.7. Discusión 6-12
6.8. Conclusiones parciales 6-17

Capítulo 7 - Discusión y conclusión general. Futuras líneas de investigación ..7-1
7.1. Sinapsis 7-2
7.2. Discusión general 7-3
7.3. Conclusión general 7-8
7.4. Futuras líneas de investigación 7-9
7.4.1. Actualizar estudios de Ca en SCR en cultivos..... 7-9
7.4.2. Evaluar parámetros relacionados con la producción de granos 7-9
7.4.3. Ampliar la información de CaExt 7-9
7.4.4. Realizar estudios a campo 7-9
7.4.5. Ampliar la escala temporal 7-10
7.4.6. Calibrar metodologías 7-10
7.4.7. Estudiar dinámica de magnesio y potasio 7-10
7.4.8. Evaluar propiedades físicas de los suelos..... 7-10
Bibliografia 134

Índice de Figuras

Figura 1-1. Esquema de la tesis realizada. 1-10

Figura 3-1. Materia seca (MS) de soja y raigrás por recipiente respecto a los tratamientos. T02: 2 meq l^{-1} de Ca; T10: 10 meq l^{-1} de Ca; T18: 18 meq l^{-1} de Ca; T24: 24 meq l^{-1} de Ca. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas para la interacción tratamiento*cultivo ($p<0,05$). 3-7

Figura 3-2. Concentración de calcio en biomasa (CCaB) de soja y raigrás respecto a los tratamientos. T02: 2 meq l^{-1} de Ca; T10: 10 meq l^{-1} de Ca; T18: 18 meq l^{-1} de Ca; T24: 24 meq l^{-1} de Ca. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas para la interacción tratamiento*cultivo ($p<0,05$). 3-8

Figura 3-3. Concentración de magnesio en biomasa (CMgB) de soja y raigrás respecto a los tratamientos. T02: 2 meq l^{-1} de Ca; T10: 10 meq l^{-1} de Ca; T18: 18 meq l^{-1} de Ca; T24: 24 meq l^{-1} de Ca. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas para la interacción tratamiento*cultivo ($p<0,05$). 3-8

Figura 3-4. Exportación de Ca (ECaB) en soja y raigrás por recipiente respecto a los tratamientos. T02: 2 meq l^{-1} de Ca; T10: 10 meq l^{-1} de Ca; T18: 18 meq l^{-1} de Ca; T24: 24 meq l^{-1} de Ca. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas para la interacción tratamiento*cultivo ($p<0,05$). 3-9

Figura 3-5. Exportación de Mg (EMgB) en soja y raigrás por recipiente respecto a los tratamientos. T02: 2 meq l^{-1} de Ca; T10: 10 meq l^{-1} de Ca; T18: 18 meq l^{-1} de Ca; T24: 24 meq l^{-1} de Ca. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas para la interacción tratamiento*cultivo ($p<0,05$). 3-9

Figura 3-6. Materia seca (MS) de raigrás según corte. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre cortes ($p<0,05$). 3-10

Figura 3-7. Concentración de calcio en biomasa (CCaB) de raigrás según tratamiento y corte. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en la interacción tratamiento*corte ($p<0,05$). 3-11

Figura 3-8. Concentración de calcio en biomasa (CMgB) de raigrás según tratamiento y corte. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en la interacción tratamiento*corte ($p<0,05$). 3-11

Figura 3-9. Exportación de calcio en biomasa (ECaB) de raigrás según tratamiento y corte. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en la interacción tratamiento*corte ($p<0,05$). 3-12

Figura 3-10. Exportación de magnesio en biomasa (EMgB) de raigrás según tratamiento y corte. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en la interacción tratamiento*corte ($p<0,05$). 3-12

Figura 4-1. Imagen mostrando la ubicación de suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires utilizados para la generación del modelo predictivo. Imagen: Google Maps® (Google, 2024). 4-5

Figura 4-2. Imagen mostrando la ubicación de suelos molisoles (argiudoles y hapludoles) de la provincia de Buenos Aires utilizados para la comprobación del modelo predictivo. Imagen: Google Maps® (Google, 2024). 4-6

Figura 4-3. Calcio soluble-disponible (CaExt) respecto a variables independientes seleccionadas por el modelo, con su respectiva línea de tendencia y grado de ajuste. Izquierda: calcio soluble-disponible (CaExt) respecto a la conductividad eléctrica (CE). Derecha: calcio soluble-disponible (CaExt) respecto al calcio intercambiable en relación con suma de bases intercambiables (CaCIC S^{-1}). 4-10

Figura 4-4. Calcio soluble-disponible medido en los suelos independientes (CaExt medido) respecto al CaExt estimado por el modelo (CaExt estimado) según modelo original (izquierda) y modelo forzando el intercepto a cero (derecha), con su respectiva ecuación y coeficiente de ajuste. 4-10

Figura 5-1. Sitios en la provincia de Buenos Aires utilizados en el ensayo para determinar dinámica de Ca soluble ante el agregado de fertilizante. Arriba: provincia de Buenos Aires. Arriba: provincia de Buenos Aires con identificación de los partidos de Carlos Casares (izquierda) y 25 de Mayo (derecha). Abajo izquierda: partido de Carlos casares con ubicación del suelo de Bellocq (estrella); Abajo derecha: partido de 25 de Mayo con ubicación del suelo de Inchausti (estrella). Imagen: Google Maps® (Google, 2022). 5-6

Figura 6-1. Materia Seca (MS) de soja por maceta según tratamiento (izquierda) y suelo (derecha). T: testigo; F50: 50 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante; F100: 100 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante y C1500: 1500 kg ha^{-1} de corrector. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos o suelos ($p<0,05$). 6-8

Figura 6-2. Exportación de calcio en biomasa de soja (ECaB) por maceta según tratamiento (izquierda) y exportación de Mg en soja (EMgB) por maceta según suelo (derecha). T: testigo; F50: 50 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante; F100: 100 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante y C1500: 1500 kg ha^{-1} de corrector. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos o suelos ($p<0,05$). 6-9

Figura 6-3. Valor de pH en los diferentes tratamientos y suelos. T: testigo; F50: 50 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante; F100: 100 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante y C1500: 1500 kg ha^{-1} de corrector. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en la interacción tratamiento*suelo ($p<0,05$). 6-10

Figura 6-4. Relación entre calcio soluble-intercambiable y capacidad de intercambio catiónico (CaCIC CIC^{-1}) para la interacción tratamiento*suelo. T: testigo; F50: 50 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante; F100: 100 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante y C1500: 1500 kg ha^{-1} de corrector. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas para la interacción tratamiento*suelo ($p<0,05$). 6-11

Figura 6-5. Balance de calcio en suelo (BCaS) por maceta según tratamiento. T: testigo; F50: 50 kg ha^{-1} de Ca de fertilizante; F100: 100 kg ha^{-1} de Ca de fertilizante y C1500: 1500 kg ha^{-1} de corrector. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p<0,05$).....6-12

Índice de Tablas

Tabla 3-1. Estadísticos ANOVA del primer análisis de materia seca (MS), concentración de calcio en biomasa (CCaB), concentración de magnesio en biomasa (CMgB), exportación de calcio (ECaB) y exportación de magnesio (EMgB) respecto a la interacción tratamiento*cultivo del ensayo en hidroponia. 3-7

Tabla 3-2. Estadísticos ANOVA del segundo análisis de materia seca (MS), concentración de calcio en biomasa (CCaB), concentración de magnesio en biomasa (CMgB), exportación de calcio (ECaB) y exportación de magnesio (EMgB) respecto a la interacción tratamiento*corte 3-10

Tabla 4-1. Lugar, Latitud Longitud, Taxonomía, pH, carbono oxidable (CO), nitrógeno total (Nt) y fósforo Bray Kurtz 1 (Pbk) de los suelos utilizados en el Capítulo 4. 4-7

Tabla 4-2. Conductividad eléctrica (CE), calcio soluble-disponible (CaExt), arena (A), limo (L), arcilla (arc) y textura (Text) de los suelos utilizados en el Capítulo 4. 4-8

Tabla 4-3. Capacidad de intercambio catiónica (CIC), calcio soluble-intercambiable (CaCIC); magnesio soluble-intercambiable (MgCIC), potasio soluble-intercambiable (KCIC), sodio soluble-intercambiable (NaCIC), suma de bases intercambiables (S), relación S CIC^{-1}, relación entre calcio soluble-intercambiable y suma de bases intercambiables (CaCIC S^{-1}) y relación entre calcio soluble-intercambiable y capacidad de intercambio catiónica (CaCIC CIC^{-1}) de los suelos utilizados en el Capítulo 4..... 4-9

Tabla 5-1. Latitud, Longitud, Gran Grupo, Familia, arena (A), limo (L), arcilla (arc), textura (Text), pH, carbono oxidable (CO), nitrógeno total (Nt), fósforo Bray Kurtz 1 (Pbk), conductividad eléctrica (CE), calcio soluble-disponible (CaExt), capacidad de intercambio catiónica (CIC), calcio soluble-intercambiable (CaCIC), magnesio soluble-intercambiable (MgCIC), potasio soluble-intercambiable (KCIC), sodio soluble-intercambiable (NaCIC), relación entre sumatoria de bases y capacidad de intercambio catiónico (S CIC^{-1}), relación entre calcio soluble-intercambiable y sumatoria de bases intercambiables (CaCIC S^{-1}) y relación entre calcio soluble-intercambiable y capacidad de intercambio catiónico (CaCIC CIC^{-1}) de los suelos de Bellocq e Inchausti. 5-8

Tabla 5-2. Estadísticos asociados a las ecuaciones de Freundlich, Tempkin y Van Huay en valores de adsorción de Ca, diferenciadas según grupo de datos utilizados y análisis. Ambos: estimación de las isotermas con datos de Bellocq e Inchausti; Bellocq: estimación de las isotermas con datos Bellocq; Inchausti: estimación de las isotermas con datos de Inchausti; y Dummy: comparación entre parámetros estimados de las isotermas de Bellocq e Inchausti. P: parámetro estadístico. F: ANOVA de regresión; a: pendiente de la ecuación; b: ordenada al origen; R^2: grado de ajuste de la ecuación. E: valor estimado; p: p-value. 5-13

Tabla 5-3. Estadísticos asociados a las ecuaciones de Tempkin y Van Huay para la estimación de los valores de desorción, diferenciadas según grupo de datos utilizados y análisis. Ambos: estimación de las isotermas con datos de Bellocq e Inchausti; Bellocq: estimación de las isotermas con datos Bellocq; Inchausti: estimación de las isotermas con datos de Inchausti; y Dummy: comparación entre parámetros estimados de las isotermas de Bellocq e Inchausti. P: parámetro estadístico. F: ANOVA de regresión; a: pendiente de la ecuación; b: ordenada al origen; R^2: grado de ajuste de la ecuación. E: valor estimado; p: p-value. 5-14

Tabla 5-4. Estadísticos asociados a las regresiones lineales para la estimación de los valores de calcio soluble-disponible (CaExt) en suelos, diferenciadas según grupo de datos utilizados y análisis. Ambos: estimación de los parámetros de la ecuación con todos los datos, sin diferenciar entre suelos; Bellocq: estimación de los parámetros de las isotermas con datos de adsorción de Bellocq; Inchausti: : estimación de los parámetros de las isotermas con datos de adsorción de Inchausti y Dummy: comparación entre parámetros estimados de las isotermas de Bellocq e Inchausti con variables dummy. P: parámetro estadístico. F: ANOVA de regresión; a: pendiente de la ecuación; b: ordenada al origen; R^2: grado de ajuste de la ecuación. E: valor estimado; p: p-value. 5-14

Tabla 5-5. Estadísticos asociados a las regresiones lineales para la estimación de los valores de calcio soluble-disponible (CaExt) en suelos, diferenciadas según metodología utilizada. Isotermas: isotermas de adsorción. Pasta: incubación de pasta de saturación. Dummy: comparación entre parámetros estimados por las metodologías utilizando variables dummy. P: parámetro estadístico. F: ANOVA de regresión; a: pendiente de la ecuación; b: ordenada al origen; R^2: grado de ajuste de la ecuación. E: valor estimado; p: p-value. 5-15

Tabla 6-1. Estadísticos ANOVA de resultados de variables de materia seca (MS), concentración de calcio en biomasa (CCaB), concentración de magnesio en biomasa (CMgB), exportación de calcio (ECaB), exportación de magnesio (EMgB) en planta de soja; pH, conductividad eléctrica (CE), calcio soluble-disponible (CaExt), calcio soluble-intercambiable (CaCIC), magnesio soluble-intercambiable (MgCIC), potasio soluble-intercambiable (KCIC), relación entre suma de bases intercambiables y capacidad de intercambio catiónico (S CIC^{-1}), relación entre calcio soluble-intercambiable respecto a sumatoria de bases intercambiables (CaCIC S^{-1}) y relación entre calcio soluble-intercambiable y capacidad de intercambio catiónica (CaCIC CIC^{-1}) de los suelos y balance de calcio en suelo (BCaS) respecto la interacción tratamiento*cultivo, al factor tratamiento y factor suelo del ensayo en invernáculo. 6-8

Tabla 6-2. Concentración de calcio en biomasa (CCaB) y concentración de magnesio en biomasa (CMgB) en soja respecto a los suelos. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre suelos para un mismo nutriente ($p<0,05$). 6-9

Tabla 6-3. Test de Tukey para conductividad eléctrica (CE) y calcio soluble-disponible (CaExt) para los diferentes tratamientos y suelos. T: testigo; F50: 50 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante; F100: 100 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante y C1500: 1500 kg ha^{-1} de corrector. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas dentro de un mismo factor y para una misma variable ($p<0,05$). 6-10

Tabla 6-4. Test de Tukey para capacidad de intercambio catiónica (CIC), calcio soluble-intercambiable (CaCIC), magnesio soluble-intercambiable (MgCIC), relación entre sumatoria de bases intercambiables y capacidad de intercambio catiónico (S CIC^{-1}) y relación entre calcio soluble-intercambiable y sumatoria de bases intercambiables (CaCIC S^{-1}) para los diferentes suelos en el ensayo en invernáculo. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre suelos para una misma variable ($p<0,05$). .6-11

Abreviaturas

Los siguientes términos abreviados han sido utilizados en la tesis:

°C	grado centígrado
A	arena
arc	arcilla
Al	aluminio
BCaS	balance de calcio en suelo
Ca	calcio
CaCIC	calcio en la fracción soluble-intercambiable del suelo
CaExt	calcio en la fracción soluble-disponible del suelo
CCaB	concentración de calcio en biomasa
CE	conductividad eléctrica
CIC	capacidad de intercambio catiónica
Ci	concentración final de calcio en sobrenadante de isotermas
CMgB	concentración de magnesio en biomasa
cmolc	centimol carga
CO	carbono oxidable
Co	concentración de calcio agregada en isotermas
dS	decisiemens
ECaB	exportación de calcio en biomasa
EMgB	exportación de magnesio en biomasa
F	franco
FA	franco-arenoso
Fa	franco-arcilloso
FaL	franco-arcillo-limoso
Fe	hierro
FL	franco-limoso
g	gramo
ha	hectárea
K	potasio
KCIC	potasio en la fracción soluble-intercambiable del suelo
KExt	potasio en la fracción soluble-disponible del suelo
kg	kilogramo
L	limo
l	litro

m	metro
mm	milímetro
meq	miliequivalente
Mg	magnesio
mg	miligramo
MgCIC	magnesio en la fracción soluble-intercambiable del suelo
MgExt	magnesio en la fracción soluble-disponible del suelo
min	minuto
Mo	molibdeno
Mn	manganeso
MS	materia seca
N	nitrógeno/normal
NaCIC	sodio en la fracción soluble-intercambiable del suelo
NaExt	sodio en la fracción soluble-disponible del suelo
Nt	nitrógeno total
P	fósforo
p	p-valor
Pbk	fósforo Bray-Kurtz 1
pH	potencial de hidrógeno
RP	Región Pampeana
S	sumatoria de bases intercambiables en suelo
SCR	solución en contacto con las raíces
Text	textura
µm	micrómetro

Resumen

CRITERIOS DIAGNÓSTICOS PARA FERTILIZACIÓN CÁLCICA DE SOJA *(Glycine max* L. Merr) Y RAIGRÁS *(Lolium multiflorum* L.) EN EL ÁMBITO TEMPLADO ARGENTINO

Las producciones agropecuarias en la Región Pampeana (RP) han generado balances negativos de nutrientes básicos en el suelo por la extracción de nutrientes sin reposición, causando incluso acidificación de los suelos. Los cultivos forrajeros podrían extraer elevadas cantidades de bases dado que se cosecha la planta entera para consumo animal durante varios periodos en el año, y más aún si se utilizan para conservación de forraje. En la actualidad se discute cuál sería la principal limitante para la producción de cultivos en relación con la dinámica de nutrientes básicos en suelos de la RP. El calcio (Ca) sería el nutriente que más podría afectar la producción de cultivos, siendo los cultivos más sensibles aquellos pertenecientes a la familia de las leguminosas, pero hasta la actualidad no se poseen indicadores ajustados que permitan diagnosticar el estado de suficiencia cálcica en suelos de la RP para la producción de los cultivos. En este marco, se considera que se podrían recopilar estudios en hidroponia para evaluar el efecto de distintas concentraciones de Ca en solución en contacto con las raíces (SCR) y comparar sus efectos con los valores de Ca en la fracción soluble-disponible del suelo (CaExt), siendo la principal fuente donde las plantas se abastecen de Ca. Aun así, los valores de CaExt en suelos molisoles de la RP actualmente se desconocen, puesto que no es una determinación solicitada en los laboratorios de suelos de la RP. Agravando la situación, los estudios de Ca en SCR en los cultivos utilizados en la RP podrían estar desactualizados puesto que se han realizado principalmente en la segunda mitad del siglo XX y los cultivares actuales podrían tener mayores requerimientos nutricionales. Por lo antedicho, se considera necesario actualizar los efectos de Ca en SCR sobre los cultivos y conocer los valores de CaExt en suelos de la RP, que podrían ser estimados a partir de las determinaciones realizadas en los suelos. Asimismo, de identificar sitios deficientes en Ca será pertinente el estudio de metodologías que permitan evaluar el efecto de agregado de diferentes dosis de fertilizantes cálcicos en suelos de la RP, como así también el efecto que genera el uso de diferentes productos cálcicos sobre cultivos extensivos, propiedades del suelo y el balance de Ca del suelo (BCaS), una de las causas principales de la pérdida de nutrientes. En este marco, el objetivo general de esta tesis fue generar criterios para la fertilización cálcica de cultivos forrajeros en suelos molisoles de la Región Pampeana de Argentina, propendiendo a la sustentabilidad de los sistemas productivos.

El objetivo específico del Capítulo 3 fue cuantificar el efecto de concentraciones iguales y mayores a 2 meq l^{-1} de Ca en SCR sobre la productividad y exportación de Ca y Mg en cultivares actuales de soja forrajera y raigrás anual. Se realizó un ensayo en hidroponia con 2, 10, 18 y 24 meq l^{-1} de Ca en SCR sobre soja y raigrás con fines forrajeros. Se midió MS, concentración de nutrientes en la biomasa y exportación de cationes básicos. La MS se incrementó en soja de 2 a 10 meq l^{-1}, mientras que en raigrás no mostró diferencias en ninguno de los tratamientos. La concentración de Ca en biomasa (CCaB) de soja se incrementó hasta 10 meq l^{-1} y en raigrás hasta 18 meq l^{-1}, mientras que la concentración de Mg en biomasa (CMgB) de soja disminuyó ante el incremento de Ca en SCR y en raigrás se maximizó en concentraciones intermedias. Adicionalmente, en raigrás se encontró sinergia y antagonismo entre Ca y Mg según el estadio de crecimiento. La exportación de Ca y Mg estuvo asociada al comportamiento de la MS en soja y al patrón de CCaB y CMgB, respectivamente, en ambos cultivos. Los resultados sugieren que la soja habría incrementado el potencial de rendimiento respecto a cultivos más antiguos, conllevando una mayor demanda de Ca, y que el raigrás no habría incrementado los requerimientos de Ca pero que posee una elevada capacidad de acumular cationes básicos en la biomasa. Esta información es relevante para conocer la dinámica de nutrientes básicos en la producción de cultivos actuales y definir el uso de productos cálcicos en suelos de la RP.

El objetivo específico del Capítulo 4 fue estimar la concentración de CaExt de suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires a partir de determinaciones analíticas solicitadas rutinariamente en laboratorios de suelos de la RP, considerando que los parámetros determinados en los laboratorios de la región podrían estar estrechamente relacionados con los valores de CaExt. Se realizó la determinación analítica de 24 suelos molisoles de la zona central-norte de la provincia de Buenos Aires y se realizó una regresión lineal simple por selección de variables para seleccionar los parámetros de suelo que predicen su concentración. La conductividad eléctrica (CE) y la relación entre el calcio soluble-intercambiable respecto a la sumatoria de bases intercambiables del suelo (CaCIC S^{-1}) fueron las variables retenidas por el modelo con un grado de ajuste R^2 de 0,63. Esta información podría ser útil para diagnosticar niveles y dosis de fertilizantes cálcicos, al igual que se utiliza en otros nutrientes en la generación de curvas calibradas de respuesta a la fertilización. Sin embargo, la comprobación del modelo mostró que la ecuación original podría generar errores en la estimación, de modo que se recomendaría medir directamente CaExt en extracto de pasta de saturación, donde también se cuantifica CE, en tanto se requiera generar una medición más exacta. La ecuación podría ser utilizada para caracterizar sitios e identificar zonas con muy contenido de CaExt.

El objetivo específico del Capítulo 5 fue evaluar metodologías de laboratorio para 1) estudiar la dinámica de adsorción y desorción de Ca en suelos hapludoles de Buenos Aires y 2) predecir los valores de CaExt alcanzados luego la aplicación de diferentes dosis de fertilizantes cálcicos. Se hicieron ensayos de isotermas de adsorción e incubación de pastas de saturación en los suelos de Bellocq e Inchausti para cuantificar los niveles de Ca luego del agregado de diferentes dosis de fertilizante cálcico. Las isotermas de Freundlich. Tempkin y Van Huay se ajustaron en suelos en condiciones de adsorción de Ca, que se correspondieron con dosis mayores a 125 kg ha^{-1} de Ca en Bellocq y 350 kg ha^{-1} de Ca en Inchausti; mientras que las isotermas de Tempkin y Van Huay se ajustaron en situaciones de desorción con dosis menores a 100 kg Ca ha^{-1}. Estos resultados validarían el uso de las isotermas para estudiar la dinámica de Ca en los suelos molisoles de la RP, aunque las isotermas no lograron estimar de manera exacta los valores de CaExt, en comparación con su medición en pastas de saturación. Las isotermas sobreestimaron los niveles de CaExt alcanzados en los suelos ante el agregado de diferentes dosis de Ca, sugiriendo una falta de ajuste de la metodología. Por ello, en la actualidad se recomienda la incubación de pastas de saturación con diferentes dosis de Ca para medir los niveles de CaExt alcanzados en suelos ante el agregado de fertilizantes. De conocer los valores de CaExt demandados por los cultivos, estos resultados permitirían definir herramientas para ajustar la dosis de fertilizante cálcicos según suelo y cultivo.

El objetivo específico del Capítulo 6 fue evaluar el uso de fertilizante y correctores cálcicos en suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires sobre 1) la productividad y exportación de Ca y Mg en cultivares actuales de soja forrajera, 2) propiedades fisicoquímicas y químicas del suelo y 3) balance de Ca en el suelo. Se realizó un ensayo en invernáculo sobre soja utilizando los suelos de Bellocq e Inchausti donde se agregaron fertilizantes (cloruro de calcio) y corrector (caliza). Los tratamientos fueron: testigo (sin agregado de productos); F50: 50 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante, F100: 100 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante y C1500: 1500 kg ha^{-1} de caliza. Las dosis de fertilizantes fueron definidas en base a los planteos de fertilización de la RP y a los resultados encontrados en los capítulos anteriores. La dosis de caliza se determinó en base a recomendaciones máximas para suelos de la RP. Los resultados mostraron que el uso de 100 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante incrementó la MS de soja y los resultados podrían estar asociados con el incremento de CaExt hasta 4 meq l^{-1}. El incremento de la MS produjo incrementos en la exportación de Ca. El uso de correctores solamente impactó positivamente incrementando el pH y el BCaS en suelo, sin incrementar la MS en soja. Los parámetros relativos entre cationes intercambiables y suelos no permitieron predecir el comportamiento de la soja ante el

agregado de Ca. El BCaS solamente fue negativo cuando no se usaron productos cálcicos. Estos resultados evidenciaron la importancia de los cationes básicos para la producción de soja en suelos de la RP, como así también sugerirían que el CaExt podría ser utilizado como indicador diagnóstico de Ca en suelos hapludoles de la RP.

Los resultados de esta tesis sugieren que los suelos de la RP actualmente se encuentran reducidos en cationes básicos y permitirían incrementar la producción de MS en leguminosas, soja principalmente, ante el agregado de fertilizantes cálcicos. Se podría utilizar los niveles de CaExt como un indicador diagnóstico, y se incrementaría la producción de soja ante el agregado de Ca cuando sus valores son menores a 2 meq l^{-1}, siempre y cuando no existan problemáticas jerárquicamente superiores que limiten la producción de los cultivos. Estos estudios preliminares no son suficientes para realizar un análisis acabado del tema por lo que se deberá continuar el estudio de la dinámica de Ca en suelo, al igual que enfatizar en otros cationes básicos como Mg y K. Los suelos de la RP están reduciendo su concentración en nutrientes básicos y se están acidificando. De no reparar en prácticas que reviertan esta situación, estos problemas se expandirán e intensificarán en el futuro, limitando en mayor medida la producción de los cultivos y haciendo incluso más difícil su remediación.

PALABRAS CLAVES: hidroponia, predicción, isotermas, comparación, acidificación

Abstract

DIAGNOSTIC CRITERIA FOR CALCIUM FERTILIZATION OF SOYBEAN (*Glycine max* L. Merr) AND RYEGRASS (*Lolium multiflorum* L.) IN TEMPERATE ARGENTINE ENVIRONMENT

The agricultural productions in the Pampas Region (RP) have generated negative balances of basic nutrients in the soil due to nutrient extraction without replenishment, causing soil acidification. Forage crops could extract high amounts of bases since the whole plant is harvested for animal consumption throughout several periods in the year, especially when used for forage conservation. Currently, there is a debate on the main limiting factor for crop production concerning the dynamics of basic nutrients in PR soils. Calcium (Ca) might be the nutrient that could most affect crop production, with legume crops being potentially the most affected. However, indicators to diagnose the calcium sufficiency status in RP soils for crop production are still lacking. In this context, hydroponic studies could be compiled to evaluate the effect of different concentrations of calcium in solution contacting the roots (SCR) and compare their effects with calcium values in the soil's soluble-available fraction (CaExt), being the main source from which plants obtain calcium. Nevertheless, CaExt values in PR Mollisol soils are unknown since it is not a commonly requested determination in soil laboratories, and studies on Ca in SCR in crops might be outdated, mainly conducted in the second half of the 20th century, whereas current cultivars might have higher requirements. Therefore, updating the effects of Ca on SCR on crops and knowing CaExt values in RP soils are considered necessary, which could be estimated from determinations made in the soils. Additionally, identifying calcium-deficient sites will necessitate the study of methodologies to evaluate the effect of adding different doses of calcium fertilizers to RP soils, as well as the effect of using different calcium products on extensive crops, soil properties, and soil calcium balance (BCaS), one of the main causes of soil base reduction. In this context, the general objective of this thesis was to contribute to the knowledge to generate criteria for calcium fertilization of forage crops in Mollisol soils of the Pampas Region of Argentina, aiming at the sustainability of productive systems.

The specific objective of Chapter 3 was to quantify the effect of different concentrations of Ca in SCR on the productivity and export of Ca and Mg in current cultivars of forage soybean and annual ryegrass. A hydroponic trial was conducted with 2, 10, 18, and 24 meq l^{-1} of Ca in SCR on soybean and ryegrass for forage purposes. Dry matter (MS), nutrient concentration in biomass, and basic cation export were measured. DM increased in soybean from 2 to 10 meq l^{-1}, while in ryegrass, no differences were observed in any of the treatments. Calcium concentration in biomass (CCaB) increased in soybean up to 10 meq l^{-1} and in ryegrass up to 18 meq l^{-1}, while magnesium concentration in biomass (CMgB) decreased with increasing Ca in SCR in soybean, and in ryegrass, it was maximized at intermediate concentrations. Additionally, in ryegrass, synergy and antagonism between Ca and Mg were found depending on the growth stage. Calcium and magnesium export were associated with soybean MS behavior and CCaB and CMgB patterns, respectively, in both crops. The results suggest that soybean might have increased yield potential compared to older crops, leading to a higher demand for calcium, while ryegrass may not have increased calcium requirements but possesses a high capacity to accumulate basic cations in biomass. This information is relevant for understanding the dynamics of basic nutrients in current crop production and defining the use of calcium products in RP soils.

The specific objective of Chapter 4 was to estimate the CaExt concentration of Mollisol soils in the Buenos Aires province from routinely requested analytical determinations in soil laboratories of the RP, as parameters determined in regional laboratories could be closely related to CaExt values. Analytical determinations were performed on 24 Mollisol soils from the central-northern zone of the Buenos Aires province, and a simple linear regression was conducted by variable selection to choose the variables predicting its concentration. Electrical conductivity (CE) and the soluble-exchangeable calcium ratio relative to the sum of exchangeable bases of the soil (CaCIC S^{-1}) were the variables retained by the model with an R^2 adjustment degree of 0.63. This information could be useful for diagnosing levels and doses of calcium fertilizers, similar to the use of other nutrients in generating calibrated response curves to fertilization. However, the equation could underestimate the estimated CaExt values and generate errors, so it would be recommended to directly measure CaExt in saturation paste extract, where CE is also quantified, whenever a more accurate measurement is required. The equation could be used to characterize sites and identify areas with very low CaExt content.

The specific objective of Chapter 5 was to evaluate laboratory methodologies for 1) studying the adsorption/desorption dynamics of Ca in Hapludoll soils of Buenos Aires and 2) predicting the CaExt values reached after the application of calcium fertilizers. Adsorption isotherms and saturation paste incubation trials were conducted on Bellocq and Inchausti soils to quantify Ca levels after adding different doses of calcium fertilizer. Freundlich, Tempkin, and Van Huay isotherms were adjusted in soils under Ca adsorption conditions, corresponding to doses greater than 125 kg ha^{-1} of Ca in Bellocq and 350 kg ha^{-1} of Ca in Inchausti, while Tempkin and Van Huay isotherms were adjusted in desorption situations with doses lower than 100 kg Ca ha^{-1}. These results support the use of isotherms to study Ca dynamics in Hapludoll soils of the RP. However, the isotherms failed to accurately estimate CaExt values compared to their measurement in saturation pastes. The isotherms overestimated the CaExt levels reached in soils upon the addition of different doses of Ca, suggesting a lack of methodology adjustment. Therefore, it is currently recommended to incubate saturation pastes with different doses of Ca to measure the CaExt levels reached in soils with the addition of fertilizers. Knowing the CaExt values demanded by crops, these results would allow the definition of tools to adjust calcium fertilizer doses according to soil and crop.

The specific objective of Chapter 6 was to evaluate calcium fertilizers and amendments in Hapludoll soils of the Buenos Aires province on 1) the productivity and export of Ca and Mg in current cultivars of forage soybean, 2) physicochemical and chemical properties of the soil, and 3) soil calcium balance. A greenhouse trial was conducted on soybean using Bellocq and Inchausti soils, where fertilizers (calcium chloride) and corrective (limestone) were added. The treatments were: control (without product addition); F50: 50 kg ha^{-1} of Ca with fertilizer, F100: 100 kg ha^{-1} of Ca with fertilizer, and C1500: 1500 kg ha^{-1} of limestone. Fertilizer doses were determined based on fertilization practices in the RP and previous chapter results. Limestone dose was determined based on maximum recommendations for RP soils. Results indicated that the use of 100 kg ha^{-1} of Ca with fertilizer increased soybean MS, potentially associated with an increase in CaExt up to 4 meq l^{-1}. Increased MS led to increases in Ca export. The use of corrective measures positively impacted soil pH and soil calcium balance (BCaS) without increasing soybean MS. Relative parameters between exchangeable cations and soils did not predict soybean behavior upon Ca addition. BCaS was negative only when calcium products were not used. These results underscore the importance of basic cations for soybean production in RP soils and validate the use of CaExt as a diagnostic indicator of Ca in Hapludoll soils of the RP.

The results of this thesis suggest that RP soils are currently deficient in basic cations and could increase legume dry matter production, primarily soybean, with the addition of calcium fertilizers. CaExt levels could be used as a diagnostic indicator, increasing soybean production with calcium addition when values are below 2 meq l^{-1}, provided no higher-ranking issues limiting crop production exist. These preliminary studies are insufficient for a comprehensive analysis, thus further study on soil calcium dynamics is warranted, along with emphasis on other basic cations such as Mg and K. RP soils are diminishing in basic nutrient concentration and acidifying. Failure to address practices reversing this situation will exacerbate and intensify these issues in the future, further limiting crop production and complicating remediation efforts.

KEYWORDS: hydroponics, prediction, isotherms, comparison, acidification

Capítulo 1

-

Introducción general

1.1. INTRODUCCIÓN

Los suelos productivos de la Región Pampeana (RP) mayormente pertenecen al orden molisoles y se han caracterizado por su elevada fertilidad y dotación de nutrientes básicos para la producción de cultivos (Morrás, 2008; Imbellone et al., 2010; USDA, 2014). Sin embargo, las actividades agropecuarias tradicionalmente han generado balances negativos de nutrientes y, en consecuencia, han reducido la concentración de nutrientes como calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) en los suelos (Presutti, 2016; Sainz Rozas et al., 2019). El balance simplificado de nutrientes puede calcularse como la diferencia entre la entrada y salida de nutrientes en un sistema productivo durante un ciclo o período de tiempo (Abbona, 2017). La escasa/nula fertilización con bases, en conjunto con la elevada extracción de cationes básicos, ha generado balances negativos de nutrientes en la RP (Sainz Rozas et al., 2019; CIAFA, 2023). El incremento en la materia seca (MS) cosechada en el sistema y la concentración de Ca en la biomasa cosechada (CCaB), y/o concentración de Mg (CMgB), incrementan la salida o exportación de Ca (ECaB) y/o de Mg (EMgB) del sistema, respectivamente. Las actividades ganaderas generan elevados valores de ECaB y EMgB, pues cosechan plantas enteras para el consumo animal durante varios momentos en el año, situación que se agrava cuando se utilizan para conservación de forraje y sistemas estabulados o a corral (Bender et al., 2015; Abbona, 2017). El balance de Ca en suelos (BCaS) es uno de los indicadores más importantes, puesto que el Ca es el nutriente básico predominante en los suelos de la RP y podría ser el nutriente que más afecte la producción de cultivos (Vázquez y Millán, 2017). Es importante, entonces, conocer el BCaS generado en los suelos molisoles de la RP para definir estrategias colaboren con la sustentabilidad de los sistemas (Sarandón y Flores, 2014).

Los balances negativos de nutrientes básicos en suelos de la RP generados por las actividades antrópicas, principalmente BCaS, en conjunto con el uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados con elevado índice de acidez, ha causado acidificación de los suelos (Vázquez y Millán, 2017; Sainz Rozas et al., 2019). Sin embargo, esta problemática aún no representa una de las principales limitantes de la producción en zonas templadas y hasta la fecha no ha alcanzado un estudio minucioso de la temática como ha sido realizado en zonas tropicales, que se caracterizan por tener suelos ácidos naturalmente debido a la naturaleza del material originario de los suelos y a intensa meteorización y lixiviación de bases causadas por las condiciones climáticas (Zapata Hernández, 2006; Vázquez y Pagani, 2015). El pH de los suelos de zonas tropicales generalmente posee valores inferiores a 5,5, representando una de las principales limitantes para la producción de

cultivos (Zapata Hernandez, 2004). La acidez de suelos impacta negativamente en la dinámica de nutrientes como nitrógeno (N) y fósforo (P), puede causar toxicidad por solubilizar aluminio (Al), puede generar modificaciones en propiedades físicas y microbiológicas, entre otras problemáticas que afectan la producción de los cultivos (Vázquez y Millán, 2017). En la actualidad se discute cuál sería la principal limitante relacionada con la dinámica de nutrientes básicos para la producción de los cultivos en los suelos molisoles de la RP que no poseen restricciones físicas para el crecimiento de cultivos y cuyos valores de pH no son tan limitantes como en zonas tropicales (Taboada y Álvarez, 2008; Vázquez y Millán, 2017). Algunos autores asocian los efectos negativos de la acidificación como la principal limitante de la producción agropecuaria, mientras que otros asocian la baja disponibilidad de nutrientes como Ca (Vázquez y Pagani, 2015; Zubillaga y Ciarlo, 2015). En ambos casos, los cultivos de leguminosas serían especies más afectadas que los cultivos de gramíneas debido, en términos generales, a que poseen mayores requerimientos de Ca y son más susceptibles a la condición de acidez en el suelo (Marschner, 2023). En este sentido, sería pertinente estudiar el comportamiento de especies leguminosas en suelos acidificados de la RP y generar tratamientos para incrementar su producción.

En la actualidad se carece de indicadores para diagnosticar sitios deficientes en Ca en suelos de la RP a pesar de que algunos autores plantean que la baja concentración de Ca en suelos podría limitar la producción de cultivos (Zubillaga y Ciarlo, 2015). El diagnóstico de la suficiencia cálcica en suelo tradicionalmente se ha realizado mediante índices relativos entre la concentración de Ca en la fracción soluble-intercambiable (CaCIC) respecto a la capacidad de intercambio catiónico del suelo (CIC), como así también la relación entre CaCIC y la concentración de otros nutrientes básicos en la fracción soluble-intercambiable como Mg (MgCIC) y/o K (KCIC) (Vázquez y Millán, 2017). Sin embargo, se han realizado amplias revisiones bibliográficas que reportan la carencia de evidencia científica para considerar acertados los diagnósticos relativos de fertilidad cálcica en suelos (Kopittke y Menzies, 2007; Chaganti y Culman, 2018). En este contexto, llamativamente se ha desestimado el uso de la concentración de Ca en la fracción soluble-disponible del suelo (CaExt) como indicador diagnóstico de suficiencia cálcica. El CaExt es la principal fuente desde donde las plantas se abastecen de los nutrientes, y la concentración de nutrientes en la fracción soluble-disponible ha sido utilizada para la calibración de nutrientes como N para generar curvas calibradas de respuesta y definir dosis de fertilizantes (Bachmeier et al., 2013; White y Holland, 2018). Más aún, sería factible estimar los rangos de suficiencia cálcica en suelo para los diferentes cultivos utilizando soluciones nutritivas, puesto que el

efecto de las concentraciones de CaExt podría ser comparable con los efectos de la concentración de Ca en solución en contacto con las raíces (SCR). Tanto en CaExt como en Ca en SCR, el ión Ca se encuentra libre, sin interacción con coloides, y disponible para ser absorbido por las plantas (Loneragan y Snowball, 1969). En este sentido, cabría la posibilidad de considerar valores de CaExt de referencia para los distintos cultivos utilizados en la RP según su comportamiento en soluciones nutritivas.

Los estudios en soluciones nutritivas relacionados con la nutrición cálcica de cultivos han sido realizados principalmente en la segunda mitad del siglo XX y en la actualidad podrían estar desactualizados (Knez y Stangoulis, 2021). En los últimos años, luego de la "revolución verde", los cultivos han incrementado el potencial productivo y, consecuentemente, la demanda de nutrientes (Filippi et al., 2021). En este marco, es necesario actualizar y/o validar el efecto de las diferentes concentraciones de Ca en SCR sobre los cultivares actuales. Paralelamente, en la actualidad se desconocen los valores de CaExt, que serían comparables con Ca en SCR, puesto que no es un análisis solicitado en los laboratorios de suelos de la RP (Ciarlo et al., 2018). Aun así, se considera que sus valores podrían ser estimados a través de las determinaciones solicitadas ya que podrían estar fuertemente relacionadas con los parámetros del suelo que gobiernan los valores CaExt (Echeverría y García, 2015). En este sentido, se podrían generar funciones similares a las conocidas de "pedotransferencia", utilizando como variables predictoras a los parámetros o determinaciones conocidas (Bouma, 1989). Lince Salazar et al. (2015) han generado con éxito estimaciones de CaExt en función de parámetros del suelo en Colombia, al igual que algunos autores han reportado con éxito el uso de esta técnica para la cuantificación de propiedades químicas de suelos (Cox, 1994; Scheinost et al., 1997; Genú y Demattê, 2011). En este sentido, se considera que podrían generarse ecuaciones predictivas para estimar CaExt a través de parámetros conocidos de los suelos y comparar sus valores con los efectos de Ca en SCR en los cultivos con el objetivo de identificar suelos deficientes en Ca.

La identificación de sitios deficientes en Ca generaría la necesidad de utilizar productos cálcicos en dosis ajustadas para remediar la problemática. En este sentido los principales productos disponibles para incorporar Ca al sistema son los fertilizantes y correctores cálcicos (Vázquez y Millán, 2017) Los fertilizantes tienen como principal objetivo incrementar la concentración de cationes en la fracción soluble-disponible del suelo, mejorando la disponibilidad para las plantas, mientras que los correctores tienen como principal objetivo incrementar el pH del suelo, neutralizando la acidez (Zapata Hernandez,

2004; Bachmeier et al., 2013). En términos generales, se podría considerar que el uso de fertilizantes cálcicos puede ser una práctica coyuntural al uso de correctores para sortear problemáticas de suelos deficientes en bases o acidificados ya que generarían incrementos de CaExt más rápidamente, pero sus efectos podrían ser menos durables en el tiempo ya que no modificarían propiedades fisicoquímicas del suelo (Vázquez y Pagani, 2015). Asimismo, el uso de fertilizantes es una práctica más fácil de adoptar en los planteos productivos de la RP que los correctores debido a la logística del producto y a la disponibilidad de maquinarias para realizar la labor (CAFMA, 2020). Los estudios con fertilizantes y correctores cálcicos en suelos de la RP son muy escasos y las experiencias muestran resultados podrían ser muy variables según producto, suelo, clima, cultivo y tecnología (Machetti, 2021), evidenciando la necesidad de generar estudios para una mayor comprensión de la dinámica del Ca en suelos de la RP y el uso de productos cálcicos como fertilizantes (Vivas y Fontanetto, 2003; Girón et al., 2016). En este contexto, se considera necesario estudiar el efecto de la disponibilidad de Ca en los cultivos actuales, generar herramientas de diagnóstico calibradas que permitan identificar suelos afectados por el desabastecimiento cálcico, investigar la dinámica de este nutriente ante su agregado en los suelos de la RP y comparar el efecto del uso de fertilizantes y correctores cálcicos sobre los cultivos, características del suelo y el BCaS. Esta información será valiosa para definir estrategias que incrementen la producción de MS en los cultivos, principal objetivo buscado en la incorporación de nutrientes al suelo, sin comprometer la sustentabilidad de los sistemas (Bachmeier et al., 2013; Sarandón y Flores, 2014; Abbona, 2017).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. General

El objetivo de esta tesis fue generar criterios para la fertilización cálcica de cultivos forrajeros en suelos molisoles de la Región Pampeana de Argentina, propendiendo a la sustentabilidad de los sistemas productivos.

1.2.2. Específicos

Los objetivos específicos de este trabajo fueron:

✓ cuantificar el efecto de concentraciones iguales y mayores a 2 meq l^{-1} de Ca en SCR sobre la productividad y exportación de Ca y Mg en cultivares actuales de soja forrajera y raigrás anual (Capítulo 3)

✓ estimar la concentración de CaExt de suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires a partir de determinaciones analíticas solicitadas rutinariamente en laboratorios de suelos de la RP (Capítulo 4)

✓ evaluar metodologías de laboratorio para 1) estudiar la dinámica de adsorción y desorción de Ca en suelos hapludoles de Buenos Aires y 2) predecir los valores de CaExt alcanzados luego la aplicación de diferentes dosis de fertilizantes cálcicos (Capítulo 5)

✓ evaluar el uso de fertilizante y correctores cálcicos en suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires sobre 1) la productividad y exportación de Ca y Mg en cultivares actuales de soja forrajera, 2) propiedades fisicoquímicas y químicas del suelo y 3) balance de Ca en el suelo (Capítulo 6)

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. General

La hipótesis de esta tesis fue que la fertilización cálcica permite incrementar la producción de cultivos forrajeros en suelos molisoles de la Región Pampeana y mitigar los balances negativos de calcio en suelo, propendiendo a la sustentabilidad de los sistemas productivos.

1.3.2. Específicas

✓ la mayor productividad de MS, CCaB y ECaB en cultivares actuales de soja forrajera y raigrás anual se alcanzan con concentraciones mayores a 2 meq l^{-1} de Ca en SCR, mientras que CMgB y EMgB se reducen con concentraciones mayores a 2 meq l^{-1} de Ca en SCR (Capítulo 3)

✓ los valores de CaExt de suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires se encuentran estrechamente relacionados a los principales parámetros de suelos determinados rutinariamente en laboratorios de la RP, permitiendo generar ecuaciones predictivas para estimar su concentración (Capítulo 4)

✓ la incubación de pastas de saturación de suelos es una metodología más adecuada que las isotermas de adsorción para estudiar la dinámica de adsorción y desorción de Ca en suelos hapludoles de Buenos Aires y predecir los valores de CaExt alcanzados con diferentes dosis de fertilizantes cálcicos, debido a la mayor relación suelo:líquido (Capítulo 5)

✓ el agregado de fertilizantes cálcicos genera el mismo efecto que el uso de correctores sobre la producción de MS, CCaB, CMgB, ECaB y EMgB de cultivares actuales de soja forrajera; mientras que provoca efectos diferenciales sobre las propiedades fisicoquímicas y químicas del suelo y en el BCaS de suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires (Capítulo 6)

1.4. ORGANIZACIÓN Y ESQUEMA DE LA TESIS

1.4.1. Organización

La tesis está compuesta por una revisión bibliográfica (Capítulo 2), cuatro ensayos experimentales (Capítulo 3 al Capítulo 6), una discusión y conclusión general con líneas de investigación identificadas a futuro (Capítulo 7) y un apartado con la bibliografía citada. Cada capítulo experimental responde a un objetivo específico de la tesis y se presenta en forma de trabajo científico: introducción específica, objetivo específico, hipótesis específica, materiales y métodos, resultados, discusión y conclusiones parciales.

El Capítulo 2 menciona la historia del arte en el tema de estudio y la bibliografía científica publicada, brindando información vigente respecto a las causas que han generado la reducción de bases en suelos de la RP, conllevando en algunos casos a la acidificación de los suelos, la importancia del adecuado abastecimiento de Ca en las plantas y su dinámica y los principales factores que intervienen en el proceso. Asimismo, se recopila información respecto a indicadores utilizados para el diagnóstico de la suficiencia en cálcica en suelos y productos y metodologías que se podrían utilizar para definir tipo y dosis de productos utilizados para incorporar Ca en los suelos. Se destacan los vacíos de conocimientos y las principales discusiones existentes en la actualidad, siendo algunas de ellas las que fundamentan y se pretenden atender en este trabajo.

El Capítulo 3 realiza un estudio en solución nutritiva para cuantificar el efecto de diferentes concentraciones de Ca en SCR sobre cultivares actuales de soja y raigrás anual, especies utilizadas para alimentación animal en la RP. Se evalúa el comportamiento de estos cultivos sobre la MS, CCaB, CMgB, ECaB y EMgB para entender la dinámica en estos parámetros ante diferentes niveles de Ca en SCR y comparar los resultados respecto a los estudios realizados. Se enfatizan los efectos en la producción de MS, puesto que el principal parámetro buscado en la fertilización de nutrientes, y en la ECaB y EMgB, puesto que son causas asociadas al desabastecimiento de bases en suelos de la RP.

El Capítulo 4 estudia los niveles de CaExt de suelos molisoles de la RP, que hasta la actualidad se desconocen. En base a que el CaExt estaría fuertemente relacionado con los valores de las determinaciones solicitadas de rutina en laboratorios de la RP, se generó una ecuación predictiva de los valores de CaExt en función de parámetros conocidos de suelos. Los datos de CaExt resultan relevantes ya que, al igual que en otros nutrientes, podría ser utilizado como una herramienta de diagnóstico de fertilidad cálcica y de calibración para el uso de fertilizantes.

El Capítulo 5 realiza una evaluación de distintas metodologías de laboratorio para estudiar el comportamiento de Ca soluble en suelos hapludoles de la RP ante el agregado de fertilizante cálcico y su ajuste con los valores de CaExt alcanzados en los suelos. Esta información es relevante para definir dosis ajustadas de fertilizante cálcico con el objetivo de incrementar la producción de MS, utilizando los recursos de manera eficiente y colaborando con la sustentabilidad de los sistemas.

El Capítulo 6 estudia el efecto de la aplicación de fertilizantes y correctores cálcicos sobre la productividad de MS y exportación de cationes básicos en soja forrajera, sus efectos sobre parámetros fisicoquímicos y químicos del suelo y sobre el BCaS de suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires. Estos estudios son relevantes pues permiten comparar los efectos del uso de distintos productos para el agregado de Ca al suelo y evaluar sus efectos para generar criterios que permitan incrementar la productividad de los cultivos, colaborando con la sustentabilidad del sistema.

El Capítulo 7 recupera e integra las principales discusiones generadas en esta tesis, mencionando las conclusiones más relevantes y resaltando aquellas áreas que requieren más investigación a futuro.

Finalmente, se presenta un apartado con la bibliografía citada a lo largo de la tesis.

1.4.2. Esquema

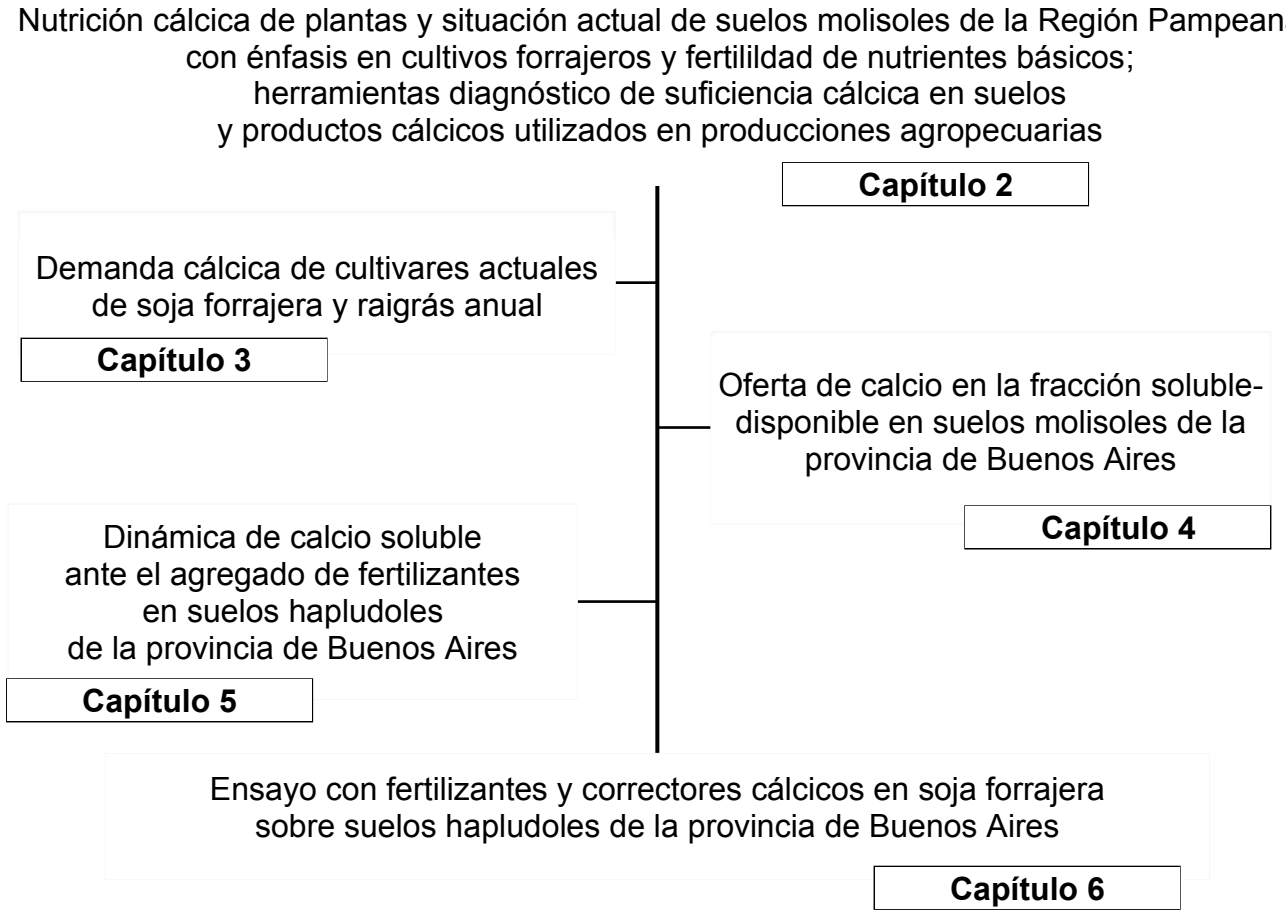


Figura 1-1. Esquema de la tesis realizada.

Capítulo 2

-

Revisión bibliográfica

2.1. SINAPSIS

Este Capítulo examina la literatura disponible respecto a la situación actual de los suelos de la Región Pampeana (RP) respecto al contenido de bases como calcio (Ca) en suelo, las recientes causas de su reducción y las posibles consecuencias para la producción de cultivos. Asimismo, explora los posibles indicadores para utilizar en el diagnóstico de sitios deficientes en Ca y las herramientas metodológicas que podrían utilizarse para definir dosis ajustadas de productos cálcicos en suelos de la RP con el objetivo de incrementar la producción de los cultivos, sin comprometer la sustentabilidad de los sistemas. Se destacarán los principales aspectos que generan discusión en la actualidad, siendo algunos de ellos los que fundamentan y se pretenden atender en estos estudios.

2.2. SUELOS DE LA REGIÓN PAMPEANA

La RP se ubica en el área central de Argentina y se caracteriza por tener un clima templado, con condiciones hídricas húmedas a semiáridas, y suelos con buenas aptitudes para el crecimiento de los cultivos (Panigatti, 2010). Los suelos se desarrollaron mayormente sobre sedimentos de origen loessico, con elevada variabilidad de minerales en su composición que le otorga una elevada fertilidad en nutrientes, tanto desde el punto de vista cuali como cuantitativo (Imbellone et al., 2010). La mayor parte de la superficie de la RP posee suelos del orden molisoles, clasificados según *Soil Taxonomy* (INTA, 1990; Morrás, 2008; USDA, 2014). Los suelos del orden molisol se caracterizan por tener un epipedón mólico, colores oscuros y elevados contenidos de materia orgánica, son suelos ligeramente lixiviados valores de pH cercanos a la neutralidad que le otorga una elevada fertilidad para la producción de los cultivos (Imbellone et al., 2010; Panigatti, 2010; USDA, 2014; Fadda, 2016). Dentro del orden molisol en la RP, se encuentran suelos del suborden udoles. Los udoles, entre otras cosas, se caracterizan por tener un régimen de humedad údico, representante de isohietas de la RP mayores a 600 mm anuales aproximadamente, y no tener síntomas de hidromorfismo en la zona de control (USDA, 2014). Mas aún, dentro de los suelos udoles en la RP, se encuentran los grandes grupos argiudoles, paleudoles y hapludoles. Los suelos argiudoles se caracterizan por tener un endopedón argílico (elevados contenidos de arcilla), los paleudoles se caracterizan por tener un endopedón argílico con su límite superior a más de 60 cm de profundidad y los hapludoles por no tener endopedón como horizonte diagnóstico (USDA, 2014). En los suelos de la RP, en los últimos años se ha reportado una reducción de los contenidos de bases en el suelo debido a las producciones agropecuarias (Sainz Rozas et al., 2019).

La reducción de bases por las producciones agropecuarias en la RP ha sido asociada a los balances negativos de nutrientes (Vázquez y Millán, 2017). El balance simplificado de nutrientes puede entenderse como la diferencia entre la cantidad de nutriente agregado al agroecosistema respecto a la cantidad de nutriente extraído en un ciclo o año productivo a través de los productos de cosecha (Sarandón y Flores, 2014). En la RP, se han generado balances negativos de nutrientes básicos tanto por la escasa incorporación de nutrientes a través de fertilizantes como así también por la elevada extracción de bases (García y Presutti, 2018; CIAFA, 2023). Más aún, según Bender et al. (2015) los planteos ganaderos podrían ser muy extractivos en el ciclo productivo puesto que generan cosechan fundamentalmente hojas para consumo animal durante varios períodos en el año, y más aún si los cultivos son destinados a heno o silo y son sistemas estabulados o a corral. Sin embargo, no se ha cuantificado en profundidad los niveles de extracción de cationes básicos que generan los cultivos forrajeros en los distintos suelos de la RP, a pesar de que existen algunos reportes generales según el tipo de producción (Abbona, 2017; Ferro et al., 2017). En este sentido se considera relevante estudiar el efecto de los cultivos forrajeros utilizados sobre la extracción de cationes básicos en suelos de la RP.

Los cultivos forrajeros más utilizados en los planteos ganaderos pertenecen a las familias de las gramíneas y leguminosas. El raigrás anual (*Lolium multiflorum* L.) es una gramínea de invierno que se utiliza con el objetivo de aumentar la disponibilidad de MS en los meses más fríos del año y su rebrote favorece el pastoreo en varias oportunidades dentro de un mismo año (Fernandez Grecco, 2000; Echenique et al., 2008). En la actualidad, el raigrás es el segundo verdeo de invierno más utilizado (Scheneiter, 2014). En leguminosas, la soja forrajera (*Glycine max L*. Merr) es un cultivo de verano utilizado principalmente en Argentina para la producción de granos, pero con elevada potencialidad forrajera para incorporar proteína (MAGyP, 2021). El cultivo de soja se valora puesto que posee un bajo costo en su manejo, permitiendo incluso incrementar la oferta forrajera con genotipos de ciclo largo (Romero, 2005). Asimismo, es un cultivo preciado por tener buenas características como predecesor de pasturas debido a que permite el uso de herbicidas como glifosato y puede ser utilizado en pastoreo directo y para la elaboración de heno o silo. En Argentina, Luz (2007) demostró que se utiliza por productores ganaderos de carne y leche desde hace ya algunos años, existiendo poca bibliografía que contenga datos concluyentes y definitivos relacionados al manejo y elección de cultivares más aptos para cada uso. En este sentido, el raigrás anual y la soja forrajera podrían ser cultivos indicadores para estudiar el efecto de los cultivos forrajeros sobre la dinámica de nutrientes básicos en suelos de la RP.

La reducción de nutrientes básicos en los suelos de la RP podría limitar la producción de los cultivos debido a deficiencias nutricionales. Según la “ley del mínimo” (von Liebig, 1840), el crecimiento vegetal está limitado por aquel nutriente que se encuentra menos disponible según la demanda del cultivo. Los nutrientes se clasifican en macronutrientes primarios, macronutrientes secundarios y micronutrientes, dependiendo de las cantidades que las plantas necesitan para su normal crecimiento y desarrollo. El N, P y K son considerados macronutrientes primarios, mientras que el Ca y Mg son considerados macronutrientes secundarios (Azcón-Bieto y Talón, 2008; Marschner, 2023). En este marco, el crecimiento de los cultivos podría estar limitado por la concentración de nutrientes básicos si se reduce su concentración en los suelos por debajo de umbrales mínimos respecto a la concentración de otros nutrientes. Más aún, la reducción de Ca podría ser más agravante que la reducción de Mg o K en los suelos de la RP, puesto que 1) el Ca es el nutriente básico que domina el complejo de cambio y es responsable de la generación de estructura en el suelo (permitiendo el intercambio de aire y agua), 2) las plantas necesitan mayores cantidades de Ca que de Mg, y 3) los suelos de la RP se caracterizan por tener concentraciones elevadas de K debido a la presencia de arcillas illíticas (Imbellone et al., 2010; Vázquez y Pagani, 2015; Marschner, 2023). En este sentido, se considera relevante estudiar la dinámica de Ca en los suelos RP, puesto que podría ser el nutriente básico que más limite la producción de los cultivos y afecte mayormente la fertilidad de los suelos.

La disminución del Ca en suelos de zonas templadas como los de la RP es un hecho atípico a nivel mundial (Wang et al., 2017). En general, los suelos con bajas concentraciones de Ca son característicos de zonas tropicales, en donde la elevada meteorización y lixiviación de bases disminuye la concentración de bases en el suelo y ocasiona acidez (Zapata Hernandez, 2004). En estos sitios, la acidez del suelo es la principal limitante para la producción de cultivos por sobre la disponibilidad de bases, ya que los suelos poseen valores de pH menores a 5,5, generalmente. La elevada acidez del suelo incluso provoca la solubilización de cationes como aluminio (Al), hierro (Fe) y manganeso (Mn) que pueden sufrir hidrólisis denominada “ácida”, derivando en mayor acidez edáfica (Zapata Hernández, 2006; Pellegrini et al., 2016). La acidificación de los suelos en la RP en la actualidad se encuentra en expansión e intensificación, pero aún no es tan pronunciada y no representa una de las mayores limitantes para la producción de cultivos como en suelos tropicales (Sainz Rozas et al., 2019). Sin embargo, los niveles de acidez de los suelos de la RP podrían reducir la producción de cultivos por impactar negativamente en la disponibilidad de nutrientes como N, P y molibdeno (Mo) (Vázquez y Millán, 2017), por modificar propiedades físicas y por alterar la composición microbiana del

suelo (Groffman et al., 1996; Luca et al., 2006). En la actualidad, se discute cuál sería la principal consecuencia para la producción de cultivos en suelos de la RP relacionada con la dinámica de nutrientes básicos en suelos afectados por la problemática. Algunos autores mencionan que podría ser la deficiencia nutricional de Ca por sobre los efectos negativos de la acidez, principalmente en los cultivares actuales que han incrementado la demanda de nutrientes debido al mejoramiento genético y biotecnología (Zubillaga y Ciarlo, 2015; Vázquez y Millán, 2017; Filippi et al., 2021). Independientemente de la discusión, la deficiencia de Ca y/o acidificación comprometería en mayor medida las especies leguminosas por ser, en general, más susceptibles a la acidificación y por poseer mayores requerimientos de nutrientes básicos (Gelati y Vázquez, 2008; García y Correndo, 2016).

La limitación de la producción de cultivos debido a acidificación y/o baja disponibilidad de Ca podría mitigarse con el uso de productos cálcicos. En la RP se han realizado estudios incorporando productos cálcicos principalmente en leguminosas, y se han encontrado respuestas positivas en la producción de MS (Fontanetto et al., 2011; Machetti, 2021). Estas experiencias demuestran la limitación de la acidificación y/o reducción de bases en suelos de la RP para la productividad de los cultivos, principal objetivo buscado para definir el uso de fertilizantes en los sistemas productivos (Bachmeier et al., 2013). Sin embargo, los escasos estudios han demostrado resultados variables y las dosis utilizadas fueron definidas por los investigadores, puesto que no existe hasta la actualidad un estudio minucioso del tema y curvas calibradas de respuesta para el uso de estos productos. En este marco, se considera relevante comprender el estado del conocimiento acerca de la importancia y dinámica del Ca en los cultivos, la dinámica del Ca en la relación suelo-planta y las herramientas conocidas para diagnosticar y definir el tipo y dosis de productos cálcicos, con el objetivo de elaborar ensayos para conocer el efecto de la concentración de Ca disponible en raíces sobre los cultivos forrajeros utilizados en la RP, elaborar de indicadores ajustados para diagnosticar deficiencia cálcica en suelos de la RP y definir herramientas ajustadas que permitan generar criterios para la utilización de productos cálcicos en la RP, sin comprometer la sustentabilidad de los suelos (Sarandón y Flores, 2014).

2.3. ROL Y DINÁMICA DEL CALCIO EN PLANTA

El Ca es un elemento que cumple un rol fundamental en la unión de las paredes celulares, en la estabilización y permeabilidad de las membranas celulares, en la elongación/división celular, en la regulación de la apertura estomática, en la emisión de señales fisiológicas contra situaciones del estrés, entre otras funciones, y es por ello que

es importante garantizar un adecuado abastecimiento de este nutriente hacia las células de las plantas (White y Holland, 2018; Marschner, 2023). Los cultivos absorben mayormente Ca desde las raíces y, en consecuencia, el abastecimiento de Ca a las células depende de la concentración de Ca en SCR, de la tasa de absorción de Ca y del transporte de Ca dentro de la planta (Sharma et al., 2017). El ingreso de Ca al xilema se realiza solamente en los pelos radicales, en los extremos de las raíces jóvenes y en la unión de las raíces laterales con la raíz principal, lugares donde la endodermis se encuentra debilitada (Kumar et al., 2015). En general, la endodermis de la raíz se considera impermeable al Ca, pero algunos autores sugieren que tendría diferentes grados de permeabilidad según la especie (Conn y Gilliham, 2010). Una vez en el interior de la planta, el Ca se transporta exclusivamente por xilema, siendo considerado un elemento inmóvil en el floema (Azcón-Bieto y Talón, 2008). El transporte de Ca se encuentra regulado por el flujo transpiratorio y la tasa de transporte depende de la capacidad de intercambio catiónica de las células del xilema, que varía según la especie (Barker y Pilbeam, 2015; White y Holland, 2018). Paradójicamente, el movimiento de agua dentro de la planta está regulado el Ca en citosol pues regula la apertura estomática (Barth, 2021). En este sentido, es importante conocer el efecto de del Ca en SCR sobre los diferentes cultivos, y entender su dinámica en la planta ante las condiciones normales de crecimiento, para elaborar estrategias que permitan identificar especies deficientes en Ca y generar tratamientos para su adecuado abastecimiento.

La disponibilidad de Ca en SCR podría afectar la producción de MS en forma diferencial según los cultivos debido a sus requerimientos cálcicos, y se podrían identificar umbrales mínimos de Ca en SCR para maximizar la producción. En relación con el cultivo de soja, Burton et al. (2000) encontró que la producción de MS se maximizó a partir de concentraciones de 4 meq l^{-1} Ca en SCR; Noble y Sumner (1988) encontraron que la MS se maximizó a partir de concentraciones de 2,5 meq l^{-1} de Ca en SCR; Alva et al. (1991) encontraron incrementos de MS a partir de concentraciones de 5 meq l^{-1} de Ca en SCR, y Rayar (1981) encontró que la MS se maximizó a partir de concentraciones de 0,5 meq l^{-1} de Ca en SCR. En raigrás no se han encontrado trabajos que estudien este comportamiento, pero se han realizado estudios en especies similares de la familia de las gramíneas. En este sentido, Loneragan y Snowball (1969) evidenciaron la máxima producción de biomasa en gramíneas a partir de concentraciones de 0,02 meq l^{-1} de Ca en SCR; Genc et al. (2010) encontraron que el trigo (*Triticum aestivum* L.) alcanzó la mayor producción de MS a partir de concentraciones de 2 meq l^{-1} de Ca en SCR, Clark (1978) encontró los mayores crecimientos de maíces (*Zea mays* L.) a partir de concentraciones de 1,2 y 5 meq l^{-1}, según el genotipo estudiado. Estos valores han permitido generar marcos y

umbrales de referencia para varios cultivos en las condiciones normales de crecimiento, pero que en la actualidad son discutidos y podrían estar desactualizados. Se ha comprobado que los avances en biotecnología han permitido incrementar el potencial de rendimiento de los cultivos y, en consecuencia, ha cambiado la demanda de nutrientes de los cultivos, que incluso puede ser variable en función del genotipo o variedad dentro de una misma especie (Ding et al., 2018; Filippi et al., 2021). Por ello, es necesario estudiar los efectos de la disponibilidad de Ca en SCR sobre la producción de MS de cultivares actuales de soja forrajera y raigrás anual y actualizar los umbrales de suficiencia.

La disponibilidad de Ca en SCR puede modificar la producción de MS de los cultivos, como así también podría afectar los niveles de CCaB, cuyos valores también dependen de la especie, edad y tejido de la planta que se analice (Azcón-Bieto y Talón, 2008). Los tejidos que se encuentran en desarrollo, en general, poseen bajas concentraciones de Ca debido a la necesidad de tener membranas permeables para el ingreso de hormonas y solutos en su proceso de crecimiento, multiplicación y desarrollo (Kirkby y Pilbeam, 1984). Respecto a la edad, la concentración de Ca aumenta con la edad del tejido hasta su senescencia, pues no tiene posibilidad de removilizarse (White y Holland, 2018; de Araújo et al., 2020). En relación con las especies, los cultivos de la familia de las leguminosas poseen mayores valores de CCaB en la biomasa que las monocotiledóneas asociado a las características de las estructuras celulares, a la mayor capacidad de intercambio catiónica de las paredes celulares y a la mayor densidad de grupos carboxílicos libres de ácidos galacturónicos de las pectinas en la laminilla media (Loneragan y Snowball, 1969; Barker y Pilbeam, 2015; White y Holland, 2018). En relación con la disponibilidad de Ca en SCR, en gramíneas, Clement et al. (1978) encontraron que el CCaB de raigrás se incrementó hasta concentraciones de 150 meq l^{-1} de Ca en SCR, variando desde 1,38% a 2,34%. En leguminosas, Alva et al. (1991) reportó que el CCaB de soja se incrementó ante aumentos de 0,1 a 5 meq l^{-1} de Ca en solución. Ascencio (1987) encontró que la mayor CCaB en poroto (*Phaseolus vulgaris* L.) se alcanzó con 2 meq l^{-1} de Ca en SCR. Silva Domingues et al. (2014) encontraron que el CCaB en poroto fue mayor con concentraciones de Ca en SCR de 7,2 meq l^{-1} respecto a concentraciones de 2,2 meq l^{-1}. En este sentido, es importante evaluar el efecto de diferentes concentraciones de Ca en SCR sobre MS y paralelamente sobre CCaB en cultivares actuales de soja forrajera y raigrás anual, puesto que tanto ambos parámetros son responsables de ECaB en cultivos forrajeros, dado que se cosecha la planta entera para el consumo animal (Bender et al., 2015).

La producción de MS y CMgB definen la EMgB, que podría haber colaborado en la reducción de cationes básicos en suelos de la RP, y cuyos valores podrían modificarse según el Ca en SCR. El K en suelos de la RP se encuentra en elevadas concentraciones debido a la elevada presencia de arcillas illíticas (Imbellone et al., 2010). El MgCIC es el segundo nutriente básico más predominante en suelos de la RP y también se ha reducido su concentración en el último tiempo (Vázquez y Millán, 2017; Sainz Rozas et al., 2019). Según autores, la concentración de Ca en SCR podría afectar la absorción de Mg y en consecuencia CMgB y EMgB. En gramíneas, Clement et al. (1978) encontraron que la CMgB de raigrás disminuyó a medida que se incrementó el Ca en SCR, al igual que Clark (1978) encontró que la CMgB en maíz disminuyó a medida que se incrementó la concentración de Ca en SCR hasta 50 meq l^{-1}. En leguminosas, Rayar (1981) encontró que la CMgB de soja comenzó a disminuir en concentraciones mayores de 1 meq l^{-1} de Ca en solución. En este sentido, se esperaría encontrar que menores niveles de Ca en SCR podrían incrementar los niveles de CMgB, y posiblemente EMgB, aumentando la reducción de cationes básicos en suelos de la RP. En este sentido, la deficiencia de Ca en suelos de la RP podría afectar la producción de cultivos y la exportación de cationes básicos, principales responsables de la reducción de nutrientes y acidificación de suelos de la RP.

2.4. HERRAMIENTAS DIAGNÓSTICO DE SUFICIENCIA CÁLCICA

En la actualidad se carecen de indicadores que permitan diagnosticar los niveles de suficiencia cálcica en suelos de la RP. La suficiencia cálcica en suelos se ha determinado en base a la relación CaCIC CIC^{-1}. Graham (1959) postuló que los valores óptimos de CaCIC CIC^{-1} en suelos debían ser entre 0,65 y 0,85. Posteriormente, Baker y Amacher (1981) redefinieron los valores de esta relación entre 0,60 y 0,80. Sin embargo, aunque dichos valores fueron y son utilizados actualmente en el diagnóstico de fertilidad cálcica, ambos boletines donde fueron citados carecen de rigor científico puesto que realizan una descripción general y los procedimientos y datos experimentales no fueron citados. Paralelamente, también se han estudiado otros indicadores relativos que relacionan la concentración de Ca respecto a otros nutrientes básicos. Algunos autores mencionan que, en condiciones ideales, la relación CaCIC $MgCIC^{-1}$ debe ser entre 3 y 15, dependiendo de las condiciones experimentales de los distintos casos analizados (suelo, clima, cultivo, material genético), poniendo en evidencia la amplitud del rango y restringiendo las condiciones en donde esos valores son válidos (Vázquez y Millán, 2017). Sin embargo, Chaganti y Culman (2018) y Kopittke y Menzies (2007) han realizado extensas revisiones bibliográficas y expresaron que no habría evidencia científica sólida para considerar que

estos indicadores tengan una estrecha relación con el comportamiento de los cultivos. Los autores mencionan que no se podría validar que existe un rango ideal de saturación de bases en el suelo y que muchos cultivos respondieron de la misma forma en un mismo rango amplio de relaciones entre nutrientes. En este marco, se considera necesario identificar indicadores y conocer referencias que permitan diagnosticar suelos deficientes en Ca en la RP.

El CaExt, llamativamente, no ha sido utilizado como indicador diagnóstico de fertilidad cálcica en suelos, siendo que las plantas absorben los nutrientes de la fracción soluble-disponible del suelo (Marschner, 2023). Además, la concentración de nutrientes en la fracción soluble-disponible ha sido utilizada para calibrar curvas de respuesta en diferentes cultivos, como en N, sugiriendo que el CaExt podría ser un indicador pertinente para el diagnóstico de suficiencia cálcica en suelos (Bachmeier et al., 2013). Por otro lado, Loneragan y Snowball (1969) han comprobado que los efectos de la concentración de Ca en SCR pueden ser comparables con los valores de CaExt evaluando 18 especies a nivel de campo. En consecuencia, podrían realizarse estudios en soluciones nutritivas para generar valores de referencia de niveles de suficiencia de CaExt en suelos. Sin embargo, Taboada y Álvarez (2008) mencionan que la disponibilidad de Ca podría limitar la producción de los cultivos a campo, siempre y cuando no existan limitantes jerárquicamente superiores para el crecimiento de las raíces. Según los autores las propiedades físicas y la concentración de nutrientes como N, P o K podrían limitar en mayor medida que la disponibilidad de Ca. En este sentido, el CaExt podría ser un indicador apropiado para diagnosticar sitios deficientes en Ca en suelos de al RP y sus valores de referencia podría generarse en soluciones nutritivas, siempre y cuando los suelos no presenten limitaciones físicas para el crecimiento de cultivos y posean óptimas concentraciones de N, P y K.

Los valores de CaExt en suelos molisoles de la RP en la actualidad se desconocen puesto que no es una determinación solicitada en los laboratorios de suelos de la región (Ciarlo et al., 2018). Sin embargo, se considera que CaExt podría ser estimado en los suelos utilizando ecuaciones similares a las funciones de pedotransferencia y, en consecuencia, de conocer valores umbrales de CaExt en los cultivos, podrían identificarse sitios deficientes en Ca. Según Bouma (1989), las funciones de pedotransferencia permiten obtener información necesaria a partir de la información que se posee. La mayor parte de la investigación en funciones de pedotransferencia fue desarrollada en propiedades físicas (McBratney et al., 2002), pero algunos autores han desarrollado con éxito modelos para cuantificar parámetros químicos de suelos como la concentración de P (Cox, 1994), CIC

(Bell y Keulen, 1995; Horn et al., 2005), intercambio Ca/K (Scheinost et al., 1997) y otras propiedades químicas (Genú y Demattê, 2011). Lince Salazar et al. (2015) han generado una ecuación predictiva de CaExt en suelos de Colombia, donde las variables regresoras fueron otros nutrientes en la fracción soluble-disponible y con grados de ajuste R^2 de 0,55. En este sentido, se podrían generar ecuaciones predictivas de CaExt en suelos molisoles de la RP utilizando como variables regresoras a los parámetros conocidos de suelos de la RP.

Los niveles de CaExt en suelo se encuentran regulados por características del suelo y por el equilibrio de los cationes solubles. El Ca en suelo se encuentra en estructuras de minerales primarios (feldespatos, anfiboles), en la materia orgánica, precipitado (carbonatos, fosfatos, sulfatos), y solubilizado en la solución del suelo en forma de ión Ca^{2+} (Vázquez y Pagani, 2015; White y Holland, 2018). El Ca soluble es retenido mediante adsorción en la CIC (CaCIC), cuyos valores dependen del contenido de coloides en suelo como materia orgánica y arcillas (Alconada Magliano et al., 2015; Alconada Magliano y Lanfranco, 2020). La concentración de CaCIC y CaExt se encuentra en un equilibrio dinámico, permitiendo el desplazamiento de iones en ambos sentidos (Navarro Blaya y Navarro García, 2003; Bolt et al., 2013). El equilibrio entre ambas concentraciones es complejo y se encuentra gobernado por interacciones entre variables edáficas, biológicas y climáticas particulares de cada sitio (Snakin et al., 2001). En lo que respecta a las variables edáficas, el equilibrio de las concentraciones de CaExt y CaCIC está determinado por características de los iones, de los coloides y de interacciones que puedan surgir entre ellos; ya sea catión-coloide y/o catión-catión (Navarro Blaya y Navarro García, 2003). Las principales características de los iones que intervienen en el equilibrio son las concentraciones, la valencia y los radios hidratados; mientras que las principales características de los coloides que afectan el equilibrio son la cantidad/densidad de cargas, la superficie específica y los tipos de coloides (Bolt et al., 2013; Vázquez y Pagani, 2015). Bohn et al. (1993) definió series liotrópicas donde manifiesta un orden de preferencia de adsorción entre los diferentes cationes y el Ca aparece como el catión con mayor grado de atracción a los coloides respecto al Mg y al K. Aun así, en ocasiones puede encontrarse diferentes preferencias de adsorción catión-coloides a causa de propiedades de forma o estéricas (Fassbender y Bornemisza, 1987). Las características que definen el equilibrio también determinan la capacidad buffer o amortiguadora que tiene el suelo para mantener constante la CaExt cuando se reducen por absorción o lixiviación (Irurtia et al., 2004; Vázquez y Pagani, 2015; Alconada Magliano y Lanfranco, 2020). En este sentido, los niveles de CaExt en el suelo y, en consecuencia, la disponibilidad de Ca para las plantas

puede ser variable según cada sistema edáfico, pero podrían estar condicionadas por los mismos parámetros. Los análisis solicitados en laboratorios de suelos de la RP son principalmente pH, carbono oxidable (CO), nitrógeno total (Nt), fósforo Bray Kurtz (Pbk), conductividad eléctrica (CE), CIC, CaCIC, MgCIC, KCIC, sodio soluble-intercambiable (NaCIC) y textura; y según lo expuesto podrían estar fuertemente relacionados con las variables que gobiernan la disponibilidad de CaExt en suelos (Ciarlo et al., 2018; White y Holland, 2018). Siendo que en la actualidad se desconocen los valores de CaExt en suelos molisoles de la RP y dado que los parámetros del suelo que gobiernan CaExt coincidiría con los parámetros conocidos y determinados rutinariamente en laboratorios de suelos de la RP, podría generarse una ecuación predictiva de CaExt a partir de las determinaciones realizadas rutinariamente en laboratorios de suelos de la RP. Conociendo los valores de Ca en SCR óptimo para los diferentes cultivos y estimando los valores de CaExt a partir de ecuaciones predictivas, se podrá identificar suelos de la RP que se encuentren con bajos contenidos de Ca para la producción de los cultivos.

2.5. PRODUCTOS UTILIZADOS PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS

Los sitios suelos deficientes en Ca y/o acidificados de la RP podrían generar incrementos en la productividad de los cultivos con el uso de productos cálcicos. Los principales productos cálcicos conocidos podrían dividirse en fertilizantes o correctores. Los fertilizantes tienen como principal objetivo incrementar los niveles de CaExt en suelo, aumentando la disponibilidad de Ca para las plantas, mientras que lo correctores tienen como principal objetivo incrementar el pH del suelo, mejorando las condiciones fisicoquímicas del suelo (Bachmeier et al., 2013; Vázquez y Millán, 2017). El uso de estos productos estará definido según sea la principal limitante para la producción de cultivos (Vázquez y Pagani, 2015).

El uso y estudio de productos cálcicos en suelos de la RP es escaso, puesto que los suelos tradicionalmente se encontraban bien dotados de Ca y con valores de pH cercanos a la neutralidad (Imbellone et al., 2010; CIAFA, 2023). Los correctores se utilizan principalmente en zonas tropicales en donde la acidez de los suelos es pronunciada y se manifiestan toxicidades por Al, Fe y Mn (Zapata Hernandez, 2004). Su denominación se debe a que en sus orígenes se aplicaba cal viva o cal apagada al suelo (óxido e hidróxido de calcio, respectivamente). En la actualidad se utilizan productos como la caliza/calcita/conchilla o dolomita que tienen carbonato de calcio ($CaCO_3$) y/o carbonato de magnesio ($MgCO_3$) en su composición (Vázquez y Millán, 2017). Los carbonatos se combinan con los protones del suelo formando agua y Ca y/o Mg, incrementando el pH, la

CIC y la concentración de Ca y/o Mg soluble (Vázquez, 2007; Millán et al., 2010). La baja solubilidad de las sales carbonatadas origina la necesidad de aplicarlos en forma pulverulenta (tamaño de micrones), en dosis mayores a 1000 kg ha^{-1}, en forma anticipada (meses antes de la siembra) y, preferentemente, con incorporación al suelo para promover su disolución y reacción (Vázquez y Pagani, 2015). Estas características generan deriva de producto ante la presencia de viento durante la aplicación y reduce la eficiencia del producto en planteos de siembra directa donde no es posible incorporarlos al suelo (Vázquez y Millán, 2017). Paralelamente, la eficiencia del producto depende del poder buffer del suelo, gobernado principalmente por la cantidad y tipos de coloides (Bennardi et al., 2015). En este sentido, Presutti et al. (2016) han cartografiado las dosis teóricas $CaCO_3$ necesarias para aumentar 0,5 puntos de pH de suelos de la provincia de Buenos Aires considerando su capacidad buffer y encontraron que se necesitan entre 1300 y 4000 kg $CaCO_3$ ha^{-1}. Paralelamente, el uso de estos productos puede acarrear otras problemáticas para el crecimiento de los cultivos. Se ha reportado que el uso de dosis mayores a 2000 kg $CaCO_3$ ha^{-1} puede aumentar la resistencia a la penetración de los suelos y, en consecuencia, reducir la producción de MS (Millán et al., 2010). Asimismo, Leon Perez (2012) y Vázquez et al. (2010) mencionan que el agregado de correctores puede reducir la disponibilidad de P por inmovilización temporaria. El uso de correctores cálcicos en suelos de la RP se ha realizado principalmente en especies leguminosas y han demostrado resultados variables. Quiñonez et al. (2003) encontraron incrementos en MS de alfalfa agregando 2500 kg ha^{-1} de dolomita en suelos de Santa Fe, Vázquez et al. (2010) encontraron incrementos en MS en diferentes cortes de alfalfa ante el agregado de dosis entre 1000 a 2000 kg ha^{-1} en suelos de Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe; Vázquez et al. (2012) encontraron respuestas variadas en soja ante el agregado de diferentes correctores (caliza, dolomita) y dosis (0 a 2000 kg ha^{-1}) en suelos de la provincia de Buenos Aires y Santa Fe; Girón et al. (2016) encontraron respuestas positivas en soja ante el agregado de 1000 kg ha^{-1} de calcita y dolomita en suelos de Villegas y, más recientemente, Machetti (2021) encontraron respuesta en soja en ante el agregado de 1000 a 4000 kg ha^{-1} de dolomita con yeso en un suelo de Magdalena, mientras que no encontraron respuesta ante el mismo tratamiento en un suelo de La Plata. La variabilidad en los resultados demuestra que la aplicación de correctores básicos en suelos de la RP es una práctica compleja donde intervienen características del producto, del suelo, del clima, de la tecnología y del cultivo (Vázquez, 2007; Machetti, 2021). En este marco, será necesario estudiar el efecto de los distintos correctores sobre los suelos para generar información que permita recomendar el uso de estos productos para lograr incrementar la producción de cultivos, sin comprometer la

sustentabilidad de los sistemas.

El uso de fertilizantes cálcicos en la RP, al igual que los correctores, también es muy escaso pese a que existen evidencias de respuesta en cultivos de leguminosas (CIAFA, 2023; Marschner, 2023). Fontanetto et al. (2011), Gambaudo et al. (2007), Vivas y Fontanetto (2003) encontraron incrementos en rendimiento de soja hasta 100 kg Ca ha^{-1} en suelos de Santa Fe, mientras que Girón et al. (2016) no encontraron respuesta en el rendimiento de soja ante la aplicación 50 kg Ca ha^{-1} en suelos de Villegas. Aun así, el conocimiento incipiente acerca de la reducción de bases como Ca en suelos de zonas templadas, implica que el tratamiento de esta problemática vía fertilización sea establecido sobre bases poco científicas. En la actualidad no existen curvas calibradas de respuesta de cultivos ante el agregado de diferentes dosis de fertilizantes según la disponibilidad inicial de Ca (Zubillaga y Ciarlo, 2015). Considerando que el objetivo de aplicar fertilizantes cálcicos es incrementar los valores de CaExt, podrían utilizarse las isotermas de adsorción y la incubación de pastas de saturación para definir las dosis necesarias de fertilizante que permitan relacionar los niveles de CaExt alcanzados según la dosis de fertilizantes y relacionarlos con la productividad de los cultivos. La incubación de pastas de saturación consiste en el armado de pastas de suelos con relación suelo:agua de aproximadamente 2:1 con diferentes dosis de fertilizante, y la posterior cuantificación del CaExt en el equilibrio edáfico (IRAM-SAGyP, 2021a). Esta metodología toma relevancia pues la relación suelo:agua simula lo sucedido en situaciones de campo. Las isotermas de adsorción consisten en el agregado de soluciones con diferentes concentraciones de nutrientes (Co) en una relación suelo:solución de 1:10 y posterior cuantificación de la concentración de nutriente en el sobrenadante (Ci) una vez alcanzado el equilibrio (Beckett, 1964). La isoterma de adsorción por definición es una relación que describe el fenómeno que rige la movilidad de una sustancia de un medio acuoso poroso, incluyendo retención y liberación, hacia una fase sólida a temperatura y pH constante (Limousin et al., 2007). Esta metodología ha sido utilizada para evaluar la dinámica de micronutrientes y macronutrientes como K y P en diferentes sistemas edáficos (Beckett, 1964; Bedrossian y Singh, 2004; Silva Rossi et al., 2013; Onana et al., 2016). Algunos autores mencionan que es un método preciso para determinar dosis de fertilización para un crecimiento óptimo de cultivos (Kenyanya, 2015). Las isotermas de Langmuir, Freundlich, Tempkin y Van Huay son algunas alternativas. La isoterma de Freundlich se reconoce por explicar de una manera acertada el comportamiento de nutrientes en sitios reales por asumir ilimitados sitios de adsorción (Hannan, 2008; Kassa et al., 2019). Según McBride (2000), las isotermas se pueden clasificar en diferentes tipos según el grado de afinidad ión/molécula. El tipo de

isoterma que se ajusta al suelo, así como la magnitud de los parámetros que la componen, permiten conocer la dinámica de los nutrientes en sus diferentes formas y su relación con otras propiedades del suelo (Shaviv et al., 1985; McBride, 2000; Samadi, 2006; Farheen et al., 2018). Los principales procesos que pueden desprenderse del análisis de isotermas son la adsorción-desorción, la precipitación, la fijación y la generación de clústeres, dependiendo del ión que se estudie (McBride, 2000). Los procesos mencionados dependen del tipo de nutriente, de su concentración en suelo y de la interacción que pueda surgir con otros elementos y los coloides (McBride, 2000; Pannu et al., 2003; Kassa et al., 2019). Las interacciones de los cationes en suelo son procesos complejos que dependen fuertemente de cada sistema edáfico (Foo y Hameed, 2010). El estudio de isotermas de adsorción en Ca es muy escaso, incluso en suelos tropicales que poseen bajas concentraciones de este elemento. Marcano-Martinez y McBride (1989) han evaluado la adsorción de Ca con Ci hasta 6 meq l^{-1} de Ca en solución de equilibrio sobre suelos oxisoles de aptitud agrícola en Brasil y evidenciaron una relación curvilínea que se ajustaba con elevados grados de ajuste a la isoterma de Freundlich y a ecuaciones potenciales (R^2>0,99). Asimismo, estos autores encontraron que el equilibrio con Ca no implicó cambios en el pH, sugiriendo que el Ca agregado fue adsorbido en sitios previamente ocupados por el K y de manera rápida, pues el equilibrio se logró solamente 5 minutos después del agitado. Los autores concluyen que el uso de isotermas de adsorción en Ca puede ser una herramienta valiosa para entender la dinámica de este nutriente en los suelos. En base a lo expuesto, las isotermas de adsorción y la incubación de pastas de saturación de suelos podrían ser herramientas valiosas para definir dosis ajustadas de fertilizantes cálcicos en los suelos de la RP.

Los estudios acerca del efecto de las diferentes concentraciones de Ca en SCR sobre la productividad de MS y exportación de bases en cultivos forrajeros de interés en la RP, la generación de indicadores diagnósticos para identificar suelos deficientes en Ca en la RP y la elaboración metodologías calibradas para el estudio y el uso de productos cálcicos en suelos de la RP, permitirá colaborar con el entendimiento de la situación actual de los suelos de la RP respecto a la disponibilidad de cationes básicos y elaborar estrategias que permitan incrementar la producción de MS en los cultivos, principal objetivo buscado en la incorporación de nutrientes al suelo, sin comprometer la sustentabilidad de los sistemas (Bachmeier et al., 2013; Sarandón y Flores, 2014; Abbona, 2017).

Capítulo 3

-

Calcio en solución en contacto con las raíces.

Efectos en soja forrajera y raigrás anual

La información de este Capítulo ha sido publicada en:

Ferro, Daniel A.; Lozano, Luis A.; Bartoli, Carlos G.; Fanello, Diego D.; Millán, Guillermo J. y C. Germán Soracco. 2020. Disponibilidad y relación de calcio y magnesio. Efecto sobre exportación y concentración en raigrás y soja. Publicación: Revista de la Facultad de Agronomía. Volumen: 119, Número: 2, Páginas: 1-10. ISSN (impresa): 0041-8676. ISSN (online): 1669-9513. Referato: SI.

3.1. SINAPSIS

En el Capítulo 2 se presentaron estudios que reportaron incrementos en la productividad de materia seca (MS) en cultivos con el uso de fertilizantes cálcicos sobre suelos de la Región Pampeana (RP). Estos resultados pueden deberse a la disminución del contenido de calcio (Ca) en suelo y/o al incremento en los requerimientos de Ca de los cultivos actuales. En relación con lo segundo, los avances en biotecnología y mejoramiento genético han incrementado los potenciales de rendimiento de los cultivos y, en consecuencia, sus requerimientos nutricionales. La demanda de nutrientes se podría estudiar mediante hidroponia puesto que permite controlar independientemente la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, según su concentración en la solución nutritiva. Los estudios en hidroponia relacionados con la nutrición cálcica de cultivos se han realizado principalmente en la segunda mitad del siglo XX y, en consecuencia, podrían estar desactualizados. Este capítulo pretende cuantificar el efecto de diferentes concentraciones de Ca en solución en contacto con las raíces de soja forrajera y raigrás anual ante diferentes concentraciones de Ca en solución nutritiva. Esta información será relevante para conocer el efecto de las diferentes concentraciones de Ca en la solución en contacto con las raíces de los cultivares actuales de soja y raigrás con fines forrajeros y, en base a ello, diagnosticar suelos que permitan incrementar la producción de MS. Asimismo, estudiando la exportación de los cationes básicos, permitirá cuantificar e identificar los parámetros que definen los niveles de extracción de nutrientes básicos generados por los cultivos, una de las causas principales del desabastecimiento de nutrientes básicos en los suelos de la RP.

3.2. INTRODUCCIÓN ESPECÍFICA

Los suelos de la RP han reducido su concentración en bases por la extracción sin reposición de nutrientes básicos como Ca y Mg, conllevando en algunos casos a la acidificación de suelos (Sainz Rozas et al., 2019; Diovisalvi et al., 2021). Según algunos autores, las producciones ganaderas de carne y leche que utilizan cultivos forrajeros para consumo animal generan una elevada extracción de nutrientes básicos debido a que cosechan plantas enteras durante varios momentos en el año, más aún si se utilizan para conservación de forraje en sistemas estabulados o a corral (Bender et al., 2015; Abbona, 2017). Los cultivos más utilizados en la producción ganadera en Argentina son los forrajes a base de gramíneas o leguminosas (Blanco, 2014; LART, 2023). Los cultivos de gramíneas se incorporan principalmente para aumentar la disponibilidad de MS y las leguminosas para aportar alimentos de mejor calidad (Agnusdei et al., 2001; Echenique et al., 2008). Dentro de las gramíneas, se puede mencionar al raigrás anual (*Lolium multiflorum* L.) que es la segunda gramínea forrajera más utilizada como verdeo de invierno, permitiendo varios cortes en el año (Fernandez Grecco, 2000; Scheneiter, 2014). Dentro de leguminosas, se puede mencionar a la soja forrajera, que según estudios del INTA Rafaela, puede ser utilizada en pastoreo directo y es valorada por el bajo costo de producción y alta calidad proteica (Romero, 2005). Interesantemente, el cultivo de soja se introdujo originalmente a la agricultura estadounidense como cultivo forrajero (Morse, 1950). Siendo que el uso de fertilizantes cálcicos en la RP es escaso, la implantación de cultivos forrajeros podría incrementar la extracción de bases, agravando la deficiencia de nutrientes como Ca en suelos de la RP, y en mayor medida si se utilizan para la confección de silos o henos (Bender et al., 2015; CIAFA, 2023).

La productividad de MS y la exportación de Ca (ECaB) y Mg (EMgB) por los cultivos forrajeros podría modificarse ante diferentes condiciones de disponibilidad de Ca en la SCR (Marschner, 2023). En relación con la producción de MS, los estudios reportan que la soja y el raigrás maximizaron la producción de MS a partir de 2 meq l^{-1} de Ca en SCR (Loneragan y Snowball, 1969; Clement et al., 1978; Rayar, 1981; Noble y Sumner, 1988), reportando incrementos en el cultivo de soja hasta 5 meq l^{1} de Ca en SCR (Alva et al., 1991; Burton et al., 2000). Paralelamente, la productividad de MS juntamente con la concentración de Ca (CCaB) y Mg (CMgB) en la biomasa afecta la exportación de Ca (ECaB) y Mg (EMgB), respectivamente (Abbona, 2017). En relación con CCaB, los estudios reportan que en soja se incrementaría hasta 2 meq l^{-1} de Ca en SCR, reportando en algunos casos incrementos de CCaB hasta 5 meq l^{-1} de Ca en SCR en este cultivo (Alva et al., 1991; Burton et al.,

2000); mientras que los estudios en raigrás reportan incrementos de CCaB hasta 150 meq l^{-1} de Ca en SCR (Clement et al., 1978). En relación con CMgB, los estudios reportan que en soja se redujeron a medida que se incrementó el Ca en SCR a partir de 0,3 meq l^{-1} de Ca en SCR (Rayar, 1981), mientras que en raigrás el CMgB también disminuyó ante incrementos de Ca en SCR, estudiando concentraciones entre 8 y 150 meq l^{-1} (Clement et al., 1978). En la actualidad, los efectos de las concentraciones conocidas de Ca en SCR sobre los cultivos podrían estar desactualizados y los umbrales mínimos de suficiencia podrían haberse incrementado, puesto que los avances en biotecnología y mejoramiento genético han aumentado el potencial productivo de los cultivos en los últimos años y, consecuentemente, los requerimientos de nutrientes (Bender et al., 2015; Filippi et al., 2021). En este sentido, es importante ajustar los efectos de diferentes concentraciones de Ca en SCR sobre la MS, ECaB y EMgB de cultivares actuales de cultivos forrajeros.

Siendo que los estudios en hidroponia relacionados con la nutrición cálcica de los cultivos de soja y raigrás son escasos y podrían estar desactualizados debido a la mayor demanda de nutrientes de los cultivares actuales, resulta relevante estudiar y actualizar los efectos de Ca en SCR sobre la producción de MS, ECaB y EMgB de los cultivares de soja forrajera y raigrás anual. Esta información será relevante para identificar suelos de la RP que permitan incrementar la producción de MS de cultivos forrajeros con fertilizantes cálcicos, considerando que los efectos del Ca en SCR podrían ser comparables a los efectos de CaExt en suelo (Loneragan y Snowball, 1969) y que el incremento de MS es el principal objetivo buscando en planteos de fertilización (Álvarez et al., 2013); y para cuantificar los niveles de extracción de los cultivos a modo de definir estrategias de fertilización que mitiguen los balances negativos de nutrientes, una de las principales causas que conllevaron a la reducción de bases en el suelo (Abbona, 2017; Sainz Rozas et al., 2019).

3.3. OBJETIVO ESPECÍFICO

El objetivo de este capítulo fue cuantificar el efecto de concentraciones iguales y mayores a 2 meq l^{-1} de Ca en SCR sobre la productividad y exportación de Ca y Mg en cultivares actuales de soja forrajera y raigrás anual.

3.4. HIPÓTESIS ESPECÍFICA

La hipótesis de este capítulo fue que la mayor productividad de MS, CCaB y ECaB en cultivares actuales de soja forrajera y raigrás anual se alcanzan con concentraciones mayores a 2 meq l^{-1} de Ca en SCR, mientras que CMgB y EMgB se reducen con concentraciones mayores a 2 meq l^{-1} de Ca en SCR.

3.5. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un ensayo en condiciones de invernáculo utilizando cultivares comerciales de soja forrajera de grado VIII (*Glycine max* L. Merr) y raigrás anual (*Lolium multiflorum* L.). El cultivar de soja utilizado fue la variedad Macro Seed LDC 8.5 de la empresa SeedEx® y el cultivar de raigrás utilizado fue la variedad "durango" de la empresa PICASSO®. Se colocaron semillas de los cultivos en speedlings con vermiculita hidratada con agua destilada para su germinación. Las plántulas de soja fueron trasplantadas individualmente a recipientes de 1 l con solución nutritiva (hidroponia) y cuando alcanzaron el desarrollo de la primera hoja trifoliada se colocaron individualmente en un recipiente de 20 l para conformar la unidad experimental. En raigrás se colocaron tres plántulas en recipientes de 1 l de capacidad que conformaron la unidad experimental. En todos los casos se seleccionaron plántulas homogéneas y sanas para el trasplante. La oxigenación de la solución nutritiva se realizó con aireadores comerciales. Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado (DCA) con cinco repeticiones en ambos cultivos. La solución nutritiva utilizada fue formulada en base a Legget y Frere (1971) modificada por Fanello (2016). Las concentraciones de Ca en SCR utilizadas en los tratamientos fueron: T02: 2 meq l^{-1}; T10: 10 meq l^{-1}; T18: 18 meq l^{-1} y T24: 24 meq l^{-1}. Los tratamientos se realizaron modificando la concentración de $Ca(NO_3)_2$ y se igualaron las concentraciones de N entre tratamientos con solución 0,05 N de nitrato de amonio (NH_4NO_3) con pH de 5,3. El pH de las soluciones nutritivas se midió periódicamente y se mantuvo en el rango de 5,0 a 6,5. El volumen de la solución fue repuesto diariamente con solución nutritiva de acuerdo al tratamiento y se realizó un cambio total de la solución cada 21 días. La cosecha del material vegetal se realizó a los 100 días en soja y en raigrás se realizaron tres cortes cada 21 días después del trasplante.

Se evaluó la producción de MS secada en estufa a 60°C con circulación forzada de aire hasta peso constante y se midió la CCaB y CMgB mediante digestión ácida y posterior titulación con EDTA (Kalra, 1998). El análisis de CCaB y CMgB se realizó luego del lavado del material con agua destilada, utilizando la anteúltima hoja expandida en soja y hojas representativas de cada tratamiento en raigrás. Se evaluaron los efectos de los tratamientos entre los cultivos (soja vs raigrás) y entre los diferentes cortes de raigrás.

Evaluación entre cultivos (soja y raigrás)

Se evaluó el efecto de los tratamientos y los cultivos sobre:

- MS: se comparó la MS registrada en soja en cada tratamiento versus la sumatoria de la MS en la totalidad de los cortes de raigrás para cada tratamiento
- CCaB y CMgB: se comparó CCaB y CMgB en soja en cada tratamiento versus el promedio ponderado de CCaB y CMgB por corte de raigrás para cada tratamiento, respectivamente
- ECaB y EMgB: se comparó el producto entre la MS y CCaB y CMgB en cada cultivo según tratamiento

Evaluación entre cortes de raigrás

Se evaluó el efecto de los tratamientos y los cortes de raigrás sobre:

- MS: se comparó la MS de los tratamientos en cada corte de raigrás
- CCaB y CMgB: se comparó CCaB y CMgB de los tratamientos en cada corte de raigrás
- ECaB y EMgB: se comparó el producto entre la MS y ECaB y EMgB de los tratamientos en cada corte de raigrás, respectivamente

Los resultados fueron evaluados estadísticamente por medio de análisis paramétrico de la varianza (ANOVA), con previa comprobación de cumplimiento de los supuestos básicos (homocedasticidad de varianzas, normalidad de residuos). Posteriormente, se realizó una comparación múltiple de medias mediante el test de Tukey entre las interacciones o factores de cada variable que mostraron diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$). Se utilizó el software estadístico RStudio® (R Core Team, 2023) y el software Excel® del paquete de Microsoft Office 365 para la confección de los gráficos (Microsoft, 2024).

3.6. RESULTADOS

3.6.1. Evaluación entre cultivos (soja y raigrás)

La totalidad de las variables analizadas mostraron interacción entre los tratamientos y cultivos (Tabla 3-1). En consecuencia, el test de Tukey se realizó para la interacción tratamiento*cultivo en todas las variables.

*Tabla 3-1. Estadísticos ANOVA del primer análisis de materia seca (MS), concentración de calcio en biomasa (CCaB), concentración de magnesio en biomasa (CMgB), exportación de calcio (ECaB) y exportación de magnesio (EMgB) respecto a la interacción tratamiento*cultivo del ensayo en hidroponia.*

Variables	Tratamiento*Cultivo	
	F	p
MS	10,24	<0,01
CCaB	12,62	<0,01
CMgB	33,27	<0,01
ECaB	6,10	<0,01
EMgB	4,71	<0,01

La MS de T02*soja fue menor respecto a la totalidad de las otras interacciones en el orden del 50% (Figura 3-1). En soja se observó un incremento de MS de T02 hasta T10 y en raigrás la MS fue similar en todos los tratamientos.

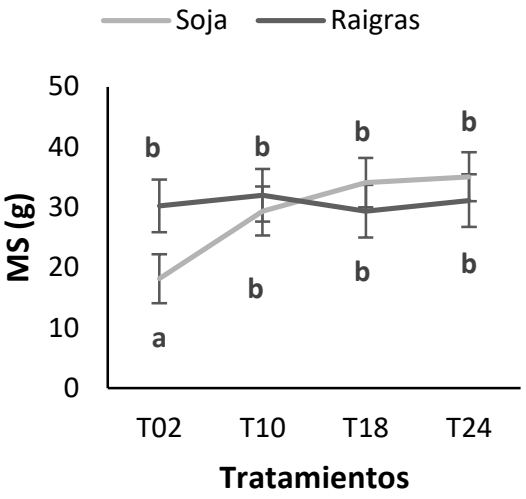


*Figura 3-1. Materia seca (MS) de soja y raigrás por recipiente respecto a los tratamientos. T02: 2 meq l^{-1} de Ca; T10: 10 meq l^{-1} de Ca; T18: 18 meq l^{-1} de Ca; T24: 24 meq l^{-1} de Ca. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas para la interacción tratamiento*cultivo (p<0,05).*

La CCaB alcanzó los mayores valores a partir de T10 en soja y a partir de T18 en raigrás (Figura 3-2). En soja se observó un incremento de CCaB de T02 a T10 en el orden del 120%. En raigrás se observó un incremento de CCaB de T02 a T18 del orden del 120%.

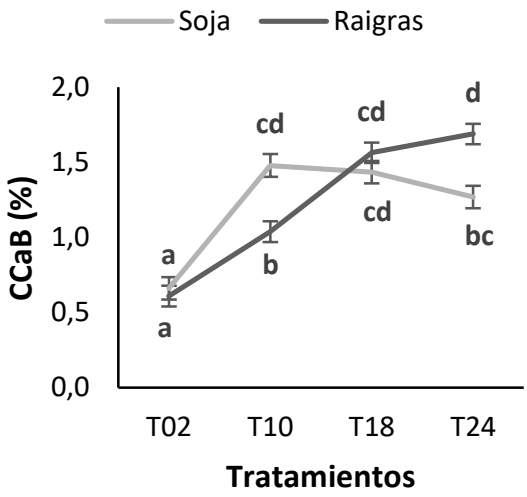


*Figura 3-2. Concentración de calcio en biomasa (CCaB) de soja y raigrás respecto a los tratamientos. T02: 2 meq l^{-1} de Ca; T10: 10 meq l^{-1} de Ca; T18: 18 meq l^{-1} de Ca; T24: 24 meq l^{-1} de Ca. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas para la interacción tratamiento*cultivo (p<0,05).*

La CMgB fue mayor en T02*soja, en T10*raigrás y T18*raigrás respecto a las restantes interacciones en el orden del 40%, con excepción de T24*raigrás respecto a T02*soja (Figura 3-3). La CMgB en soja fue mayor en T02 y en raigrás fue mayor en T10 y T18. En raigrás T02 y T24 generaron valores similares de CMgB.

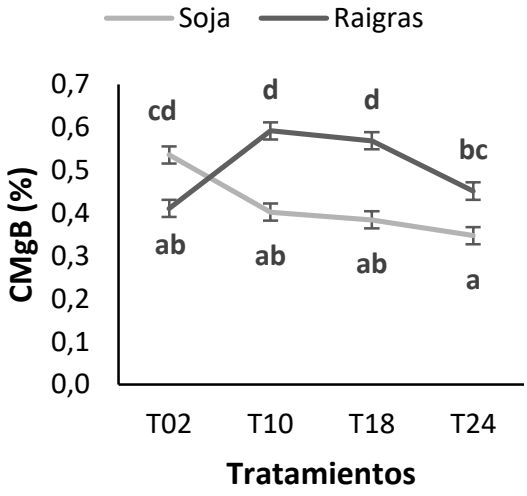


*Figura 3-3. Concentración de magnesio en biomasa (CMgB) de soja y raigrás respecto a los tratamientos. T02: 2 meq l^{-1} de Ca; T10: 10 meq l^{-1} de Ca; T18: 18 meq l^{-1} de Ca; T24: 24 meq l^{-1} de Ca. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas para la interacción tratamiento*cultivo (p<0,05).*

Los valores de ECaB se incrementó en ambos cultivos ante aumentos de Ca en SCR (Figura 3-4). La ECaB fue mayor a partir de T10 en soja y a partir de T18 en raigrás, incrementándose alrededor del 100% respecto a T02. La ECaB en soja fue menor en T02 y en raigrás fue menor en T02 y T10. La ECaB en soja fue mayor que en raigrás solamente con 10 meq l^{-1} de Ca en SCR.

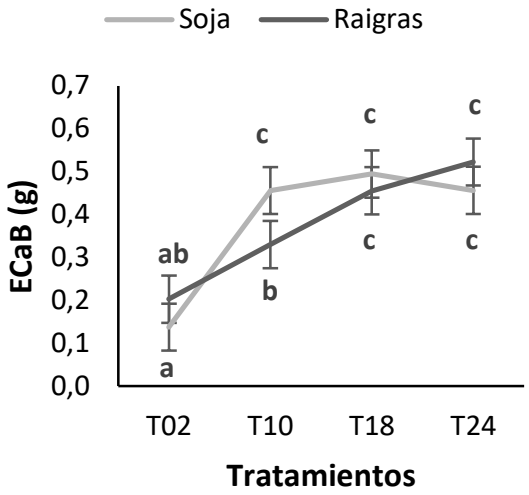


*Figura 3-4. Exportación de Ca (ECaB) en soja y raigrás por recipiente respecto a los tratamientos. T02: 2 meq l^{-1} de Ca; T10: 10 meq l^{-1} de Ca; T18: 18 meq l^{-1} de Ca; T24: 24 meq l^{-1} de Ca. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas para la interacción tratamiento*cultivo (p<0,05).*

La EMgB fue mayor en T10*raigrás y T18*raigrás respecto a T02*raigrás y a la totalidad de los tratamientos en soja (Figura 3-5). La EMgB en soja fue mayor a partir T10, en el orden del 25%, mientras que en raigrás fue mayor en T10 y T18 respecto a T02, en el orden del 50%. En raigrás T02 y T24 no mostraron diferencias en EMgB.

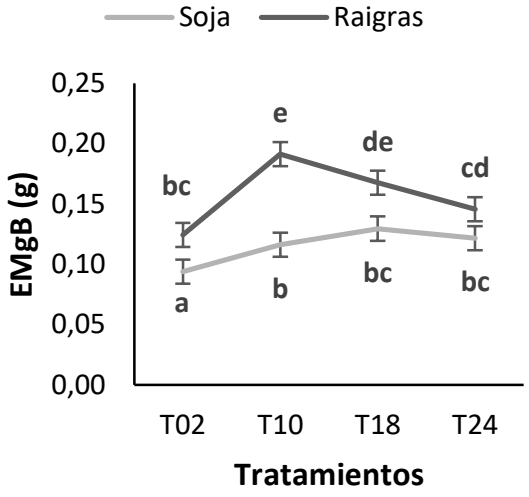


*Figura 3-5. Exportación de Mg (EMgB) en soja y raigrás por recipiente respecto a los tratamientos. T02: 2 meq l^{-1} de Ca; T10: 10 meq l^{-1} de Ca; T18: 18 meq l^{-1} de Ca; T24: 24 meq l^{-1} de Ca. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas para la interacción tratamiento*cultivo (p<0,05).*

3.6.2. Evaluación entre cortes de raigrás

Las variables analizadas arrojaron interacciones entre tratamientos y cortes de raigrás, con excepción de MS que mostró diferencias entre cortes, sin efecto de los tratamientos en este parámetro (Tabla 3-2). En consecuencia, el test de Tukey se realizó para la interacción tratamiento*corte en todas las variables a excepción de la MS que se realizó solamente entre los cortes.

*Tabla 3-2. Estadísticos ANOVA del segundo análisis de materia seca (MS), concentración de calcio en biomasa (CCaB), concentración de magnesio en biomasa (CMgB), exportación de calcio (ECaB) y exportación de magnesio (EMgB) respecto a la interacción tratamiento*corte*

Variables	Tratamiento*Corte		Tratamiento		Corte	
	F	p	F	p	F	p
MS	1,21	0,32	2,05	0,12	4,05	<0,05
CCaB	14,87	<0,01	---	---	---	---
CMgB	16,76	<0,01	---	---	---	---
ECaB	2,58	<0,05	---	---	---	---
EMgB	12,40	<0,01	---	---	---	---

La MS en el corte 2 y corte 3 de raigrás fue mayor respecto al corte 1, incrementándose en el orden del 10% (Figura 3-6). El corte 2 y el corte 3 no mostraron diferencias en la producción de MS entre ellos.

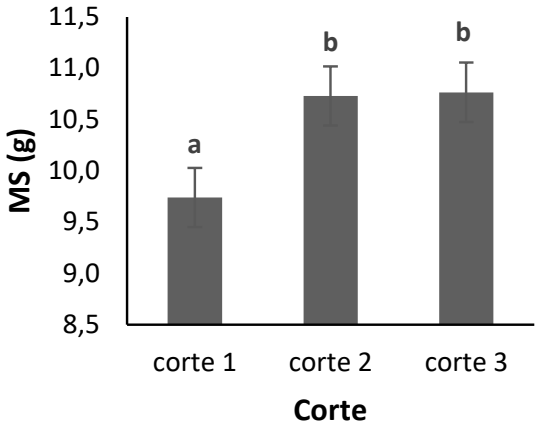


Figura 3-6. Materia seca (MS) de raigrás según corte. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre cortes (p<0,05).

La CCaB fue mayor a partir del T18 respecto a T02 en la totalidad de los cortes (Figura 3-7). El tratamiento T10 generó mayores valores de CCaB en el corte 2 y corte 3 respecto a T02, mientras que en el corte 1 no se evidenciaron diferencias significativas entre estos tratamientos. En términos generales, el corte 2 y el corte 3 produjeron mayores valores de CCaB que el corte 1.

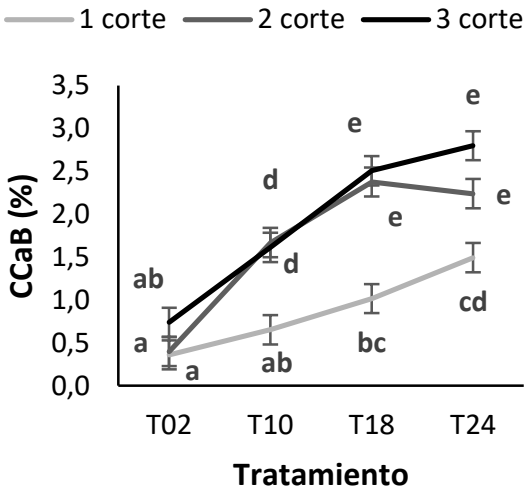


*Figura 3-7. Concentración de calcio en biomasa (CCaB) de raigrás según tratamiento y corte. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en la interacción tratamiento*corte (p<0,05).*

La CMgB tuvo un patrón diferencial entre los cortes (Figura 3-8). La CMgB fue mayor en T24 en el corte 1, en T10 y T18 en el corte 2 y en T02 en el corte 3.

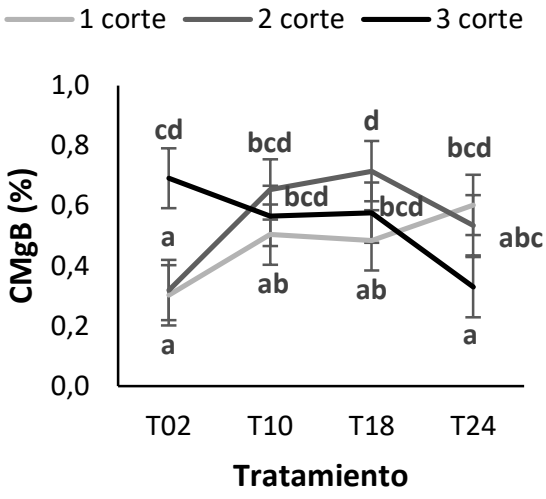


*Figura 3-8. Concentración de calcio en biomasa (CMgB) de raigrás según tratamiento y corte. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en la interacción tratamiento*corte (p<0,05).*

La ECaB fue mayor a partir del T18 respecto a T02 en la totalidad de los cortes (Figura 3-9). Adicionalmente, la ECaB fue mayor en T10 del corte 2 y corte 3 respecto a T02 de los mismos cortes, mientras que en el corte 1 no se evidenciaron diferencias significativas entre estos tratamientos. En términos generales, la ECaB se incrementó a medida que avanzaron los cortes. Este patrón de comportamiento fue muy similar al encontrado en CCaB.

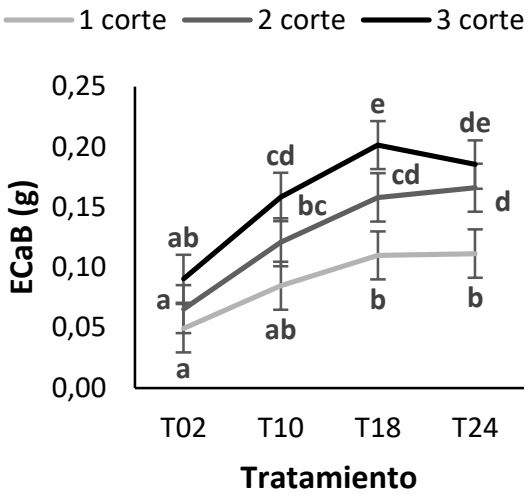


*Figura 3-9. Exportación de calcio en biomasa (ECaB) de raigrás según tratamiento y corte. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en la interacción tratamiento*corte (p<0,05).*

La EMgB tuvo un patrón diferencial entre los cortes (Figura 3-10). En el corte 1 no hubo diferencias entre los tratamientos, en el corte 2 se alcanzaron los mayores valores a partir de T10 y en corte 3 disminuyó en T24 respecto a T02. Este patrón de comportamiento fue similar al encontrado en CMgB.

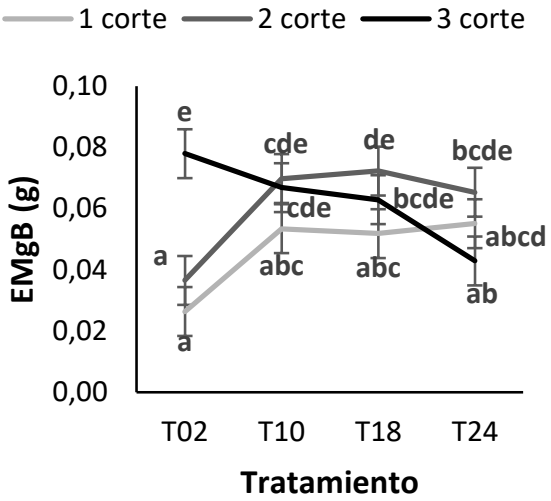


*Figura 3-10. Exportación de magnesio en biomasa (EMgB) de raigrás según tratamiento y corte. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en la interacción tratamiento*corte (p<0,05).*

3.7. DISCUSIÓN

El objetivo de este capítulo fue cuantificar el efecto de concentraciones iguales y mayores a 2 meq l^{-1} de Ca en SCR sobre la productividad y exportación de Ca y Mg en cultivares actuales de soja forrajera y raigrás anual. Los principales resultados mostraron que la MS en soja aumentó de 2 a 10 meq l^{-1} de Ca en SCR, mientras que el raigrás no mostró diferencias en la MS ante incrementos de Ca en SCR. Los valores que maximizan la MS en soja son mayores a los reportados por Loneragan y Snowball (1969), Noble y Sumner (1988) y Rayar (1981), aunque algunos autores han encontrado incrementos de MS en soja entre 2 y 5 meq l^{-1} de Ca en SCR, concentraciones no estudiadas en este trabajo (Alva et al., 1991; Burton et al., 2000). El aumento de los umbrales mínimos de Ca en soja para alcanzar la máxima producción de MS podría ser esperable dado el incremento en la demanda de nutrientes de los cultivares actuales a causa del mejoramiento genético y biotecnología (Filippi et al., 2021). Los resultados del presente estudio sugieren que la soja incrementaría la producción de MS en valores de Ca en SCR mayores a 2 meq l^{-1}, con valores umbrales que podrían ser iguales o incluso menores 10 meq l^{-1} de Ca en SCR. La MS en raigrás no mostró incrementos ante concentraciones mayores a 2 meq l^{-1} de Ca en SCR, comportamiento similar a lo reportado por Loneragan y Snowball (1969). El CCaB en soja tuvo un comportamiento similar a la MS, incrementándose entre 2 y 10 meq l^{-1} de Ca en SCR, mientras que CCaB en raigrás se incrementó a medida que aumentó Ca en SCR a pesar de no mostrar diferencias en la producción de MS. Estos resultados están en línea con los reportes de Gigli-Bisceglia et al. (2020), White y Holland (2018) y Loneragan y Snowball (1969) quienes sugieren que la soja requiere una mayor cantidad de Ca que el raigrás para maximizar la producción de MS. En raigrás, el CCaB se incrementó en concentraciones mayores de 2 meq l^{-1} de Ca en SCR, pero hasta valores menores que los reportados por Clement et al. (1978) para el mismo cultivo. Dicha evidencia reportada y los resultados del presente capítulo experimental estarían indicando que el cultivo de raigrás no habría modificado el comportamiento en CCaB respecto a los niveles de Ca en SCR, como podría haber sucedido en soja. El CMgB en soja se comportó de manera inversa a la MS y CCaB en las diferentes concentraciones de Ca en SCR estudiadas. La disminución de CMgB ante incrementos de Ca en SCR fue similar con lo reportado por Rayar (1981), quien encontró una disminución de CMgB en soja con incrementos de Ca en SCR, estudiando concentraciones hasta 2,5 meq l^{-1} de Ca en SCR. El CMgB en raigrás se maximizó entre 10 y 18 meq l^{-1} de Ca en SCR asociado al comportamiento diferencial observado entre los cortes realizados en este cultivo. En relación con la extracción de

bases, la ECaB en soja se maximizó a partir de 10 meq l^{-1} de Ca en SCR y se podría considerar que se incrementó respecto a los cultivares más antiguos (Rayar, 1981; Burton et al., 2000); mientras que el comportamiento de ECaB en raigrás se maximizó a partir de 10 meq l^{-1} de Ca en SCR, cuyo comportamiento podría considerarse similar a los reportes bibliográficos (Clement et al., 1978). La variación de ECaB en soja se modificó debido a la producción de MS como al CCaB; mientras que la variación de ECaB en raigrás se modificó solamente debido al CCaB. La EMgB en soja tuvo el mismo comportamiento que MS, mientras que EMgB en raigrás se comportó igual que CMgB ante las diferentes concentraciones de Ca en SCR. En este sentido, los incrementos de MS con mayores niveles de Ca en SCR respecto a la bibliografía sugieren que también se habría incrementado los niveles de EMgB en el cultivo de soja. En raigrás, a diferencia de la soja, se podría considerar que no se habría modificado este parámetro respecto a los cultivares más antiguos. Estos resultados permitirían valorar el efecto de Ca en SCR sobre la producción de los cultivos y la dinámica de los nutrientes básicos en los sistemas productivos, podrían generar criterios de fertilización que promuevan la sustentabilidad de los suelos, principalmente en aquellos sitios ganaderos que cosechan la planta entera para consumo animal durante varios momentos en el año, ocasionando elevados niveles de extracción de cationes básicos (Sarandón y Flores, 2014; Bender et al., 2015; Sainz Rozas et al., 2019).

El cultivo de soja mostró incremento en la MS con niveles mayores a 2 meq l^{-1} de Ca en SCR sugiriendo una situación inicial de deficiencia cálcica. A pesar de que no se estudiaron concentraciones entre 2 y 10 meq l^{-1}, y considerando que existen reportes de incremento de MS en soja hasta 5 meq l^{-1} de Ca en SCR (Alva et al., 1991; Burton et al., 2000), sería esperable que se haya incrementado los niveles óptimos de Ca en SCR donde el cultivo maximice la producción de MS debido a los mayores requerimientos de los cultivares actuales (Filippi et al., 2021). En este sentido, cabría la posibilidad de que los niveles óptimos de Ca en SCR para soja sean mayores a 5 e iguales o menores a 10 meq l^{-1} de Ca en SCR. El incremento de MS ante una mayor disponibilidad cálcica podría explicarse por una mayor densidad de raíces en los cultivares actuales de soja, conllevando un incremento en el flujo de agua y nutrientes hacia la parte aérea de la planta (Marschner y Richter, 1974; Singh et al., 2014; Kumar et al., 2015). Paralelamente, el incremento de MS de soja por aumentos en el Ca en SCR habría sido posible debido a que no se presentaron limitantes para la producción de este cultivo relacionadas con la disponibilidad de otros nutrientes (N, P, K), el potencial hídrico de la SCR y el pH de la solución (von Liebig, 1840; Taboada y Álvarez, 2008; White y Holland, 2018). En raigrás, la indiferencia en la producción de MS

ante incrementos de Ca en SCR se asociaría con los menores requerimientos de Ca en este cultivo respecto al cultivo de soja, asociado por algunos autores a una menor necesidad de Ca estructural, menor capacidad de intercambio catiónica en las paredes celulares y una menor densidad de ácidos galacturónicos libres en la superficie de las células (White y Holland, 2018; Marschner, 2023). En relación con los cortes de raigrás, la MS solamente fue menor en el corte 1 respecto a los cortes posteriores, sin efecto de los tratamientos y sugiriendo un adecuado abastecimiento de Ca para este cultivo en todos los valores estudiados de Ca en SCR. La menor producción de MS en el 1 corte de raigrás podría explicarse por la curva sigmoidal de crecimiento y desarrollo de los cultivos a lo largo del tiempo (Azcón-Bieto y Talón, 2008; Marschner, 2023). Los resultados podrían deberse a que el sistema radical de raigrás al momento del corte 1 se encontraría mayormente en expansión y desarrollo, mientras que en el corte 2 y corte 3 el sistema radical posiblemente mayor desarrollado habría permitido una mayor tasa fotosintética y, en consecuencia, un incremento en la producción de biomasa. En base a lo expuesto anteriormente, se podría considerar que el cultivo de soja incrementaría la productividad de MS ante incrementos de Ca en SCR si los valores iniciales son menores a 2 meq l^{-1}, mientras que el raigrás no generaría aumentos en la productividad de MS ante el incremento de Ca en SCR.

El CCaB en soja se maximizó a partir de 10 meq l^{-1} de Ca en SCR, siendo valores superiores a los encontrados en la bibliografía (Alva et al., 1991; Burton et al., 2000). Sin embargo, al igual que en MS, solamente se podría afirmar que el CCaB se incrementa en concentraciones mayores a 2 meq l^{-1} de Ca en SCR en soja, puesto que no se estudiaron concentraciones intermedias entre 2 y 10 meq l^{-1} de Ca en SCR. El CCaB en soja se modificó ante incremento de Ca en SCR de manera similar a lo observado en la producción de MS. El incremento conjunto de CCaB y MS de a 2 y 10 meq l^{-1} de Ca en SCR se explicaría por un mayor aumento en el flujo de Ca hacia la parte aérea en comparación al aumento de la fotosíntesis . El incremento de CCaB y MS ante aumentos en Ca en SCR ha sido reportado por varios autores (Noble y Sumner, 1988; Alva et al., 1991; Burton et al., 2000). Este comportamiento se podría explicar por las tasas de absorción diferenciales de agua y Ca en las raíces de las plantas en distintas concentraciones de Ca en SCR (Marschner y Richter, 1974; Kumar et al., 2015), que paradójicamente están reguladas por la concentración de Ca en las células (Barth, 2021). La indiferencia de CCaB y MS en soja a partir de 10 meq l^{-1} de Ca en SCR se explicaría por la regulación en la absorción de Ca por las raíces. Según autores, en concentraciones elevadas de Ca en SCR, las plantas pueden precipitar sales cálcicas en el apoplasto de las células de las raíces, secuestrar Ca en las vacuolas de las células radicales y/o acelerar la deposición de suberina y lignina en

la exodermis de las raíces para reducir su movimiento y entrada al xilema (Baxter et al., 2009; Conn y Gilliham, 2010; White, 2015). Paralelamente, Marschner (2023) reportó que el incremento de Ca en SCR de 0,2 meq l^{-1} a 2 meq l^{-1} generó un incremento en la concentración de Ca en xilema y en el flujo hídrico derivando en mayor Ca hacia la parte aérea, mientras que el aumento de Ca en SCR de 2 a 20 meq l^{-1} incrementó la concentración de Ca en xilema pero redujo el flujo hídrico hacia la parte superior de la planta por la menor disponibilidad de agua (menor potencial osmótico en SCR), derivando en un abastecimiento similar de Ca hacia la parte aérea. En raigrás, el CCaB se incrementó hasta valores menores de Ca en SCR que los mencionados por Clement et al. (1978). Sin embargo, esta comparación carecería de validez puesto que los autores incrementaron el Ca en SCR juntamente con el de N. Según algunos autores, el CCaB se modifica según la concentración de otros iones como N en la SCR (White y Holland, 2018). Por otro lado, el comportamiento de CCaB en el cultivo de raigrás podría considerarse independiente de la MS, puesto que este último parámetro no se modificó ante incrementos de Ca en SCR. El incremento de CCaB entre 2 y 18 meq l^{-1} de Ca en SCR podría explicarse por la mayor absorción de Ca debido a la concentración de este elemento en solución, sugiriendo que el raigrás absorbería una mayor cantidad de Ca que el necesario para el normal funcionamiento de las células ante excesos de Ca en SCR, tal como indicó (He et al., 2012). Paralelamente, sugiere una elevada capacidad del raigrás para regular los niveles de Ca soluble en citosol de las células sin comprometer la productividad de MS (White y Holland, 2018). A partir de 18 meq l^{-1} de Ca en SCR, sin embargo, no se incrementó el CCaB mientras que la MS no modificó, sugiriendo un flujo semejante de Ca hacia la parte aérea de la planta. Este comportamiento fue similar al encontrado en soja a partir de 10 meq l^{-1} de Ca en SCR, y se explicarían por las mismas razones. En comparación entre cultivos, el CCaB en soja se incrementó hasta valores menores de Ca en SCR que en raigrás, coincidente con los reportes encontrados en la bibliografía (Clement et al., 1978; Alva et al., 1991). En este sentido, los resultados sugieren que el incremento de CCaB en soja ocurriría hasta menores valores de Ca en SCR que en raigrás, pero los mayores valores de CCaB en soja podrían generar incrementos en los valores de MS.

El CMgB se comportó de manera diferente entre los cultivos de soja y raigrás ante incrementos en la concentración de Ca en SCR. El CMgB en soja se redujo ante el incremento de Ca en SCR de 2 a 10 meq l^{-1}, similar a lo reportado por algunos autores en este cultivo (Rayar, 1981; Bruns, 2016). Sin embargo, CCaB y CMgB en soja fue similar en concentraciones mayores a 10 meq l^{-1} de Ca en SCR, sugiriendo que la absorción de Mg en este cultivo podría estar condicionada mayormente por CCaB más que por los niveles

de Ca en SCR, coincidiendo con los reportes mencionados por Malavolta et al. (1997) para varios cultivos. Por otro lado, la MS en soja, que se incrementó ante aumentos de CCaB, fue indiferente ante la disminución de CMgB. Este comportamiento sugiere que el CCaB sería más determinante que el CMgB en la producción de MS en soja, sugiriendo que el Ca se encontraría en niveles de deficiencia y el Mg en niveles de suficiencia acorde a la ley del mínimo enunciada por von Liebig (1840). En raigrás, el CMgB en raigrás fue mayor en valores entre 10 y 18 meq l^{-1} de Ca en SCR, aunque podrían considerarse similares al comportamiento de cultivares más antiguos (Clement et al., 1978). Este comportamiento se explicaría por la variabilidad de CMgB en los diferentes cortes estudiados. En el corte 1 se incrementó ante aumentos de Ca en SCR, el corte 2 alcanzó sus mayores valores con concentraciones intermedias de Ca en SCR y en el corte 3 disminuyó ante concentraciones más elevadas de Ca en SCR. Esta dinámica evidencia una sinergia entre CCaB y CMgB ante aumentos de Ca en SCR en los primeros estadios de crecimiento y antagonismos en estadios de crecimiento más avanzados. La sinergia encontrada en el primer corte, al igual que lo observado en el comportamiento de MS en este cultivo, podría explicarse por el desarrollo incipiente del sistema radicular y con los mecanismos diferenciales para la absorción Ca y Mg (Azcón-Bieto y Talón, 2008; Sharma et al., 2017; Marschner, 2023). Por ello, y de haber continuado con en el ensayo, se esperaría encontrar que la reducción de Mg ante incrementos en de Ca en SCR se acentuaría en cortes posteriores de raigrás. En este sentido, se podría considerar que tanto en soja como en raigrás se presentaría el fenómeno de antagonismo en la absorción de Mg ante elevadas concentraciones de Ca en SCR, en coincidencia con los autores que plantean antagonismo entre Ca y Mg (Malavolta et al., 1997; Marschner, 2023). El comportamiento de CMgB ante diferentes concentraciones de Ca en SCR pareciera ser un fenómeno complejo que deberá estudiarse específicamente entre los cultivos y en los distintos estadios fenológicos, puesto que los resultados en este trabajo evidenciaron que podría ser diferente.

La extracción de bases por los cultivos estudiados mostró diferencias entre Ca y Mg y entre soja y raigrás, siendo necesario realizar un análisis particular. La ECaB en soja se maximizó con 10 meq l^{-1} de Ca en SCR, sugiriendo que los cultivares actuales generarían una mayor exportación de este nutriente respecto a los cultivares antiguos (Alva et al., 1991; Burton et al., 2000). Los menores valores de ECaB con 2 meq l^{-1} de Ca en SCR en soja se asociaría a la menor producción de MS y al menor CCaB. En los restantes tratamientos en soja, como en la totalidad de los tratamientos en raigrás, ya sea en su totalidad o en cada corte por individual, el CCaB fue el parámetro que generó variaciones en ECaB, puesto que no hubo cambios en la MS ante las diferencias de Ca en SCR. Estos resultados coinciden

con los autores que plantean que los cultivos de leguminosas utilizados en las producciones agropecuarias son más extractivos en Ca que los cultivos de gramíneas (Bender et al., 2015; Filippi et al., 2021). Sin embargo, se encontró que el raigrás podría generar niveles semejantes de extracción que la soja en bajas y altas concentraciones de Ca en SCR. Estos hallazgos se asociaron a la reducción de MS y CCaB en soja ante bajos valores de Ca en SCR y a los incrementos de CCaB en raigrás ante el aumento de Ca en SCR, llamativamente a pesar de sus menores requerimientos de Ca (White y Holland, 2018; Gigli-Bisceglia et al., 2020). Por otro lado, la EMgB en soja se incrementó de 2 a 10 meq l^{-1} de Ca y luego no se modificó ante aumentos de Ca en SCR, mostrando el mismo comportamiento que la MS. El incremento se podría asociar estimativamente a una mayor densidad de raíces que habría permitido una mayor absorción de Mg, pese a los efectos negativos del mayor Ca en SCR que redujeron el CMgB. En raigrás, por su parte, la EMgB fue mayor en concentraciones intermedias de Ca en SCR, semejante al patrón observado en el CMgB y asociado al patrón diferencial entre los diferentes cortes. Esta realidad, en parte, podría deberse a la duración en la recolección de material de raigrás, coincidente con los momentos de cambio en los patrones de comportamiento del CMgB respecto al Ca en SCR. Se podría asociar que, de haber continuado el análisis de CMgB en este cultivo, en los cortes siguientes se encontrarían patrones de comportamiento semejantes al encontrado en el corte 3, en donde el CMgB disminuye ante el incremento de Ca en SCR. Demostrada la variabilidad de ECaB y EMgB en relación con el nutriente y el cultivo, se deberá continuar estudiando la dinámica y efecto de los nutrientes básicos sobre los cultivos para generar valores certeros de exportación de nutrientes.

Dado que los efectos de Ca en SCR podrían ser comparables a los efectos de CaExt (Loneragan y Snowball, 1969), los resultados encontrados en este capítulo son relevantes para diagnosticar suelos que permitan incrementar la MS en soja ante el uso de fertilizantes cálcicos, como así también colaboran para definir dosis de fertilizantes cálcicos y magnésicos para mitigar el desabastecimiento de los suelos. En este sentido, los suelos de la RP con contenidos iguales o menores a 2 meq l^{-1} de CaExt permitirían incrementar la producción de MS de soja forrajera ante el agregado de fertilizantes cálcico, a diferencia del raigrás anual que no generaría incrementos ante su aplicación. Esta información es importante puesto que el incremento de la producción de MS es el principal objetivo buscado en los planteos de fertilización de cultivos forrajeros en la RP (Álvarez et al., 2013; Bachmeier et al., 2013). Sin embargo, los resultados sugirieron que el incremento de la MS podría generar mayores ECaB y EMgB en soja. En este marco, y puntualizando en los estudios de esta tesis, se recomendaría definir dosis de fertilizante cálcico que incrementen

los valores de MS pero que también logren mitigar la generación de BCaS negativos en los suelos, siendo una de las principales causas del desabastecimiento de bases y acidificación en los suelos de la RP (Vázquez y Millán, 2017; Sainz Rozas et al., 2019). Por ello, teniendo en cuenta BCaS, debería considerarse que el uso de elevadas dosis de fertilizantes cálcicos, que superen los 10 meq l^{-1} de CaExt, podría provocar solamente un incremento de los valores de ECaB en soja, sin aumentar la MS. En este marco, será importante estudiar los niveles de CaExt alcanzados con el uso de fertilizantes para definir dosis ajustadas que permitan ser eficientes en el uso de los fertilizantes (Echeverría y García, 2015). En relación con la dinámica de Mg en soja, los resultados sugirieron que en la actualidad los suelos de la RP se encontrarían bien provistos de este elemento para este cultivo, puesto que la MS en soja aumentó a pesar de que los valores de CMgB disminuyeron. Esta información sugiere que el Ca podría ser el principal nutriente básico que limite la producción de los cultivos, pero aun así podrían generarse situaciones de deficiencia de Mg a futuro por los balances negativos de nutrientes si no se incorporan planteos de fertilización magnésica en los suelos, similar a lo ocurrido con el Ca (Sainz Rozas et al., 2019). En relación con el manejo de raigrás anual, se considera relevante cuantificar los niveles de MS, CCaB y CMgB en los cultivos para alertar acerca de los niveles de ECaB y EMgB. Estos resultados son importantes para generar criterios para definir dosis de fertilizantes básicos con el objetivo de impedir el desabastecimiento de los nutrientes en el suelo. Asimismo, los resultados podrían colaborar con el uso de fertilizantes magnésicos, cuantificando los niveles de extracción tal como hicieron algunos autores en forma general para la provincia de Buenos Aires, para impedir los balances negativos de este nutrientes en suelo (Ferro et al., 2017). La dinámica de cationes básicos en suelos de la RP y el uso de fertilizantes básicos deberá ser estudiado en profundidad para generar estrategias que permitan incrementar la productividad de cultivos, sin generar el empobrecimiento de los suelos, siendo una problemática en la actualidad se encuentra en expansión y se agravará a futuro si no se toman los recaudos pertinentes (Sainz Rozas et al., 2019; Diovisalvi et al., 2021).

3.8. CONCLUSIONES PARCIALES

Los cultivares actuales de soja forrajera incrementan la producción de MS en valores mayores a 2 meq Ca l^{-1} en SCR, pero estos valores no generan incrementos en la producción de MS en raigrás. El CMgB en soja aumenta y en raigrás disminuye ante concentraciones mayores a 2 meq Ca l^{-1} en SCR, sin embargo, en ambos cultivos se incrementa ECaB. En ambos cultivos se incrementa la CCaB y ECaB con valores mayores a 2 meq Ca l^{-1} en SCR.

3.9. CONCLUSIONES RELEVANTES PARA OTROS CAPÍTULOS

Los suelos molisoles de la RP sin limitantes físicas para el crecimiento de cultivos y con valores de Ca soluble menores a 2 meq l^{-1} podrían incrementar la MS de soja forrajera ante el agregado de fertilizante cálcico, aumentando paralelamente la ECaB y EMgB del sistema. El raigrás anual no incrementaría la producción de MS ante el agregado de fertilizante cálcico en suelos molisoles de la RP sin limitantes físicas para el crecimiento de cultivos.

Capítulo 4

-

Estimación de calcio soluble-disponible en suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires

La información de este Capítulo ha sido publicada en:

Ferro, Daniel A.; Andreini, Brian; Lozano, Luis A.; Merani, Victor H.; Bongiorno, Florencia M.; Larrieu, L.; Millán, Guillermo J. y C. Germán Soracco. 2023. Predicción de la concentración de calcio soluble en suelos agrícolas de la provincia de Buenos Aires. Revista de Investigaciones Agronómicas de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario 41(23), e031. ISSN (impresa): 1853-4333. ISSN (online): 2250-8872. Referato: SI.

4.1. SINAPSIS

En el Capítulo 3 se actualizaron los efectos de distintas concentraciones de calcio (Ca) en solución en contacto con las raíces (SCR) sobre la producción de materia seca (MS) de los cultivos de soja y raigrás anual con fines forrajeros. Siendo los efectos del Ca en SCR serían comparables a los efectos de Ca en la fracción soluble-disponible del suelo (CaExt), se esperaría encontrar incrementos en la productividad de MS de la soja forrajera ante el agregado de fertilizantes cálcicos en suelos con valores de CaExt inferiores a 2 meq l^{-1}, mientras que el raigrás anual no incrementaría la producción de MS ante una mayor disponibilidad de Ca en SCR. Sin embargo, los valores de CaExt en suelos de la Región Pampeana (RP) en la actualidad se desconocen, puesto que no es un análisis solicitado en los laboratorios de suelos de la región. A pesar de ello, se considera que los valores de CaExt podrían estar estrechamente relacionados con los parámetros conocidos de los suelos tales como el contenido de materia orgánica, conductividad eléctrica, pH, concentración de cationes en la fracción soluble-intercambiable; y en consecuencia los valores de CaExt podrían ser estimados a partir de ecuaciones de regresión, de forma similar al uso de funciones de pedotransferencia. En este marco, este capítulo pretende estimar la concentración de CaExt en suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires a partir de los análisis de rutina solicitados en laboratorios de suelos de la RP.

4.2. INTRODUCCIÓN ESPECÍFICA

El diagnóstico de la fertilidad cálcica en suelos, tradicionalmente, se ha realizado utilizando indicadores relativos como parámetros de referencia, siendo CaCIC CIC^{-1} uno de los indicadores más utilizado (Vázquez y Millán, 2017). El uso de indicadores relativos podría deberse a que los estudios iniciales en suficiencia cálcica realizados por Graham (1959) estuvieron orientados en la determinación de CaCIC, considerada en su momento la principal fuente de abastecimiento de Ca para las plantas. Sin embargo, Chaganti y Culman (2018) y Kopittke y Menzies (2007) realizaron extensas revisiones bibliográficas y expresaron que no existe suficiente evidencia científica para comprobar que los indicadores relativos son pertinentes para el diagnóstico de la fertilidad cálcica en suelos. Llamativamente, se ha desestimado el uso de CaExt como indicador diagnóstico, siendo la fuente principal desde donde las plantas absorben este elemento desde el suelo, puesto que el Ca se encuentra libre y sin estar retenido por los coloides (Marschner, 2023). En este sentido, el CaExt podría ser utilizado como indicador diagnóstico de suficiencia cálcica, al igual que se ha utilizado en nutrientes como N para generar curvas calibradas de respuesta de cultivos en suelos de la RP (Álvarez et al., 2013; Zubillaga y Ciarlo, 2015).

Los valores de CaExt de suelos molisoles de la RP en la actualidad se desconocen. Sin embargo, el CaExt podría estar estrechamente relacionado con parámetros de suelos analizados en los laboratorios de la región y, en consecuencia, podría utilizarse estas determinaciones para estimar las concentraciones de CaExt de forma similar a las funciones de pedotransferencia (Bouma, 1989). Lince Salazar et al. (2015) han generado funciones de predicción de CaExt en suelos de Colombia utilizando la concentración de otros nutrientes en la fracción soluble-intercambiable del suelo como variables regresoras. Los autores reportaron un grado de ajuste R^2 de 0,55 utilizando una ecuación de regresión lineal. Los grados de ajuste encontrados podrían ser esperables dado a la complejidad en la dinámica del Ca soluble en suelo, influenciada por interacciones particulares entre iones en el suelo, los niveles de adsorción de cationes a los coloides, la precipitación de Ca con otros elementos en suelo, la CIC, el pH, entre otros (Bohn et al., 1993; Sparks, 2003; Melo y Alleoni, 2009). En este sentido, para aumentar la confianza en los modelos predictivos, algunos autores proponen reducir el área de estudio para disminuir la variabilidad de principales parámetros que gobiernan a la variable respuesta (McBratney et al., 2002). Siendo que los suelos molisoles de la RP han evolucionado sobre material loessico, cuya composición mineral es heterogénea (Imbellone et al., 2010), y que la actividad antrópica ha generado reducciones en los niveles de coloides y cationes en suelo (Sainz Rozas et al.,

2019), se podrían generar ecuaciones predictivas de CaExt en suelos de la RP si se lograra seleccionar suelos con características similares, en detrimento del alcance del modelo.

Los principales parámetros de suelos determinados en laboratorios de la RP podrían estar estrechamente relacionados con los niveles de CaExt en suelo, y, en consecuencia, podrían ser utilizados como variables regresoras para generar ecuaciones predictivas de CaExt. Las principales determinaciones analíticas solicitadas en los laboratorios de suelos de la RP son pH, CO, Nt, Pbk, CE, CIC, CaCIC, MgCIC, KCIC, NaCIC y textura (Ciarlo et al., 2018) y podrían estar relacionadas con el CaExt puesto que determinan variables químicas condicionantes de los niveles de cationes en la fracción soluble-disponible del suelo (Vázquez y Pagani, 2015; White y Holland, 2018). Considerando que los valores de CaExt en suelos molisoles de la RP se desconocen, se podría generar una ecuación predictiva de CaExt restringiendo el estudio según la heterogeneidad de los suelos de la RP utilizando como variables regresoras a los valores de los parámetros conocidos de suelos molisoles de la RP. En base a los resultados encontrados en el Capítulo 3 de esta tesis, donde la soja forrajera incrementó la producción de MS ante el aumento de Ca en SCR, y considerando que los efectos de Ca en SCR serían similares a los efectos CaExt (Loneragan y Snowball, 1969), la generación de modelos predictivos de CaExt en suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires permitirá identificar sitios donde se esperaría encontrar incrementos en la MS de soja forrajera ante el agregado de fertilizantes cálcicos.

4.3. OBJETIVO ESPECÍFICO

El objetivo de este capítulo fue estimar la concentración de CaExt de suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires a partir de determinaciones analíticas solicitadas rutinariamente en laboratorios de suelos de la RP.

4.4. HIPÓTESIS ESPECÍFICA

La hipótesis de este capítulo fue que los valores de CaExt de suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires se encuentran estrechamente relacionados a los principales parámetros de suelos determinados rutinariamente en laboratorios de la RP, permitiendo generar ecuaciones predictivas para estimar su concentración.

4.5. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó el muestreo de 24 suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 4-1). Dentro de los molisoles, los suelos fueron representante principalmente de los grandes grupos hapludoles, argiudoles y paleudoles. Los sitios de muestreo fueron seleccionados a partir de características edáficas similares: ubicación en posición de loma, de 0 a 20 cm de profundidad, ausencia de carbonatos de calcio, suelos no salinos y no sódicos, pH menor a 7 y utilizados para producción agropecuaria durante los últimos 20 años con implantación de cultivos. Cada muestra de suelo se obtuvo a partir de una muestra compuesta conformada por 15 submuestra por muestra. Cada muestra de suelo fue secada en estufa mediante circulación forzada a 40 °C, molidas y tamizadas según la determinación a practicar. Se realizaron análisis de suelo por triplicado de calcio soluble-disponible (CaExt): Ca en extracto de pasta de saturación por volumetría de formación de complejos con EDTA (IRAM-SAGyP, 2021a); y de los principales parámetros determinados en suelos de la RP (Ciarlo et al., 2018): pH actual (pH): relación suelo:agua de 1:2,5, determinación potenciométrica (IRAM-SAGyP, 2021b); conductividad eléctrica en extracto de saturación (CE): conductimetría (IRAM-SAGyP, 2021a); carbono oxidable (CO) determinado por metodología Walkley y Black micrométodo (IRAM-SAGyP, 2016); nitrógeno total (Nt) por digestión ácida y destilación Kjeldahl (IRAM-SAGyP, 2018); fósforo extractable (Pbk) por metodología Bray-Kurtz 1 (IRAM-SAGyP, 2020); CIC y cationes intercambiables: método del acetato de amonio 1N pH 7 (tamponado), determinación de CIC por destilación Kjeldahl (SAMLA, 2004), Ca (CaCIC) y Mg (MgCIC) por volumetría de formación de complejos, K (KCIC) y Na (NaCIC) por fotometría de llama (IRAM-SAGyP, 2022) y textura: método de Bouyoucos: determinación de A, L y arc (Bouyoucos, 1962). Adicionalmente, se calculó la suma de bases intercambiables (S): CaCIC + MgCIC + NaCIC + KCIC; la relación S CIC^{-1} y la relación CaCIC CIC^{-1}.

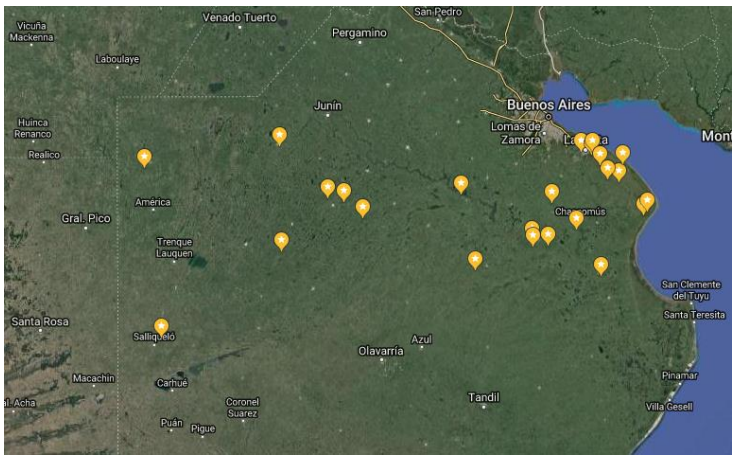


Figura 4-1. Imagen mostrando la ubicación de suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires utilizados para la generación del modelo predictivo. Imagen: Google Maps® (Google, 2024).

Se realizó una regresión lineal múltiple de primer grado mediante el método estadístico de selección de variables paso a paso (*stepwise*), con significancia de parámetros del 95% ($p<0,05$). La variable estimada fue CaExt y las variables regresoras fueron las restantes determinaciones realizadas en los suelos. Luego de comprobar el cumplimiento de los supuestos básicos de la regresión lineal (normalidad de residuos, homocedasticidad, colinealidad), se evaluó la significancia de la regresión mediante el ANOVA ($p<0,05$), la significancia de los parámetros mediante test de t-Student ($p<0,05$) y el grado de ajuste de la regresión a través del valor de R^2. Luego de la selección de variables, se evaluó el grado de ajuste de CaExt respecto a cada una de las variables regresoras retenidas por el modelo ($p<0,05$). Finalmente, se compararon los valores de CaExt estimados por el modelo respecto a los valores de CaExt medidos en laboratorio de 12 suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires que no fueron utilizados para la generación del modelo y seleccionados en base a los requisitos utilizados para la generación del modelo (Figura 4-2). Dentro del orden molisol, los suelos utilizados para validar el modelo pertenecieron a los grandes grupos de hapludoles y argiudoles (USDA, 2014).

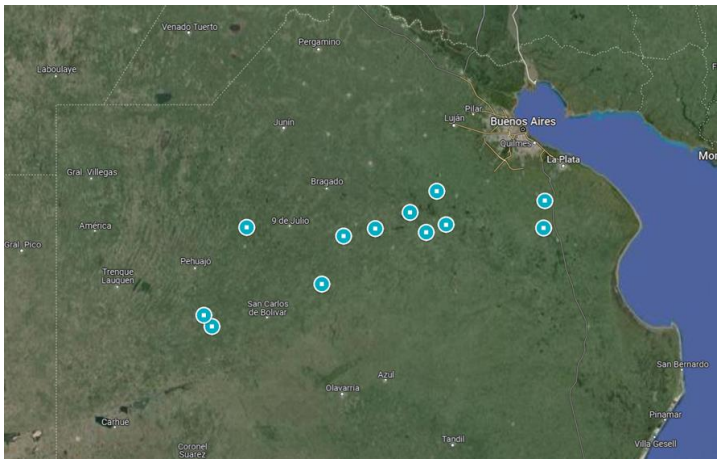


Figura 4-2. Imagen mostrando la ubicación de suelos molisoles (argiudoles y hapludoles) de la provincia de Buenos Aires utilizados para la comprobación del modelo predictivo. Imagen: Google Maps® (Google, 2024).

Se utilizó el software estadístico RStudio® (R Core Team, 2023) y el software Excel® del paquete de Microsoft Office 365 para la confección de los gráficos (Microsoft, 2024).

4.6. RESULTADOS

4.6.1. Determinaciones analíticas de los suelos

Las características de los suelos se muestran en la Tabla 4-1, Tabla 4-2 y Tabla 4-3.

Tabla 4-1. Lugar, Latitud Longitud, Taxonomía, pH, carbono oxidable (CO), nitrógeno total (Nt) y fósforo Bray Kurtz 1 (Pbk) de los suelos utilizados en el Capítulo 4.

N°	Lugar	Latitud Longitud	Taxonomía	pH	CO (g kg^{-1})	Nt	Pbk (mg kg^{-1})
1	Lincoln	S 34º54'03,24" W 61º34'50,51"	Hapludol	6,2	19	1,90	4,6
2	Villegas	S 35º04'47,99" W 63º13'52,31"	Hapludol	6,3	12	1,20	18,3
3	Los Hornos	S 34º59'16.79' W 57º59'45.23"	Paleudol	6,2	19	2,01	1,8
4	Bavio	S 35º06'56,51" W 57º48'51,12"	Paleudol	5,7	28	3,23	36,9
5	Arana	S 35º00'14,04" W 57º53'09,23"	Paleudol	6,1	27	2,72	6,5
6	Arana	S 35º05'44,87" W 57º56'06,36"	Paleudol	5,9	15	1,54	26,5
7	Chascomús	S 35º43'07,31" W 58º03'48,60"	Argiudol	6,1	23	2,17	27,8
8	Castelli	S 36º07'02,27" W 57º43'01,56"	Argiudol	5,6	29	3,00	15,0
9	Belgrano	S 35º49'52,67" W 58º29'37,67"	Hapludol	5,4	18	1,80	6,9
10	Belgrano	S 35º51'00,00" W 58º31'13,44"	Hapludol	5,1	24	2,20	13,1
11	Las Flores	S 36º02'10,32" W 59º04'10,91"	Hapludol	5,3	25	2,50	17,3
12	Saliqueló	S 36º49'54,11" W 62º59'52,07"	Hapludol	6,5	8	0,82	9,0
13	Vieytes	S 35º18'50,03" W 57º32'08,16"	Argiudol	5,9	31	3,31	25,0
14	Vieytes	S 35º17'42,00" W 57º38'28,68"	Argiudol	6,2	27	2,95	34,5
15	Bellocq	S 35º55'32,55" W 61º29'17,78"	Hapludol	6,0	18	1,80	13,0
16	Inchausti	S 35º36'49,55" W 60º32'23,46"	Hapludol	6,1	18	1,75	11,2
17	Belgrano	S 35º52'36,86" W 58º33'44,20"	Hapludol	5,7	32	3,31	7,1
18	9 de Julio	S 35º34'45,44" W 60º46'56,16"	Hapludol	6,2	15	1,42	3,5
19	9 de Julio	S 35º20'04,19" W 60º56'04,92"	Hapludol	6,3	14	1,55	4,2
20	Pipinas	S 35º33'13,64" W 57º14'15,29"	Argiudol	5,9	28	2,59	6,4
21	Pipinas	S 35º34'40,54" W 57º16'56,51"	Argiudol	6,1	33	2,37	7,1
22	Magdalena	S 35º07'51,96" W 57º28'59,87"	Paleudol	6,1	34	3,17	4,1
23	Roque Perez	S 35º22'23,16" W 59º22'20,28"	Hapludol	5,7	19	1,91	4,9
24	Ranchos	S 35º30'18,72" W 58º14'07,80"	Hapludol	6,0	31	3,10	12,6

Tabla 4-2. Conductividad eléctrica (CE), calcio soluble-disponible (CaExt), arena (A), limo (L), arcilla (arc) y textura (Text) de los suelos utilizados en el Capítulo 4.

N°	CE (dS m^{-1})	CaExt (meq l^{-1})	A	L (%)	arc	Tex*
1	0,60	2,20	43,5	33,0	23,4	F
2	0,30	1,60	56,8	24,8	18,4	FA
3	0,40	2,00	21,4	50,6	28,1	Fa
4	0,31	2,00	19,5	53,1	27,5	FaL
5	0,50	1,82	19,0	54,6	26,4	FaL
6	0,30	1,00	14,3	48,0	37,7	FaL
7	0,40	1,20	23,6	50,2	26,2	F
8	0,68	2,40	31,3	62,0	6,7	FL
9	0,24	1,20	29,3	60,0	10,7	FL
10	0,31	1,52	29,3	60,0	10,7	FL
11	0,42	1,60	29,3	60,0	10,7	FL
12	0,35	1,10	76,1	14,6	9,3	FA
13	0,50	1,40	15,7	58,7	25,6	FL
14	0,50	2,00	18,0	52,9	29,1	FaL
15	0,52	1,96	41,3	52,0	6,7	FL
16	0,36	1,50	65,3	24,0	10,7	FA
17	0,46	2,10	39,3	52,0	8,7	FL
18	0,44	2,00	57,3	36,0	6,7	FA
19	0,43	2,24	57,3	34,0	8,7	FA
20	0,45	1,20	17,3	62,0	20,7	FL
21	0,45	1,50	21,3	62,0	16,7	FL
22	0,29	1,60	23,3	66,0	10,7	FL
23	0,24	1,00	53,3	36,0	10,7	FA
24	0,30	1,20	41,3	54,0	4,7	FL

**referencias: F: franco; FA: franco-arenoso; Fa: franco-arcilloso; FaL: franco-arcillo-limoso; FL: franco-limoso*

Tabla 4-3. Capacidad de intercambio catiónica (CIC), calcio soluble-intercambiable (CaCIC); magnesio soluble-intercambiable (MgCIC), potasio soluble-intercambiable (KCIC), sodio soluble-intercambiable (NaCIC), suma de bases intercambiables (S), relación S CIC^{-1}, relación entre calcio soluble-intercambiable y suma de bases intercambiables (CaCIC S^{-1}) y relación entre calcio soluble-intercambiable y capacidad de intercambio catiónica (CaCIC CIC^{-1}) de los suelos utilizados en el Capítulo 4

N°	CIC	CaCIC	MgCIC	KCIC	NaCIC	S	S CIC^{-1}	CaCIC S^{-1}	CaCIC CIC^{-1}
			(cmolc kg^{-1})						
1	20,9	8,6	1,7	1,8	0,1	12,3	0,59	0,70	0,41
2	13,6	5,9	1,0	1,3	0,2	8,4	0,62	0,70	0,43
3	23,3	9,4	1,8	1,7	0,2	13,1	0,56	0,72	0,40
4	26,4	10,6	0,6	1,2	0,3	12,6	0,48	0,84	0,40
5	22,7	10,2	1,4	1,6	0,1	13,4	0,59	0,76	0,45
6	22,3	9,0	1,4	0,8	0,1	11,3	0,51	0,51	0,40
7	22,3	8,6	1,8	1,8	0,2	12,5	0,56	0,69	0,39
8	17,4	10,3	2,0	1,2	0,1	13,6	0,78	0,76	0,59
9	15,0	5,0	2,3	0,9	0,2	8,4	0,56	0,60	0,33
10	18,4	6,8	1,2	1,2	0,2	9,3	0,51	0,73	0,37
11	18,5	9,9	1,3	1,5	0,1	12,8	0,69	0,77	0,54
12	10,0	4,2	1,2	1,7	0,1	7,2	0,72	0,58	0,42
13	25,7	8,3	2,1	1,8	0,4	13,5	0,53	0,61	0,32
14	24,7	8,1	2,4	1,9	0,3	12,9	0,52	0,63	0,33
15	13,6	6,5	2,0	1,6	0,3	10,2	0,75	0,64	0,48
16	13,8	6,9	1,4	1,2	0,2	9,7	0,70	0,71	0,50
17	20,5	10,4	2,5	1,4	0,2	14,5	0,71	0,72	0,51
18	13,7	8,4	1,4	1,1	0,1	11,1	0,80	0,76	0,61
19	13,7	7,3	1,6	1,3	0,1	10,3	0,75	0,71	0,53
20	19,0	9,0	3,5	1,0	0,4	14,4	0,76	0,63	0,47
21	17,1	7,8	3,3	1,1	0,4	14,7	0,86	0,53	0,46
22	23,0	12,2	2,6	1,2	0,2	16,2	0,70	0,75	0,53
23	16,4	8,0	2,0	1,1	0,1	11,2	0,68	0,71	0,49
24	18,1	9,5	2,3	1,6	0,1	13,5	0,75	0,70	0,53

4.6.2. Ecuación predictiva de CaExt

La regresión lineal múltiple utilizada seleccionó a las variables CE y CaCIC S^{-1}, arrojando un R^2 de 0,63 ($p<0,01$) (Ecuación 4-1). Los valores de los parámetros asociados al modelo fueron de 2,418 para CE ($p<0,01$), 2,468 para CaCIC S^{-1} ($p<0,01$) y -1,046 para el término independiente ($p<0,05$). El modelo se ajustó al rango de CE entre 0,24 y 0,68 dS m^{-1} y al rango de CaCIC S^{-1} entre 0,48 y 0,86.

$$\boldsymbol{CaExt\ (meq\ l^{-1}) = 2,418\ CE\ (dS\ m^{-1}) + 2,486\ CaCIC\ S^{-1} - 1,046}$$

$$\boldsymbol{[R^2 = 0,63]}$$

Ecuación 4-1. Función arrojada por el modelo predictivo para calcio soluble-disponible (CaExt) con coeficiente de ajuste (R^2). CE: conductividad Eléctrica; CaCIC: calcio soluble-intercambiable; S: suma de bases intercambiables (S).

El grado de ajuste R^2 de cada variable seleccionada por el modelo respecto a CaExt independientemente fue de 0,44 para CE ($p<0,01$) y 0,25 para CaCIC S^{-1} ($p<0,01$) (Figura 4-3).

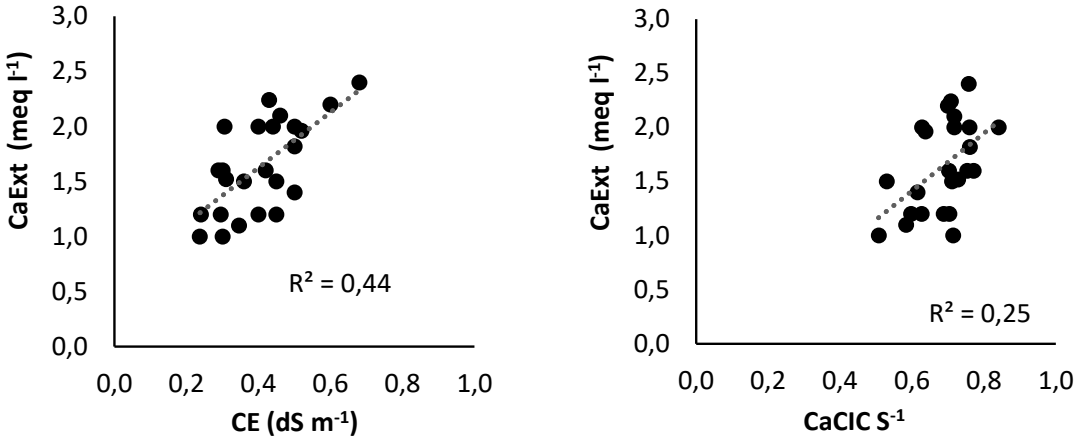


Figura 4-3. Calcio soluble-disponible (CaExt) respecto a variables independientes seleccionadas por el modelo, con su respectiva línea de tendencia y grado de ajuste. Izquierda: calcio soluble-disponible (CaExt) respecto a la conductividad eléctrica (CE). Derecha: calcio soluble-disponible (CaExt) respecto al calcio intercambiable en relación con suma de bases intercambiables (CaCIC S^{-1}).

La comparación entre los valores de CaExt medidos y CaExt estimados generó una ecuación lineal significativa ($p<0,01$) con un valor de ajuste R^2 de 0,75 (Figura 4-4, izquierda). La pendiente de la ecuación fue de 0,86 ($p<0,01$) y la ordenada al origen de 0,17, que no mostró diferencias significativas ($p<0,05$). Considerando la ordenada al origen indistinta de cero y generando una regresión forzando el intercepto de la ecuación a cero, la ecuación arrojó una pendiente de 0,97 ($p<0,01$) y un R^2 de 0,96, pero se observó un mayor error en la estimación de CaExt con concentraciones mayores a aproximadamente 1,5 meq l^{-1} respecto a concentraciones menores (Figura 4-4, derecha).

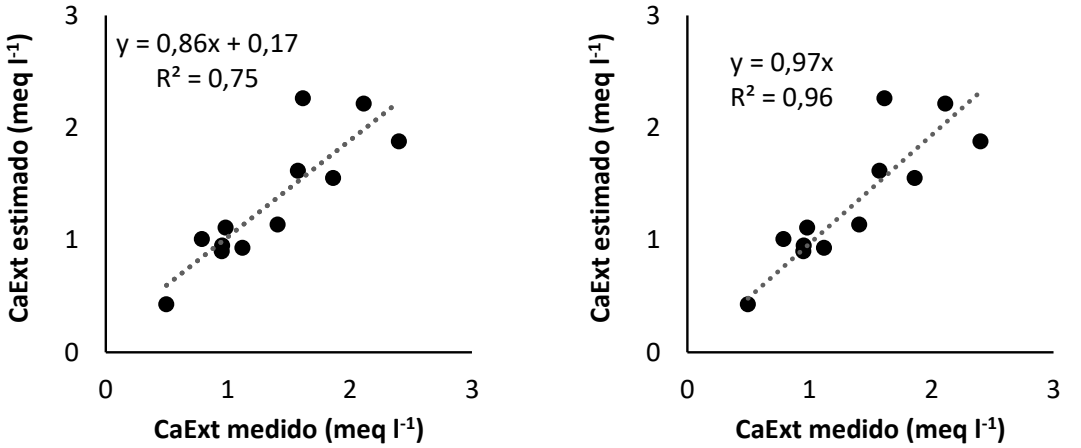


Figura 4-4. Calcio soluble-disponible medido en los suelos independientes (CaExt medido) respecto al CaExt estimado por el modelo (CaExt estimado) según modelo original (izquierda) y modelo forzando el intercepto a cero (derecha), con su respectiva ecuación y coeficiente de ajuste.

4.7. DISCUSIÓN

El objetivo de este capítulo fue estimar la concentración de CaExt de suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires a partir de determinaciones analíticas solicitadas rutinariamente en laboratorios de suelos de la RP. Los resultados mostraron que el CaExt de suelos molisoles de Buenos Aires, principalmente hapludoles, argiudoles y paleudoles, podría estimarse a partir de CE y la relación CaCIC S^{-1}, con valores de ajuste R^2 de 0,63. La bondad de ajuste encontrada se asoció con la semejanza en los valores de los principales parámetros que determinan la concentración de Ca en suelo en los suelos estudiados (Imbellone et al., 2010). Los valores de ajuste fueron mayores a los reportados por otros autores que, al igual que en este trabajo, generaron ecuaciones predictivas del CaExt en suelos de Colombia (Lince Salazar et al., 2015). La retención de CE en la ecuación se asociaría con el comportamiento del ion Ca como electrolito en la solución del suelo (USDA, 1954; Narváez Ortiz, 2017), mientras que la retención de la relación CaCIC S^{-1} se asociaría a la estrecha relación entre el CaExt con los cationes básicos en la fracción soluble-disponible que gobernarían la reposición de CaExt el corto-mediano plazo (Zapata Hernández, 2006; Bolt et al., 2013). La comprobación del modelo en suelos independientes entre CaExt medido y CaExt estimado mostró una pendiente de 0,85 con valores de ajuste R^2 de 0,75, sugiriendo que la ecuación predictiva subestimaría los valores de CaExt en suelo e incluso se generarían errores en la estimación. Aun así, se encontraron resultados muy prometedores forzando el intercepto a cero en el modelo de comprobación, puesto que la pendiente de la ecuación se elevó a 0,97 y el R^2 a 0,96, demostrando un elevado potencial para estimar los valores de CaExt en forma exacta y ajustada. Por ello, será necesario continuar ajustando el modelo predictivo de CaExt con otros suelos, debido a que podrían generarse mayores niveles de ajuste, evaluando paralelamente su alcance. Hasta la actualidad, se recomendaría medir directamente los valores reales en el suelo en caso de requerir valores exactos de CaExt, más aún en valores elevados y siendo que el CaExt se mide en el mismo extracto de suelo donde se cuantifica CE, parámetro necesario para utilizar el modelo (IRAM-SAGyP, 2021a). La ecuación predictiva de CaExt podría utilizarse para la caracterización de suelos molisoles de Buenos Aires y la identificación de sitios con bajos contenidos de CaExt, considerando principalmente hapludoles, argiudoles y paleudoles. Estos resultados preliminares permitirían entender cuáles son los principales parámetros del suelo que se encuentran más estrechamente relacionados con los valores de CaExt en suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires, y permitirían estimar valores en suelos utilizando como insumos determinaciones analíticas de rutina en laboratorios de

suelos de la Región Pampeana (Ciarlo et al., 2018). Se podría continuar estudiando los parámetros de suelo que más se relacionan con CaExt a nivel de escala local, que incluso podrían diferir de los encontrados en este trabajo, considerando la restricción en la variabilidad de los suelos para generar ecuaciones que permitan estimar los valores de CaExt con un mayor grado de ajuste.

Los suelos analizados tuvieron características edáficas relativamente similares en los principales parámetros que determinan la fertilidad del suelo, asociado a la semejanza en la naturaleza de los materiales parentales, en el relieve, en el clima y en la historia productiva (Imbellone et al., 2010; Vázquez y Millán, 2017). Las determinaciones arrojaron un pH que osciló entre valores de 5,1 a 6,5, considerados desde ácidos a ligeramente ácidos (USDA, 2017). Estos valores pueden asociarse principalmente a la extracción de bases sin reposición por actividades antrópicas y al uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados con elevado índice de acidez (Sainz Rozas et al., 2019; CIAFA, 2023). Los valores de CO y el Nt oscilaron entre valores de 8 a 34 g kg^{-1} y 0,82 a 3,31 g kg^{-1}, respectivamente, considerados desde bajos a elevados respecto a valores de referencia para la zona estudiada (Sainz Rozas et al., 2019). El Pbk fue la determinación que mayor variación mostró, oscilando entre 1,8 mg kg^{-1} y 36,9 mg kg^{-1}, considerados valores desde muy bajos hasta muy altos (Sainz Rozas et al., 2019). Este comportamiento se explica fundamentalmente por la elevada variabilidad del Pbk según la historia de fertilización particular de cada sitio, por la inmovilidad de este elemento en suelo y los distintos niveles de extracción (Alconada Magliano et al., 2015; Alconada Magliano y Lanfranco, 2020). La CE osciló en valores de 0,24 dS m^{-1} a 0,68 dS m^{-1}, siendo considerados valores de muy baja salinidad (USDA, 1954). La CIC y los cationes intercambiables oscilaron en valores bajos a altos, con escaso contenido de Na (Herrera y Rotondaro, 2017; Sainz Rozas et al., 2019). Estas características pueden asociarse a la naturaleza del material parental y a las diferentes concentraciones de los coloides en suelo (CO y arc) que definen principalmente la CIC y la capacidad de retención de bases en la fracción soluble-intercambiable del suelo (Imbellone et al., 2010; Alconada Magliano et al., 2015). El catión de intercambio más predominante en la totalidad de los suelos fue el Ca, mientras que el segundo lugar varió entre el Mg y el K. Estos resultados coinciden con las series liotrópicas informadas por Bohn et al. (1993). La relación CaCIC CIC^{-1} osciló entre 0,32 y 0,61, valores considerados bajos según escalas reportadas, sugiriendo un posible desabastecimiento de Ca asociado a la extracción sin reposición de este nutriente por los sistemas agropecuarios (Heredia et al., 2012; Vázquez y Pagani, 2015; García y Presutti, 2018). La totalidad de los suelos arrojaron textura franca, en su mayoría franco-limosos y oscilando entre franco-arcillosos y franco-

arenosos. Los tipos de textura encontradas se asocian principalmente a la naturaleza del material parental y a los procesos pedogenéticos ocurridos en los sitios muestreados de la provincia de Buenos Aires por sus características climáticas, bióticas y de relieve (Imbellone et al., 2010; USDA, 2023). El CaExt arrojó valores entre 1,0 meq l^{-1} y 2,4 meq l^{-1}. La variabilidad en el parámetro CaExt se asoció a las similares características de los suelos estudiados, tanto desde el punto de vista topográfico y edafológico, como de la historia de manejo productivo. Estas variables se relacionan con la concentración de Ca soluble según lo informado por varios autores (Anda et al., 2015; Emamgolizadeh et al., 2015; Kim y Kim, 2015). Según los valores de CaExt encontrados en los suelos y en relación con lo reportado en el Capítulo 3, la mayoría de los sitios analizados podrían incrementar la producción de MS de soja ante el agregado de Ca al suelo. En este sentido se podría considerar que los suelos estudiados permitirían el incremento de MS de algunos cultivos ante el agregado de fertilizantes cálcicos.

La restricción del alcance del modelo seleccionando suelos con valores de parámetros acotados habría permitido alcanzar el grado de ajuste observado con solamente dos variables predictoras. El modelo generado explicó el 63% de la variabilidad encontrada en CaExt. La bondad de ajuste del modelo predictivo se corresponde casi con la totalidad de la variabilidad de CaExt explicada por las variables CE y CaCIC S^{-1} en forma independiente. La sumatoria de los coeficientes de ajuste R^2 de las regresiones simples con cada variable arroja un valor de 0,70, siendo de 0,44 en CE ($p<0,01$) y 0,26 en CaCIS S^{-1} ($p<0,01$). Siendo el R^2 ajustado del modelo de 0,63 ($p<0,01$), el solapamiento de la variación total entre la explicación de ambos parámetros a través del modelo generado es solamente un 7%, confirmando la correcta elección de las variables regresoras. Asimismo, CE y CaCIC S^{-1} muestran un impacto similar en la concentración de CaExt, incrementando su concentración entre 2,418 y 2,486, respectivamente, por cada unidad de incremento de variable. Sin embargo, los valores de CE variaron en un rango de 0,44 unidades (0,24 a 0,68 dS m^{-1}) mientras que CaCIC S^{-1} osciló solamente en un rango de 0,33 unidades (0,51 a 0,84), sugiriendo un 33% mayor de dependencia de la CE respecto a CaCIC S^{-1}. Más aún, la CE podría afectar en mayor medida los valores de CaExt estimado por la regresión pues su valor puede alcanzar valores superiores a los encontrados en estos suelos aún sin limitar la producción de la mayoría de los cultivos (USDA, 1954). La relación CaCIC S^{-1}, por su característica relativa, no podría superar el valor de la unidad debido a la presencia de otros cationes. La relación existente entre el CaExt y la CE se asocia directamente a la solubilidad del ión Ca que cumple el rol de electrolito (USDA, 1954; Narváez Ortiz, 2017). Este modelo avalaría lo mencionado por Anda et al. (2015) y Emamgolizadeh et al. (2015) quienes

reportaron que la concentración de nutrientes está estrechamente relacionada con parámetros físicos y químicos del suelo. Sin embargo, estos resultados no concuerdan con lo encontrado por Henao-Toro y Hernández-Guzmán (2002) quienes mencionan que existe una relación lineal entre la concentración de los elementos en la fracción soluble-intercambiable y los elementos en la fracción soluble-disponible. Esta discrepancia puede deberse a la naturaleza de los suelos, pues los autores han trabajado en zonas tropicales y los estudios realizados en este ensayo se corresponden a zonas templadas, con diferentes características edáficas, procesos pedogenéticos y manejos antrópicos, que en su conjunto definen el comportamiento del equilibrio de cambio (Fassbender y Bornemisza, 1987; Bolt et al., 2013; Vázquez y Millán, 2017). Estos resultados indicarían que los valores de CaExt podrían depender de diferentes parámetros químicos del suelo según el área de estudio y no sería pertinente extrapolar el uso de la ecuación a otros tipos de suelos.

Las determinaciones retenidas en el modelo de predicción de CaExt permitiría identificar los principales parámetros del suelo que se relacionan con la disponibilidad de CaExt en suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires, principalmente hapludoles, argiudoles y paleudoles. El modelo relaciona información que se determina más rutinariamente en laboratorios de suelos con información que no suele determinarse (Ciarlo et al., 2018), cumpliendo con el objetivo que planteó Bouma (1989) de utilizar información de algunos parámetros de suelos conocidos para predecir otros que no se poseen. Estos resultados demuestran que es posible ajustar parámetros químicos en suelos de zonas templadas, de manera similar a lo logrado por algunos autores trabajando en otros parámetros y sistemas edafoclimáticos (Cox, 1994; Bell y Keulen, 1995; Scheinost et al., 1997; Horn et al., 2005). Además, la ecuación de este trabajo incluso arrojó mayores valores de ajuste que los encontrados por Lince Salazar et al. (2015), quienes realizaron una predicción de CaExt en suelos de Colombia (R^2=0,63 vs R^2=0,52, respectivamente). Estos autores, sin embargo, encontraron que el CaExt se relaciona con la concentración de otros nutrientes en la fracción soluble-intercambiable, semejante a lo reportado por Anda et al. (2015) y Emamgolizadeh et al. (2015), demostrando la importancia sitio-específica para la generación de modelos predictivos. A pesar de que los grados de ajuste del modelo predictivo generado en este trabajo fueron mayores a los de Colombia, se recomendaría restringir el uso de la ecuación para la caracterización de sitios e identificación de suelos con bajos contenidos de CaExt, puesto que la ecuación explicaría el 63% de la variabilidad de CaExt y la comprobación del modelo inicialmente demostró que la ecuación podría subestimar los valores de CaExt, incluso con errores. La comprobación del modelo forzando el intercepto a cero, sin embargo, mejoró sustancialmente la predicción de los niveles de

CaExt reales en suelo. Estos resultados sugerirían podría ser posible generar ecuaciones predictivas de CaExt con mayores grados de ajuste si se seleccionan suelos más homogéneos entre sí que los utilizados en este trabajo y/o en áreas más reducidas, aunque en detrimento del alcance del modelo (McBratney et al., 2002; Genú y Demattê, 2011). La identificación de sitios con bajos contenidos de CaExt, en conjunto con la información obtenida en el Capítulo 3, permitirían recomendar el uso de fertilizantes cálcicos para incrementar la producción de MS en soja, del mismo modo que se realiza en otros nutrientes como N (Álvarez et al., 2013; Bachmeier et al., 2013). En este sentido, podría ser posible generar curvas calibradas de respuesta en cultivos para la aplicación de fertilizantes cálcicos en función de los valores de CaExt. La información registrada colabora con la generación de indicadores diagnóstico de suficiencia de nutrientes que no se encuentran presentes en los planteos de fertilización de los sistemas productivos de la Región (Zubillaga y Ciarlo, 2015; García y Presutti, 2018). Más aún, toma relevancia pues el empobrecimiento de los suelos atenta con la sustentabilidad de los sistemas y la situación puede ser agravada por la mayor demanda de nutrientes de los cultivos actuales (Sarandón y Flores, 2014; Filippi et al., 2021).

4.8. CONCLUSIONES PARCIALES

Los niveles de CaExt en suelos molisoles de la RP pueden ser estimados a partir de las determinaciones realizadas en laboratorios de suelos de la RP, pero es necesario generar ecuaciones a nivel de subgrupos de suelos para elevar los coeficientes de ajuste y mejorar la exactitud de la estimación de los modelos.

4.9. CONCLUSIONES RELEVANTES PARA OTROS CAPÍTULOS

En base a los resultados encontrados en el Capítulo 3 y los valores de CaExt medidos en los suelos hapludoles, argiudoles y paleduoles se considera que podría haber respuesta positiva en la producción de MS de soja con el agregado de Ca al suelo, siempre y cuando no se encuentre problemáticas físicas o de abastecimiento para el crecimiento de los cultivos.

Capítulo 5

-

Dinámica de calcio soluble ante el agregado de fertilizantes cálcicos en suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires

La información de este Capítulo ha sido publicada en:

Ferro, Daniel A.; Andreini, Brian L.; Merani, Víctor H.; Larrieu, Luciano; Mur, Matilde; Guilino, Facundo; Pereira, Esteban; Cinquetti, Tatiana; Millán, Guillermo, Imaz, José Augusto. 2023. Adsorción y dosificación de Ca en suelos de Buenos Aires, Argentina. Revista Tecnología en Marcha 36(3): 99-114. Editorial Tecnológica de Costa Rica. ISSN electrónico: 2215-3241. Referato: SI.

5.1. SINAPSIS

En el Capítulo 4 se generó un modelo predictivo que permite estimar los valores de calcio en la fracción soluble-disponible (CaExt) de suelos de la Región Pampeana a partir de la conductividad eléctrica (CE) y la relación entre el calcio soluble-intercambiable y la suma de cationes solubles-intercambiables del suelo (CaCIC S^{-1}), información que hasta la actualidad se desconocía. Sin embargo, se recomienda medir directamente CaExt para lograr exactitud en los valores obtenidos, puesto que los resultados demostraron que la ecuación podría generar errores en los valores reales. Paralelamente, la mayor proporción de los suelos estudiados tuvieron valores de CaExt menores a 2 meq l^{-1} y, según los resultados encontrados en el Capítulo 3 de esta tesis, serían sitios donde se esperaría encontrar respuesta positiva en la MS de soja forrajera ante el uso de fertilizantes cálcicos. Sin embargo, hasta el momento se carece de información que permita definir las dosis ajustadas de fertilizante cálcico para lograr los resultados esperados. Por lo tanto, será necesario estudiar el efecto de las diferentes dosis de fertilizantes sobres los valores de CaExt. En este capítulo se pretende evaluar metodologías que permitan definir dosis de fertilizantes cálcicos ajustadas a los valores de CaExt alcanzados en suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires.

5.2. INTRODUCCIÓN ESPECÍFICA

La fertilización de suelos consiste en agregar productos con elevada concentración de nutrientes en su composición para elevar los niveles de los elementos en la fracción soluble-disponible y así lograr una mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas (Bachmeier et al., 2013; Marschner, 2023). En estas prácticas, una parte de los nutrientes agregados pueden perderse por lixiviación, precipitación, fijación, oclusión, volatilización, entre otros procesos según el tipo de nutriente y molécula que se agregue (McBride, 2000; Zapata Hernandez, 2004). El principal objetivo en el uso de fertilizantes en la RP es incrementar la producción de biomasa de los cultivos (Álvarez et al., 2013; Bachmeier et al., 2013). En la actualidad existen curvas calibradas de respuesta de cultivos ante el agregado de diferentes dosis de fertilizantes según la concentración de los nutrientes en la fracción soluble-disponible al momento de la siembra (Zubillaga y Ciarlo, 2015). Sin embargo, hasta la actualidad no existen reportes de curvas calibradas para Ca en suelos molisoles de Buenos Aires, a pesar de encontrar evidencias de respuesta en cultivos como soja (Vivas y Fontanetto, 2003; Fontanetto y Keller, 2006; Gambaudo et al., 2007). En base a ello y considerando que: 1- los efectos de CaExt son comparables con valores de Ca en SCR (Loneragan y Snowball, 1969) y 2- que CaExt está relacionado a los valores de CE y CaCIC S^{-1} (Capítulo 4); resulta relevante evaluar metodologías que contemplen la dinámica del calcio soluble ante el agregado de fertilizantes en el extracto de pasta de saturación donde se cuantifica CE, como así también en el complejo de intercambio donde se cuantifica CaCIC S^{-1}. En estos términos, las metodologías de incubación de pastas de saturación de suelos y las isotermas de adsorción podrían ser herramientas valiosas y útiles en la generación de herramientas calibradas para definir dosis de fertilizantes cálcicos (Beckett, 1964; IRAM-SAGyP, 2021a).

La incubación de pastas de saturación consiste en el armado de pastas de suelos con relación suelo:agua de aproximadamente 2:1 con diferentes dosis de fertilizante, y la posterior cuantificación del CaExt en el equilibrio edáfico (IRAM-SAGyP, 2021a). Esta metodología toma relevancia pues la relación suelo:agua simula lo sucedido en situaciones de campo. Las isotermas de adsorción consisten en el agregado de soluciones con diferentes concentraciones de nutrientes (Co) en una relación suelo:solución de 1:10 y posterior cuantificación de la concentración de nutriente en el sobrenadante (Ci) una vez alcanzado el equilibrio (Beckett, 1964). La isoterma de adsorción por definición es una relación que describe el fenómeno que rige la movilidad de una sustancia de un medio acuoso poroso, incluyendo retención y liberación, hacia una fase sólida a temperatura y pH

constante (Limousin et al., 2007). Esta metodología ha sido utilizada para evaluar la dinámica de micronutrientes y macronutrientes como K y P en diferentes sistemas edáficos (Beckett, 1964; Bedrossian y Singh, 2004; Silva Rossi et al., 2013; Onana et al., 2016). Algunos autores mencionan que es un método preciso para determinar dosis de fertilización para un crecimiento óptimo de cultivos (Kenyanya, 2015). Las isotermas de Langmuir, Freundlich, Tempkin y Van Huay son algunas alternativas de tipos de isotermas. La isoterma de Freundlich se reconoce por explicar de una manera acertada el comportamiento de nutrientes en suelos reales por asumir ilimitados sitios de adsorción (Hannan, 2008; Kassa et al., 2019). Según McBride (2000), las isotermas se pueden clasificar en diferentes tipos según el grado de afinidad ión/molécula. El tipo de isoterma que se ajusta al suelo, así como la magnitud de los parámetros que la componen, permiten conocer la dinámica de los nutrientes en sus diferentes formas y su relación con otras propiedades del suelo (Shaviv et al., 1985; McBride, 2000; Farheen et al., 2018). Los principales procesos que pueden desprenderse del análisis de isotermas son la adsorción-desorción, la precipitación, la fijación y la generación de clústeres, dependiendo del ión que se estudie (McBride, 2000). Los procesos mencionados dependen del tipo de nutriente, de su concentración en suelo y de la interacción que pueda surgir con otros elementos y los coloides (McBride, 2000; Pannu et al., 2003; Kassa et al., 2019). Las interacciones de los cationes en suelo son procesos complejos que dependen fuertemente de cada sistema edáfico (Foo y Hameed, 2010). El estudio de isotermas de adsorción en Ca es muy escaso, incluso en suelos tropicales que poseen bajas concentraciones de este elemento. Marcano-Martinez y McBride (1989) han evaluado la adsorción de Ca con Ci hasta 6 meq l^{-1} de Ca en solución de equilibrio sobre suelos oxisoles de aptitud agrícola en Brasil y evidenciaron una relación curvilínea que se ajustaba con elevados grados de ajuste a la isoterma de Freundlich (R^2>0,99). Asimismo, estos autores encontraron que el equilibrio con Ca no implicó cambios en el pH, sugiriendo que el Ca agregado fue adsorbido en sitios previamente ocupados por el K y de manera rápida, pues el equilibrio se logró solamente 5 minutos después del agitado. Los autores concluyen que el uso de isotermas de adsorción en Ca puede ser una herramienta valiosa para entender la dinámica de este nutriente en los suelos.

Siendo que en la actualidad se carecen de curvas calibradas para la fertilización cálcica de cultivos en los suelos molisoles de la Región Pampeana (Bachmeier et al., 2013; Zubillaga y Ciarlo, 2015), a pesar de que se han reportado incrementos en la producción de MS en soja ante el uso de fertilizantes cálcicos (Fontanetto et al., 2011), y que en el Capítulo 3 de esta tesis se encontró que la soja incrementaría la producción de MS ante el aumento

de los niveles de Ca en SCR, cuyos efectos se consideran análogos al CaExt en suelos (Loneragan y Snowball, 1969), se considera relevante estudiar el comportamiento de CaExt ante el agregado de distintas dosis de fertilizantes cálcicos. Contar con herramientas que permitan ajustar los valores de CaExt según la dosis de fertilizante cálcico utilizada permitirá colaborar con el entendimiento de la dinámica del Ca soluble en suelos y generar criterios para definir niveles de fertilización cálcica que incrementen la producción de MS de soja y otros cultivos forrajeros, principalmente leguminosas, evitando la reducción de los niveles de bases en los suelos y colaborando con la sustentabilidad de los sistemas (Sarandón y Flores, 2014).

5.3. OBJETIVO ESPECÍFICO

El objetivo de este capítulo fue evaluar metodologías de laboratorio para 1) estudiar la dinámica de adsorción y desorción de Ca en suelos hapludoles de Buenos Aires y 2) predecir los valores de CaExt alcanzados luego la aplicación de diferentes dosis de fertilizantes cálcicos.

5.4. HIPÓTESIS ESPECÍFICA

La hipótesis de este capítulo fue que la incubación de pastas de saturación de suelos es una metodología más adecuada que las isotermas de adsorción para estudiar la dinámica de adsorción y desorción de Ca en suelos hapludoles de Buenos Aires y predecir los valores de CaExt alcanzados con diferentes dosis de fertilizantes cálcicos, debido a la mayor relación suelo:líquido.

5.5. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron dos ensayos para determinar los niveles de CaExt ante el agregado de diferentes dosis de fertilizante sobre dos suelos: Bellocq e Inchausti. El suelo de Bellocq pertenece a la Chacra Experimental del Ministerio de Desarrollo Agrario de la provincia de Buenos Aires ubicada en Bellocq, partido de Carlos Casares, mientras que el suelo de Inchausti pertenece a la Escuela de Educación Agropecuaria M.C. y M.L. Inchausti de la UNLP, ubicado cercano a la localidad de Valdez, partido de 25 de Mayo (Figura 5-1). El primer ensayo se realizó con isotermas de adsorción y el segundo con pastas de saturación.

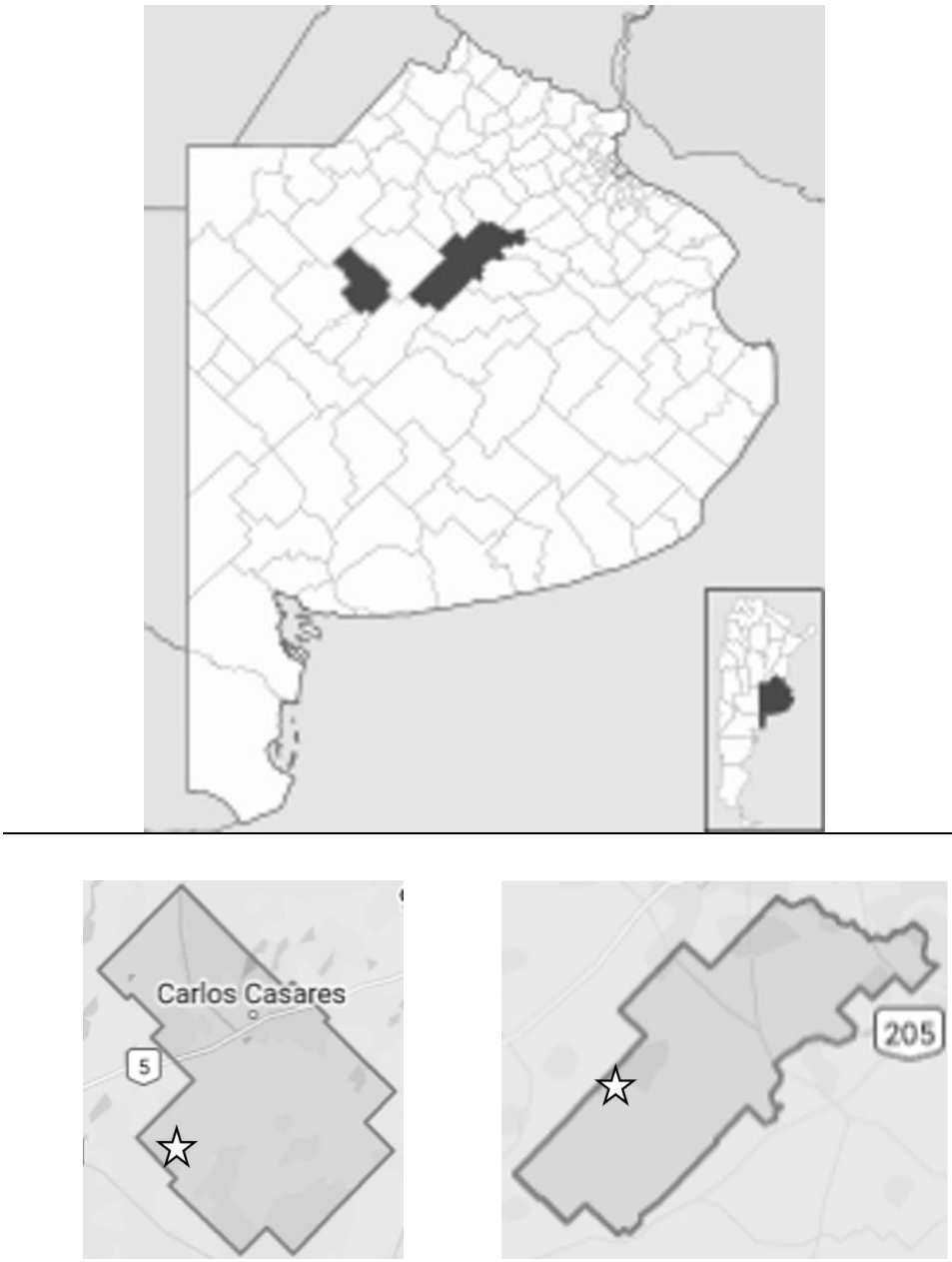


Figura 5-1. Sitios en la provincia de Buenos Aires utilizados en el ensayo para determinar dinámica de Ca soluble ante el agregado de fertilizante. Arriba: provincia de Buenos Aires. Arriba: provincia de Buenos Aires con identificación de los partidos de Carlos Casares (izquierda) y 25 de Mayo (derecha). Abajo izquierda: partido de Carlos casares con ubicación del suelo de Bellocq (estrella); Abajo derecha: partido de 25 de Mayo con ubicación del suelo de Inchausti (estrella). Imagen: Google Maps® (Google, 2022).

5.5.1. Descripción de los suelos

El suelo de Bellocq es un suelo molisol, clasificado como Hapludol éntico, familia franca gruesa, mixta, térmica (USDA, 2014), homologable a la serie Bolivar (INTA, 2024). Es un suelo pardo grisáceo oscuro, profundo, poco desarrollado, con aptitud agrícola, se encuentra en un paisaje de lomas medanosas, muy suave a suavemente ondulado de la Subregión Pampa Arenosa, en posición de loma, algo excesivamente drenado, habiendo evolucionado sobre un sedimento eólico franco arenoso con texturas superficiales franco arenosas, no alcalino, no salino, con pendientes de 0-1%. El suelo de Inchausti es un suelo molisol, clasificado como Hapludol éntico, familia franca gruesa, mixta, térmica (USDA, 2014), homologable a la serie Norumbega (INTA, 2024). Es un suelo profundo, arenoso, con escaso desarrollo, de aptitud agrícola que se encuentra en un paisaje de cordones medanosos con relieve suavemente ondulado, en posición de crestas de lomas y medias lomas de la Subregión Pampa Arenosa, algo excesivamente drenado, habiendo evolucionado sobre sedimentos eólico-arenosos, no alcalino, no salino con pendiente predominante de 1%.

El muestreo de los suelos se realizó mediante muestra compuesta conformada con 15 submuestras por muestra de los primeros 0,20 m de profundidad, donde se realizaron las determinaciones de laboratorio luego del secado del suelo a estufa de 40°C con circulación forzada, tamizado y molido según determinación a practicar (Tabla 5-1). La textura de Bellocq fue más fina que Inchausti explicado por los menores contenidos de arena y limo. Los suelos se clasificaron como moderadamente ácidos (USDA, 1954), representando el 41% de los suelos de la RP según Sainz Rozas et al. (2019). Los contenidos de Pbk fueron elevados en ambos suelos. La CE fue baja en ambos suelos. El CaExt fue más alto en Inchausti que en Bellocq, en valores superiores al 100%. La CIC fue mayor en Inchausti que en Bellocq explicado por el mayor contenido de arcilla. El CaCIC en Bellocq fue muy baja (menores a 5 cmolc Ca kg^{-1}), mientras que en Inchausti tuvo valores considerados bajos (entre 5 y 10 cmolc Ca kg^{-1}). La relación CaCIC CIC^{-1} fue menor a 65% en ambos suelos, siendo incluso menor en Bellocq que en Inchausti.

Tabla 5-1. Latitud, Longitud, Gran Grupo, Familia, arena (A), limo (L), arcilla (arc), textura (Text), pH, carbono oxidable (CO), nitrógeno total (Nt), fósforo Bray Kurtz 1 (Pbk), conductividad eléctrica (CE), calcio soluble-disponible (CaExt), capacidad de intercambio catiónica (CIC), calcio soluble-intercambiable (CaCIC), magnesio soluble-intercambiable (MgCIC), potasio soluble-intercambiable (KCIC), sodio soluble-intercambiable (NaCIC), relación entre sumatoria de bases y capacidad de intercambio catiónico (S CIC^{-1}), relación entre calcio soluble-intercambiable y sumatoria de bases intercambiables (CaCIC S^{-1}) y relación entre calcio soluble-intercambiable y capacidad de intercambio catiónico (CaCIC CIC^{-1}) de los suelos de Bellocq e Inchausti.

Descripción		Bellocq	Inchausti
Latitud		S 35º55'32,55"	S 35º36'49,55"
Longitud		W 61º29'17,78"	W 60º32'23,46"
Gran Grupo		Hapludol éntico franca gruesa	Hapludol éntico franca gruesa
Familia		mixta térmica	mixta térmica
A		41	65
L	(%)	52	24
arc		7	11
Text		Fr-l	Fr-A
pH		5,59	5,91
CO	(g kg^{-1})	18,2	17,6
Nt	(g kg^{-1})	1,80	1,75
Pbk	(ppm)	48,5	28,0
CE	(dS m^{-1})	0,42	0,43
CaExt	(meq l^{-1})	0,72	1,81
CIC		9,1	14,7
CaCIC		3,6	7,9
MgCIC	(cmolc kg^{-1})	3,0	4,1
KCIC		0,3	0,3
NaCIC		0,3	0,3
S CIC^{-1}		0,80	0,85
CaCIC S^{-1}		0,49	0,63
CaCIC CIC^{-1}		0,39	0,53

5.5.2. Isotermas de adsorción

El ensayo en isotermas de adsorción se realizó en base al método descrito por Beckett (1964) modificado para Ca, similar al utilizado por Marcano-Martinez y McBride (1989) en suelos oxisoles de Brasil. Se pesaron 4 g de suelo seco y tamizado por 2 mm por duplicado en tubos de plástico de 50 ml y se agregaron 40 ml de soluciones con diferentes concentraciones de Ca a partir de una solución de cloruro de calcio ($CaCl_2$). Cada solución se agregó en una matriz de 10 meq l^{-1} de cloruro de potasio (KCl). Las dosis agregadas de Ca (Co) fueron de 0,00; 0,05; 0,11; 0,16; 0,22; 0,27; 0,33; 0,38; 0,43; 0,49; 0,54; 0,60; 0,65; 1,09; 2,17; 3,26; 4,35; 10,87; 21,74; 54,35; 108,70; 163,04; 217,39 y 326,09 meq l^{-1}. La mayor dosis utilizada fue equivalente al aplicar 5500 kg Ca ha^{-1} en el suelo de Bellocq y a 7500 kg Ca ha^{-1} en el suelo de Inchausti. La equivalencia anterior se calculó considerando la humedad de pasta de saturación, la densidad aparente y una profundidad de 0,2 m del suelo (las diferencias entre suelos corresponden principalmente a la humedad necesaria para formar la pasta de saturación). Las suspensiones generadas se agitaron con agitador

vaivén horizontal durante una hora (180 rpm y 25 ± 1 °C) y luego se dejaron equilibrar verticalmente durante 18 h. Luego de su equilibrio, las soluciones fueron filtradas con papel de filtro Whatman N°42 y se analizaron las soluciones para cuantificar la concentración de Ca soluble-disponible luego del equilibrio (Ci, meq l^{-1}) mediante complejometría con EDTA (IRAM-SAGyP, 2022). La cantidad de Ca fijado en los coloides por unidad de masa de suelo (Qi, meq g^{-1}) se calculó mediante la diferencia entre Co y Ci, respecto a la masa de suelo y el volumen de enrace utilizado. Los datos se evaluaron utilizando las isotermas linealizadas de Freundlich (Ecuación 5-1), Langmuir (Ecuación 5-2), Tempkin (Ecuación 5-3) y Van Huay (Ecuación 5-4).

5.5.2.1. Freundlich

$$\boldsymbol{log\ Qi\ =\ log\ Kf\ +\ n\ log\ Ci}$$

Ecuación 5-1. Isoterma de Freundlich linealizada (Freundlich, 1906; Foo y Hameed, 2010)*. Qi es la masa de Ca adsorbido por unidad de masa de suelo (meq kg^{-1}), Ci es el equilibrio de las concentraciones de Ca en solución (meq l^{-1}), Kf constante de equilibrio de adsorción relacionada con la energía de enlace en la superficie y n es una constante cuyo valor depende de los coloides.*

5.5.2.2. Langmuir

$$\boldsymbol{ci\ Qi^{-1}\ =\ qmK^{-1}\ +\ Ci\ qm^{-1}}$$

Ecuación 5-2. Isoterma de Langmuir linealizada (Langmuir, 1916; Foo y Hameed, 2010)*. Qi es la masa de Ca adsorbido por unidad de masa de suelo (meq kg^{-1}), Ci es el equilibrio de las concentraciones de Ca en solución (meq l^{-1}), K es una constante relacionada con energía de unión y qm es una constante relacionada con la adsorción máxima de la monocapa.*

5.5.2.3. Tempkin

$$\boldsymbol{Qi\ =\ B\ lnAT\ +\ B\ ln\ Ci}$$

Ecuación 5-3. Isoterma de Tempkin (Tempkin y Pyzhev, 1940; Foo y Hameed, 2010)*. Qi es la masa de Ca adsorbido por unidad de masa de suelo (meq kg^{-1}), Ci es el equilibrio de las concentraciones de Ca en solución (meq l^{-1}), AT es la constante de unión de equilibrio isotérmico de Tempkin y B está relacionado constantemente con el calor de sorción.*

5.5.2.4. Van Huay

$$\boldsymbol{Qi\ =\ b\ +\ n\sqrt{Ci}}$$

Ecuación 5-4. Isoterma de Van Huay (Pagel y van Huay, 1976; Abbas et al., 1996)*. Qi es la masa de Ca adsorbido por unidad de masa de suelo (meq kg^{-1}), Ci es el equilibrio de las concentraciones de Ca en solución (meq l^{-1}), n es una constante relacionada con la afinidad del catión a los coloides y b la intersección o teóricamente la cantidad desorbida del Ca.*

5.5.3. Pastas de saturación

En ensayo en pastas de saturación realizó pesando 500 g de suelo seco por duplicado para luego agregar dosis equivalentes a 0; 25; 50; 75; 100; 150; 200; 250 y 350 kg ha^{-1} de Ca utilizando una solución patrón de cloruro de calcio ($CaCl_2$) 0,016 N. Las dosis equivalentes de fertilizantes se calcularon en base a una profundidad de 0,20 m y la densidad aparente del suelo. Luego del agregado de Ca, se adicionó agua destilada hasta formar la pasta de saturación, se dejó reposar 24 h y se extrajo el extracto de pasta de saturación utilizando una bomba de vacío. En cada extracto se midió CaExt por titulación con EDTA y CE por conductimetría (IRAM-SAGyP, 2021a, 2022).

5.5.4. Regresión y análisis estadístico

5.5.4.1. Isotermas de adsorción

Se realizó el ajuste de las isotermas de Freundlich, Langmuir, Tempkin y Van Huay utilizando diferentes grupos de datos, que se dividieron según concentraciones y suelos. Según las concentraciones, se realizó el ajuste para: 1) adsorción-desorción: todas las concentraciones estudiadas; 2) adsorción (Co>Ci): cuando parte del Ca agregado se incorporó a la matriz del suelo, identificado porque las concentraciones de Ca agregadas (Co) fueron mayores a las concentraciones de Ca medidas luego del equilibrio (Ci) y 3) desorción en dosis menores a 100 kg ha^{-1} (Co<Ci): cuando a) el suelo aumentó los valores de Ca agregados, identificadas porque las concentraciones de Ca agregadas (Co) fueron menores a las concentraciones de Ca medidas luego del equilibrio (Ci) y b) la concentraciones de Ca agregadas (Co) se correspondieron con dosis menores al equivalente de aplicar 100 kg ha^{-1} de Ca en los suelos. La dosis de 100 kg ha^{-1} se definió en base a las dosis máximas capaces de ser utilizadas en los planteos de fertilización en suelos molisoles de la RP (CIAFA, 2023). Para calcular los valores equivalentes de Co en relación con kg ha^{-1} de Ca se utilizó la humedad de pasta de saturación, la densidad aparente y se consideró una profundidad de 0,20 m. Según los suelos analizados, se realizó el ajuste para: 1) ambos suelos; 2) Bellocq y 3) Inchausti. En este sentido, las 4 isotermas analizadas (Freundlich, Langmuir, Tempkin y Van Huay), se ajustaron en 3 grupos de concentraciones (todas las utilizadas, aquellas que generaron adsorción y aquellas que generaron desorción) y en 3 grupos de datos según los suelos (ambos suelos, Bellocq e Inchausti), evaluando un total de 36 isotermas para el estudio de la dinámica Ca soluble en suelos hapludoles de Buenos Aires ante el agregado de fertilizantes.

Luego de realizar el análisis de regresión y comprobar el cumplimiento de los supuestos básicos de una regresión (normalidad de residuos, homocedasticidad de varianzas), se evaluó la significancia de las distintas isotermas mediante el análisis de la varianza (ANOVA), la significancia de los parámetros estimados de las ecuaciones mediante la prueba t-Student ($p<0,05$) y el grado de ajuste de cada ecuación mediante el coeficiente de regresión (R^2). Finalmente, se utilizaron variables auxiliares (*dummy*) con el objeto de identificar diferencias en los parámetros estimados para una misma isoterma entre los distintos suelos. Se utilizó el software estadístico RStudio® (R Core Team, 2023).

5.5.4.2. Incubación de pastas de saturación

El ajuste de CaExt ante diferentes dosis de fertilizante cálcico con las pastas de incubación se realizó utilizando modelos lineales, garantizando el cumplimiento de los supuestos de la regresión lineal (normalidad de residuos, homocedasticidad de varianzas). Al igual que en las isotermas, se generaron 3 ecuaciones lineales según datos de CaExt registrados en 1) ambos suelos, 2) Bellocq y 3) Inchausti. Finalmente, se utilizaron variables auxiliares (*dummy*) para identificar diferencias en los parámetros estimados de la regresión lineal entre las regresiones ajustadas entre los suelos. Finalmente se realizó una comparación de ajuste de ambas metodologías para predecir la concentración de CaExt alcanzada con las distintas dosis de fertilizante utilizado. Se utilizó el software estadístico RStudio® (R Core Team, 2023).

5.5.4.3. Comparación de metodologías

La comparación de los valores estimados de CaExt según cada metodología empleada (isotermas de adsorción e incubación de pastas de saturación) para cada dosis de fertilizante empleada se realizó mediante la comparación de los parámetros estimados de la regresión lineal ajustada. Se utilizaron variables auxiliares (*dummy*) para identificar diferencias en los parámetros estimados por cada regresión. Se utilizó el software estadístico RStudio® (R Core Team, 2023).

5.6. RESULTADOS

5.6.1. Isotermas de adsorción

5.6.1.1. Evaluación de adsorción y desorción de Ca en suelos

Las menores concentraciones estudiadas generaron desorción de Ca desde la matriz del suelo hacia la solución (Co<Ci), mientras que las elevadas concentraciones generaron que una proporción del Ca agregado se adsorba a la matriz del suelo (Co>Ci). Los resultados mostraron que ninguna de las isotermas logró explicar el comportamiento de Ca cuando se estudiaron simultáneamente concentraciones que producen desorción y adsorción de Ca, incluso realizando el análisis en forma individual para cada suelo. Las isotermas de Langmuir, Tempkin y Van Huay no cumplieron los supuestos básicos de la regresión lineal (normalidad de residuos), mientras que la isoterma de Freundlich no pudo correrse en el software estadístico debido a errores matemáticos en la operación. Los errores de la operación matemática se deben a que la isoterma de Freundlich utiliza una función logarítmica que afecta Qi en el eje de las ordenadas y, consecuentemente, los valores de Qi deben ser positivos para poder realizar la operación, es decir que sólo podría utilizarse cuando se genera adsorción de Ca en suelo (Weber, 2016). Siendo que matemáticamente no puede resolverse la operación logaritmo de números negativos, el intento de ajustar la isoterma de Freundlich generó un error en el software con todas las concentraciones evaluadas debido a las concentraciones bajas generaron desorción (Co<Ci) y este fenómeno genera valores de Qi negativos (Qi=Co-Ci).

5.6.1.2. Evaluación de adsorción de Ca en los suelos

Los resultados mostraron adsorción de Ca en los suelos (Co>Ci) cuando se utilizaron concentraciones de Ca (Co) superiores a 8 meq l^{-1} en Bellocq y superiores a 15 meq l^{-1} en Inchausti, equivalentes a dosis de 125 y 350 kg ha^{-1} de Ca, respectivamente. La dinámica de adsorción de Ca se ajustó a las isotermas de Freundlich, Tempkin y Van Huay, ya sea ajustando una ecuación general para ambos suelos como así también ajustando una ecuación para cada suelo en forma individual (Tabla 5-2). El ajuste de isotermas individuales para cada suelo mostró un incremento en los coeficientes de ajuste, pero no permitió diferenciar los parámetros de las ecuaciones (pendiente y ordenada al origen) que fueron similares entre las isotermas para cada suelo. En relación con el grado de ajuste de las isotermas ajustadas para ambos suelos, la isoterma de Freundlich mostró los mayores coeficientes de ajuste respecto a Tempkin y Van Huay. Asimismo, la isoterma de Freundlich

solamente mostró indiferencia en la ordenada al origen cuando se ajustó al suelo de Bellocq. Finalmente, la isoterma de Langmuir no cumplió los requisitos básicos de regresión lineal (normalidad de residuos), incluso diferenciando el análisis entre suelos.

Tabla 5-2. Estadísticos asociados a las ecuaciones de Freundlich, Tempkin y Van Huay en valores de adsorción de Ca, diferenciadas según grupo de datos utilizados y análisis. Ambos: estimación de las isotermas con datos de Bellocq e Inchausti; Bellocq: estimación de las isotermas con datos Bellocq; Inchausti: estimación de las isotermas con datos de Inchausti; y Dummy: comparación entre parámetros estimados de las isotermas de Bellocq e Inchausti. P: parámetro estadístico. F: ANOVA de regresión; a: pendiente de la ecuación; b: ordenada al origen; R^2: grado de ajuste de la ecuación. E: valor estimado; p: p-value.

Isoterma	P	Ambos		Bellocq		Inchausti		Dummy
		E	p	E	p	E	p	p
Freundlich	F	98,47	<0,01	51,73	<0,01	92,76	<0,01	---
	a	1,10	<0,01	1,05	<0,01	1,27	<0,01	0,33
	b	-0,56	<0,05	-0,40	0,22	-1,00	<0,05	0,20
	R^2	0,90		0,91		0,96		---
Tempkin	F	34,35	<0,01	19,00	<0,01	56,88	<0,01	---
	a	42,9	<0,01	47,4	<0,01	40,4	<0,01	0,65
	b	-127,5	<0,01	-134,3	<0,05	-130,3	<0,01	0,95
	R^2	0,76		0,79		0,93		---
Van Huay	F	58,21	<0,01	54,20	<0,01	67,88	<0,01	---
	a	10,23	<0,01	12,14	<0,01	8,34	<0,01	0,11
	b	-43,80	<0,05	-51,40	<0,05	-35,79	<0,05	0,54
	R^2	0,84		0,92		0,94		---

5.6.1.3. Evaluación de desorción de Ca en los suelos

Las isotermas de Tempkin y Van Huay se ajustaron al comportamiento de desorción de Ca, en concentraciones bajas de Co, solamente cuando se realizó un análisis individual para cada suelo (Tabla 5-3). El suelo de Bellocq mostró mayores coeficientes de ajuste que el suelo de Inchausti con ambas isotermas, y las isotermas mostraron similares coeficientes de ajuste en el mismo suelo. El suelo de Bellocq presentó mayores valores en la pendiente y en la ordenada al origen que el suelo de Inchausti en ambas isotermas. La isoterma de Freundlich no pudo ajustarse en el fenómeno de adsorción de Ca en suelos debido a su escala logarítmica en el eje de las abscisas, situación explicada en párrafos precedentes (Weber, 2016), mientras que la isoterma de Langmuir no cumplió los supuestos de la regresión lineal (normalidad de residuos).

Tabla 5-3. Estadísticos asociados a las ecuaciones de Tempkin y Van Huay para la estimación de los valores de desorción, diferenciadas según grupo de datos utilizados y análisis. Ambos: estimación de las isotermas con datos de Bellocq e Inchausti; Bellocq: estimación de las isotermas con datos Bellocq; Inchausti: estimación de las isotermas con datos de Inchausti; y Dummy: comparación entre parámetros estimados de las isotermas de Bellocq e Inchausti. P: parámetro estadístico. F: ANOVA de regresión; a: pendiente de la ecuación; b: ordenada al origen; R^2: grado de ajuste de la ecuación. E: valor estimado; p: p-value.

Isoterma	P	Ambos		Bellocq		Inchausti		Dummy
		E	p	E	p	E	p	p
Tempkin	F	0,03	0,86	370,20	<0,01	97,84	<0,01	---
	a	---	---	8,03	<0,01	6,49	<0,01	<0,05
	b	---	---	-18,65	<0,01	-27,26	<0,01	<0,05
	R^2	---		0,96		0,87		---
Van Huay	F	0,25	0,61	444,40	<0,01	96,76	<0,01	---
	a	---	---	9,79	<0,01	7,14	<0,01	<0,01
	b	---	---	-27,11	<0,01	-32,61	<0,01	<0,01
	R^2	---		0,98		0,87		---

5.6.2. Pastas de saturación

El CaExt se ajustó a una ecuación lineal en todos los casos analizados, con elevados coeficientes de ajuste (Tabla 5-4). Las regresiones individuales por suelo mostraron un incremento en el grado de ajuste de las isotermas respecto a la regresión compartida para ambos suelos. El suelo de Inchausti tuvo una mayor ordenada al origen que Bellocq cuando se compararon las ecuaciones entre los suelos, mientras que las pendientes estimadas en ambos suelos fueron similares.

Tabla 5-4. Estadísticos asociados a las regresiones lineales para la estimación de los valores de calcio soluble-disponible (CaExt) en suelos, diferenciadas según grupo de datos utilizados y análisis. Ambos: estimación de los parámetros de la ecuación con todos los datos, sin diferenciar entre suelos; Bellocq: estimación de los parámetros de las isotermas con datos de adsorción de Bellocq; Inchausti: : estimación de los parámetros de las isotermas con datos de adsorción de Inchausti y Dummy: comparación entre parámetros estimados de las isotermas de Bellocq e Inchausti con variables dummy. P: parámetro estadístico. F: ANOVA de regresión; a: pendiente de la ecuación; b: ordenada al origen; R^2: grado de ajuste de la ecuación. E: valor estimado; p: p-value.

P	Ambos		Bellocq		Inchausti		Dummy
	E	p	E	p	E	p	p
F	43,86	<0,01	227,30	<0,01	255,00	<0,01	---
a	0,031	<0,01	0,033	<0,01	0,029	<0,01	0,33
b	1,12	<0,01	0,56	<0,05	1,67	<0,01	<0,05
R^2	0,85		0,99		0,99		---

5.6.3. Comparación de metodologías

Las ecuaciones generadas utilizando isotermas de adsorción e incubación de pastas de saturación para estimar CaExt ante el agregado de fertilizante cálcico mostraron diferencias en la pendiente de la regresión (Tabla 5-5). Las isotermas estimaron mayores incrementos de CaExt ante el uso de fertilizantes cálcicos que los valores estimados por la incubación de pastas de saturación. Estos resultados indicarían que los niveles iniciales de CaExt podrían ser estimados por ambas metodologías, pero que las isotermas de adsorción sobreestimarían los valores reales de CaExt. En este sentido, el CaExt debiera estimarse utilizando incubaciones de pastas de saturación para lograr valores más exactos en relación con los valores reales en el suelo.

Tabla 5-5. Estadísticos asociados a las regresiones lineales para la estimación de los valores de calcio soluble-disponible (CaExt) en suelos, diferenciadas según metodología utilizada. Isotermas: isotermas de adsorción. Pasta: incubación de pasta de saturación. Dummy: comparación entre parámetros estimados por las metodologías utilizando variables dummy. P: parámetro estadístico. F: ANOVA de regresión; a: pendiente de la ecuación; b: ordenada al origen; R^2: grado de ajuste de la ecuación. E: valor estimado; p: p-value.

P	Isotermas		Pasta		Dummy
	E	p	E	p	p
F	359,4	<0,01	43,86	<0,01	---
a	0,041	<0,01	0,031	<0,01	<0,05
b	1,89	<0,01	1,12	<0,01	0,68
R^2	0,98		0,85		---

5.7. DISCUSIÓN

El objetivo de este capítulo fue evaluar metodologías de laboratorio para 1) estudiar la dinámica de adsorción y desorción de Ca en suelos hapludoles de Buenos Aires y 2) predecir los valores de CaExt alcanzados luego la aplicación de diferentes dosis de fertilizantes cálcicos. Los principales resultados mostraron que las isotermas de adsorción se ajustan con elevados coeficientes de ajuste al comportamiento de Ca soluble en suelos ante el agregado de fertilizantes cálcicos, siempre y cuando se estudie individualmente el fenómeno de adsorción y desorción. La adsorción de Ca en los suelos se ajustó a las isotermas de Freundlich, Tempkin y/o Van Huay, sugiriendo el mismo comportamiento en los suelos de Bellocq e Inchausti. Estos resultados podrían deberse a la similitud de los suelos analizados (Imbellone et al., 2010). El coeficiente de ajuste encontrado en las isotermas fue similar al reportado por Marcano-Martinez y McBride (1989), estudiando el fenómeno de adsorción de Ca en suelos de Brasil con la isoterma de Freundlich. La

desorción de Ca, por su parte, se logró explicar con elevados coeficientes de ajuste utilizando las isotermas de Tempkin y/o Van Huay, pero siendo necesario generar ecuaciones diferentes para cada suelo. La isoterma de Freundlich se considera tradicionalmente más idónea para el estudio de los cationes en el suelo (Kassa et al., 2019), pero el ajuste de las isotermas de Tempkin y Van Huay demostrarían una gran potencialidad para el estudio de Ca en los suelos de la RP. Por otro lado, la metodología de incubación de pastas de saturación mostró elevados coeficientes de ajuste con una ecuación de regresión lineal simple para predecir el comportamiento de CaExt ante el uso de fertilizantes cálcicos, siendo necesario generar una ecuación individual para cada suelo. El incremento en los valores de CaExt ante el agregado de fertilizante están en línea con lo mencionado por Álvarez et al. (2013) y Bachmeier et al. (2013) quienes mencionan que los fertilizantes incrementan los valores de los nutrientes en la fracción soluble-disponible del suelo. En comparación, las isotermas mostraron mayores valores de CaExt que los medidos en las pastas de saturación con las mismas dosis de fertilizantes utilizados. En este sentido, los resultados sugieren que la incubación de pastas de saturación de suelos sería la metodología más adecuada para predecir los valores de CaExt alcanzados ante el uso de fertilizantes en suelos de la RP, puesto que las isotermas sobreestimarían los valores reales de CaExt. La mayor relación suelo:agua utilizada en la metodología de pastas de saturación (aproximadamente 2:1) explicaría con mayor exactitud los valores de CaExt reales en los suelos, puesto que son situaciones similares a las encontradas en situaciones de campo (Bolt et al., 2013; IRAM-SAGyP, 2021a). Siendo que en la RP se han encontrado respuestas positivas en la producción de MS en soja ante el uso de fertilizantes cálcicos, que no existen curvas calibradas de respuesta para cultivos extensivos en estos suelos y que en Capítulo 3 de esta tesis se encontraron respuestas positivas en la producción de MS en soja forrajera ante el incremento de Ca en SCR, la calibración de metodologías que cuantifiquen los valores de CaExt alcanzados en suelos de la RP ante el uso de fertilizantes cálcicos es útil para definir dosis ajustadas de fertilizantes cálcicos que permitan incrementar la producción de MS en los cultivos forrajeros, eficientizar el uso de los recursos naturales y mitigar la generación de balances negativos de nutrientes en suelos de la RP, siendo una de las principales causas del desabastecimiento de bases en estos sitios (Abbona, 2017; Sainz Rozas et al., 2019).

El fenómeno de adsorción de Ca en los suelos de Bellocq e Inchausti ocurrieron con elevadas dosis de fertilizante cálcico, ajustando el comportamiento a las isotermas de Freundlich, Tempkin y Van Huay con elevados coeficientes de ajuste, pero que no mostraron sensibilidad para diferenciar el patrón de adsorción entre los suelos. La adsorción

de Ca se generó a partir de valores de Ca en equilibrio de 8 meq l^{-1} en Bellocq y 15 meq l^{-1} en Inchausti, equivalentes a 125 kg ha^{-1} y 350 kg ha^{-1} de Ca, respectivamente. La mayor dosis necesaria para generar adsorción de Ca en Inchausti respecto a Bellocq podría deberse a los mayores niveles iniciales de CaExt y a la mayor capacidad buffer del suelo. La capacidad buffer se asocia principalmente a los valores de MO, CIC, CaCIC y arcilla que en su mayoría fueron mayores en Inchausti que en Bellocq (Navarro Blaya y Navarro García, 2003; Alconada Magliano et al., 2015). Las elevadas concentraciones necesarias para genera adsorción en los suelos evidenciaría que las isotermas de adsorción no serían una herramienta adecuada para definir dosis de fertilizantes en suelos hapludoles de la RP, siendo cantidades de nutrientes elevadas en comparación con los planteos de fertilización adoptados estos sitios (Ciarlo et al., 2018; CIAFA, 2023). Sin embargo, el comportamiento de adsorción de Ca en los suelos se ajustó a las isotermas de Freundlich, Tempkin y Van Huay con elevados coeficientes de ajuste. El ajuste con la isoterma de Freundlich fue esperable puesto que se ha mencionado como la isotermas que permite realizar estudios en cationes del suelo y es la isoterma que ajustó al comportamiento de Ca en suelos de Brasil (Marcano-Martinez y McBride, 1989; Kassa et al., 2019). Sin embargo, el ajuste con las isotermas de Tempkin y Van Huay es un hallazgo sin precedentes en la bibliografía. El ajuste con la isoterma de Tempkin se asociaría a que el intercambio podría estar gobernado por energías calóricas de sorción, que definirían los procesos de adsorción a la CIC en los suelos estudiados (Foo y Hameed, 2010). Paralelamente, el ajuste de Van Huay sugeriría que existe elevada heterogeneidad de los coloides en estos suelos (Imbellone et al., 2010). Paralelamente, Limousin et al. (2007) y McBride (2000) mencionan que los modelos de Freundlich y Van Huay corresponden al tipo “L” que indica una saturación progresiva de los sitios de adsorción y manifiesta una elevada afinidad del Ca con los coloides del suelo. La saturación progresiva se explicaría por un reemplazo de Ca por otros cationes presentes en los sitios de adsorción, siendo que el ión Ca posee una mayor afinidad de unión a los coloides respecto como Mg y K (Fassbender y Bornemisza, 1987; Bohn et al., 1993; McBride, 2000). En estos suelos se descartan reducciones significativas en las cargas de los coloides por modificaciones del pH y acomplejamientos entre la MO, el Fe y el Al cómo puede suceder en suelos tropicales (Zapata Hernández, 2006). Por otro lado, la bondad de ajuste encontrada con la isoterma de Van Huay fue superior a la reportada por Kenyanya (2015) y Kassa et al. (2019) utilizando este mismo modelo para K en suelos productivos de Kenya y Etiopía, respectivamente. A pesar de ello, ninguna de las isotermas permitió diferenciar el comportamiento entre los suelos. La similitud en los parámetros de las ecuaciones entre Bellocq e Inchausti podrían deberse a la semejanza en la textura y en la

familia taxonómica (USDA, 2014). Los resultados demostraron que las isotermas podrían ser una herramienta útil para estudiar el comportamiento de la adsorción de Ca ante elevadas dosis, pero será relevante continuar el estudio en otros suelos y concentraciones para comprobar la utilidad y el ajuste de las diferentes isotermas para explicar la dinámica de Ca ante su agregado al suelo (Foo y Hameed, 2010).

Los estudios relacionados con la adsorción de Ca en suelos de la RP podrían ser útiles para caracterizar los suelos. En este trabajo se encontraron isotermas que alcanzaron valores de ajuste similares a los modelos reportados por Marcano-Martinez y McBride (1989) en suelos de Brasil, quienes ajustaron el comportamiento del Ca soluble con la isoterma de Freundlich. En comparación, la concentración de Ca en el equilibrio en los suelos de Brasil, cuando no se genera adsorción/desorción, fue menor a los estudios realizados en este trabajo. En Brasil la concentración de equilibrio tiende a ser cercana a la ausencia de Ca en solución, mientras que en los suelos de Argentina estos valores se estimaron entre 8 y 15 meq l^{-1} para los suelos de Bellocq e Inchausti, respectivamente (Marcano-Martinez y McBride, 1989). La diferencia encontrada se asocia con la mayor concentración de Ca que poseen los suelos hapludoles de Buenos Aires respecto a los suelos de Brasil, explicado fundamentalmente por el material parental que originaron los suelos y a los procesos pedogenéticos ocurridos, que han establecido las principales características edáficas que condicionan los niveles de Ca (Zapata Hernández, 2006; Imbellone et al., 2010). Estos valores caracterizan los suelos de la RP que poseen elevadas condiciones de fertilidad para el crecimiento de cultivos. Asimismo, los suelos oxisoles de Brasil respecto a los hapludoles estudiados de Argentina difieren en los valores de pH, CO, CIC, cationes, densidad aparente, que son los principales parámetros edáficos que determinan la concentración de Ca soluble según varios autores (Leao et al., 2006; Wilson et al., 2013; Safadoust et al., 2014; Emamgolizadeh et al., 2015; Kim y Kim, 2015). Por otro lado, la mayor tasa de adsorción de Ca en suelos de Argentina se asociaría con la mayor capacidad de retención de Ca que poseen los suelos hapludoles. Estas características se asocian principalmente a la cantidad y tipo de coloides presentes en el suelo, que determinan la capacidad buffer, y a los tipos y concentraciones de cationes presentes que dominan el equilibrio. A título de ejemplos, las arcillas caoliníticas de los suelos de Brasil se caracterizan por tener menor densidad de cargas y ser de cargas variables ante cambios en el pH y/o adsorción de cationes, mientras que las arcillas illíticas que se encuentran presentes en los suelos hapludoles de Buenos Aires, Argentina, tienen una mayor densidad de cargas y una menor variación de ellas respecto a cambios en pH y/o adsorción de cationes (Zapata Hernández, 2006; Imbellone et al., 2010). Paralelamente, en los suelos de

Argentina no se encuentran cantidades elevadas de Al soluble como en algunos suelos de Brasil y Colombia, siendo el Ca el elemento que mayor afinidad tendría en la adsorción según series liotrópicas establecidas por algunos autores (Fassbender y Bornemisza, 1987; Bohn et al., 1993). Estos resultados indicarían que las isotermas podrían ser utilizadas para entender el comportamiento del Ca en distintos suelos del mundo y comparar la dinámica y niveles de fertilidad en ellos. Sin embargo, serán de utilidad cuando se utilicen concentraciones que generen adsorción en suelo y será necesario seguir estudiando cómo afectan los parámetros de las ecuaciones en el rendimiento de los cultivos.

Las aplicaciones de dosis menores a 100 kg Ca ha^{-1}, que produjeron desorción de Ca en ambos suelos, se ajustaron a las isotermas de Tempkin y Van Huay con elevados coeficientes de ajuste, pero fue necesario ajustar ecuaciones individuales para cada suelo. La desorción generada en estas concentraciones se explicaría por la elevada concentración de CaCIC y la baja relación suelo:solución utilizada en la metodología que habría generado una desorción de Ca desde CaCIC (McBride, 2000; Pannu et al., 2003; Kassa et al., 2019). El ajuste de la isoterma de Tempkin, al igual que en condiciones de adsorción, se asoció con su fundamento basado en principios de energía calórica de sorción, que también podrían gobernar los procesos de desorción de Ca en los suelos de la RP; mientras que el ajuste con la isoterma de Van Huay se explicaría en base a la elevada heterogeneidad de los coloides en estos suelos (Foo y Hameed, 2010; Imbellone et al., 2010). La falta de ajuste de la isoterma de Langmuir se asociaría a que presupone una monocapa de sitios de cargas, situación que no se encontraría en los suelos caracterizados por la elevada densidad y heterogeneidad de los coloides (Alí et al., 2013). Paralelamente, los resultados encontrados en este trabajo sugerirían que la isoterma de Freundlich, considerada tradicionalmente la isoterma que mejor explica los procesos de cationes en suelo, podría ser de utilidad solamente en procesos de adsorción de Ca, puesto que en estudios de desorción no logró ajustarse al comportamiento (Kassa et al., 2019). En relación con las isotermas ajustadas al proceso de desorción en los suelos estudiados, la isoterma de Van Huay demostró mayor sensibilidad para diferenciar el comportamiento entre los suelos de Bellocq e Inchausti que la isoterma de Tempkin. La isoterma de Van Huay permitió diferenciar las pendientes de las ecuaciones, indicando mayores valores en el suelo de Bellocq que en Inchausti, puesto que los parámetros de la regresión permiten estudiar el comportamiento de los nutrientes en el suelo (Limousin et al., 2007). Estos resultados indicarían que se incrementaría en mayor medida el CaExt en suelos de Bellocq e Inchausti ante el agregado de las mismas dosis de fertilizantes, situación que podría explicarse por la densidad de coloides. El suelo de Bellocq tuvo menores concentraciones de coloides que

Inchausti, que podría haber generado una menor retención del Ca agregado, y, en consecuencia, un mayor incremento de CaExt (Alconada Magliano y Lanfranco, 2020). Sin embargo, la menor retención de los cationes agregados por el suelo de Bellocq implicaría que podrían perderse por lixiviación en caso de no ser absorbidos rápidamente por las raíces de las plantas, siendo necesario aplicar fertilizantes en dosis y momentos donde los cultivos puedan absorberlos rápidamente (Vázquez y Pagani, 2015). La ecuación de Tempkin, sin embargo, permitió diferenciar los valores independientes de las ecuaciones, al igual que la isoterma de Van Huay. Los valores independientes de las ecuaciones podrían relacionarse con los niveles de CaExt inicial en suelo, siendo que sería el punto de equilibrio donde no se generaría adsorción o desorción de Ca en suelo ante su agregado. Estos resultados indicarían que ambas isotermas estudiadas permitirían diferenciar condiciones iniciales de fertilidad de Ca en los suelos. En la actualidad se carecen de estudios que evalúen la dinámica del Ca soluble ante el agregado de dosis de fertilizantes capaces de ser incorporadas a los planteos productivos de la RP y estos resultados son importantes para entender cómo la dinámica del Ca en el suelo y permitirá generar criterios para la utilización de estos productos en suelos donde los niveles de bases se encuentran en disminución (Presutti, 2016; García y Presutti, 2018).

La incubación de pastas de saturación de suelos de Bellocq e Inchausti evidenció un ajuste lineal entre el CaExt y la dosis de fertilizante agregada en los suelos, mostrando sensibilidad solamente para diferenciar los niveles de CaExt iniciales en suelo y mostrando menores valores estimados de CaExt en relación con los valores estimados por las isotermas. El patrón lineal encontrado con la incubación de pastas de saturación se asoció con la naturaleza del intercambio ante el agregado de Ca soluble en suelo, coincidiendo con los autores que mencionan que los fertilizantes incrementan los nutrientes en la fracción soluble-intercambiable (Bolt et al., 2013; Zubillaga y Ciarlo, 2015). Las pastas de saturación permitieron diferenciar los valores estimados de la ordenada al origen, que en Inchausti fueron mayores respecto a Bellocq y se relacionaría con los mayores niveles iniciales de Ca soluble en el suelo de Inchausti. En la medida que existan mayores valores de CaCIC y CaExt en el suelo es esperable que se incrementen los valores de CaExt ante el agregado de agua, puesto que el CaExt es repuesto por la concentración de CaCIC ante su disminución en el suelo por absorción por las plantas o lixiviación (Alconada Magliano y Lanfranco, 2020). Sin embargo, las pastas de saturación no mostraron diferencias entre la tasa de incremento de CaExt ante el uso de fertilizante entre los suelos (pendiente de la ecuación). En este sentido, las isotermas de adsorción podrían ser más sensibles que las pastas de saturación para estudiar las diferencias relacionadas con la capacidad buffer del

suelo, que estarían gobernada principalmente por la CIC, CaCIC y arcilla (Bolt et al., 2013; Alconada Magliano et al., 2015). Sin embargo, las isotermas de adsorción estimarían mayores valores de CaExt que las pastas de saturación ante el agregado de la misma dosis de fertilizante, puesto que los resultados mostraron mayores valores en la pendiente y en ordenada al origen de la ecuación predictiva de CaExt con las isotermas respecto a las pastas de saturación. Este comportamiento se asociaría a que la metodología de isotermas de adsorción implica el uso de una matriz con elevada concentración de KCl que habría favorecido el intercambio entre CaCIC y K agregado, que habría primado por sobre la baja relación suelo:líquido utilizada en la metodología, y a pesar de la mayor afinidad de atracción de Ca respecto a K en el intercambio (Fassbender y Bornemisza, 1987; Bolt et al., 2013; IRAM-SAGyP, 2021a). En este marco, se consideraría que la herramienta más apropiada para la determinación de dosis de Ca para los planteos de fertilización cálcica en suelos de la RP sería la medición directa en extracto de pasta de saturación luego del agregado de fertilizante. Los resultados encontrados en este trabajo validarían la posibilidad de desarrollar un estudio acerca del comportamiento del Ca en la RP, similar al realizado en otros nutrientes y suelos del mundo (Beckett, 1964; Marcano-Martinez y McBride, 1989; Samadi, 2006; Onana et al., 2016). Esta información podría ser utilizada para ampliar la base cognitiva y realizar recomendaciones de fertilización cálcica en sitios cada vez más deficientes en este elemento debido a las actividades antrópicas y donde aún no se considera incorporar Ca como fertilizante en los planteos productivos (Ciarlo et al., 2018; Sainz Rozas et al., 2019; CIAFA, 2023). Asimismo, de continuar con el desabastecimiento de Ca en los suelos por los balances negativos podría, en un futuro, implementarse el uso de isotermas para definir dosis de fertilización cálcica al igual que en suelos de Brasil, caracterizados por su baja concentración de Ca.

5.8. CONCLUSIONES PARCIALES

Las isotermas de adsorción permiten estudiar la dinámica de adsorción y desorción del Ca en suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires ante el agregado de fertilizante cálcico, pero sobreestiman los valores de CaExt alcanzados ante el agregado de fertilizantes cálcicos. La incubación de pastas de saturación es la metodología más adecuada para estimar los niveles de CaExt ante el agregado de fertilizantes cálcicos.

5.9. CONCLUSIONES RELEVANTES PARA OTROS CAPÍTULOS

Es relevante conocer los niveles de CaExt alcanzados con diferentes dosis de fertilizante cálcico mediante la incubación de pasta de saturación puesto que puede explicar las respuestas encontradas en los cultivos y permitirá ajustar las dosis de fertilizante en suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires.

Capítulo 6

-

Fertilizantes y correctores cálcicos en soja forrajera en suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires

La información de este Capítulo ha sido publicada en:

Ferro, Daniel A.; Merani, Víctor H.; Millán, Guillermo; Larrieu, Luciano; Mur, Matilde; Cinquetti, Tatiana; Guilino, Facundo; Zanardi, Maria Florencia; Paradela, Marcial Pablo; Pereira, Esteban; Donadelli, Maria Clara, Imaz, José Augusto. 2024. Fertilizantes y enmiendas cálcicas en soja forrajera sobre molisoles de Buenos Aires, Argentina. Revista Argentina de la Ciencia del Suelo 42(1): 14-28. AACS. Referato: SI.

6.1. SINAPSIS

En el Capítulo 2 se hizo mención que en la actualidad se discute cuáles serían las principales limitantes relacionadas con la fertilización cálcica y acidificación en suelos molisoles de la Región Pampeana (RP). Por un lado, se han reportado respuestas en cultivos al agregado de fertilizantes cálcicos, sugiriendo deficiencia en este elemento; mientras que por otro lado se han reportado respuestas de cultivos ante el agregado de correctores básicos, sugiriendo limitantes en la producción debido a las consecuencias de los bajos valores de pH en los suelos. Sin embargo, los estudios reportaron resultados variables con el uso de fertilizantes y correctores cálcicos en suelos de la RP, evidenciando una falta de información para interpretar la problemática en un sentido más amplio. Por otro lado, el Capítulo 3 demostró que la soja puede incrementar la producción de MS con el agregado de fertilizante cálcico si los valores iniciales de calcio (Ca) en solución en contacto con las raíces (SCR) son inferiores a 2 meq l^{-1}. El efecto de Ca en SCR se considera análogo a los efectos de CaExt, puesto que en ambas soluciones el Ca se encuentra libre y disponible para ser absorbido por las plantas, y demostraría que el CaExt podría ser un indicador adecuado para el diagnóstico de suficiencia cálcica en el cultivo de soja forrajera. En el Capítulo 4 se logró estimar los valores de CaExt en suelos de la RP a partir de otros parámetros conocidos de los suelos, cuyas referencias se desconocían. Posteriormente, en el Capítulo 5, se generaron herramientas que permiten relacionar las dosis de fertilizante cálcico agregado con los valores de CaExt generados en los suelos. En este contexto, este capítulo pretende evaluar comparativamente el uso de correctores y fertilizante cálcicos en suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires sobre el cultivo de soja con fines forrajeros y sus efectos sobre las propiedades químicas y el balance de Ca en suelo. Estos estudios permitirán generar información para intentar interpretar con mayor certeza el efecto de los distintos productos cálcicos sobre cultivos extensivos, propiedades del suelo y balance de calcio en suelos de la RP.

6.2. INTRODUCCIÓN ESPECÍFICA

Los suelos de la RP han reducido su concentración en bases y se han acidificado, principalmente, por la extracción de nutrientes sin reposición por actividades agropecuarias y el uso excesivo de fertilizantes de alto índice de acidez (Vázquez y Millán, 2017; Sainz Rozas et al., 2019). La acidificación impacta negativamente en las propiedades químicas del suelo (disponibilidad de N, P, Ca, Mg y micronutrientes), en propiedades físicas y en propiedades microbiológicas que pueden limitar la producción de los cultivos (Zapata Hernandez, 2004; Vázquez y Pagani, 2015). Asimismo, la reducción del pH del suelo puede reducir la CIC y, en consecuencia, la capacidad de retener las bases disponibles (Millán et al., 2010).

La corrección de suelos acidificados se realiza incorporando correctores básicos al suelo. Los correctores tienen como objetivo incrementar el pH del suelo, y los productos más utilizados son la caliza/calcita/conchilla o dolomita que poseen carbonatos de Ca o Ca y Mg en su composición, respectivamente (Vázquez y Millán, 2017). Los carbonatos se caracterizan por su baja solubilidad y, por ello, se aplican en forma pulverulenta (micrones), en elevadas dosis (>1000 kg ha^{-1}), en forma anticipada (meses antes de la siembra) y, preferentemente, con incorporación al suelo para promover su disolución y reacción (IRAM, 1997; Vázquez y Pagani, 2015). Los efectos de estos productos dependen del poder buffer del suelo que está determinado principalmente por la cantidad y tipos de coloides (Bennardi et al., 2015). El uso de correctores, paralelamente, puede perjudicar la producción de los cultivos por inmovilización temporaria de P y/o aumento de la resistencia a la penetración de los suelos si se aplican en dosis mayores a 2000 kg ha^{-1} (Vázquez et al., 2010; Leon Perez, 2012). La mayoría de estos productos se han utilizado en leguminosas por ser, en general, más sensibles que las gramíneas a suelos acidificados y deficientes en bases (Azcón-Bieto y Talón, 2008; Marschner, 2023). En la RP se han realizado estudios con el uso de estos productos. Quiñonez et al. (2003) encontraron incrementos en MS de alfalfa agregando 2500 kg ha^{-1} de dolomita en suelos de Santa Fe, Vázquez et al. (2010) encontraron incrementos en MS en diferentes cortes de alfalfa ante el agregado de dosis entre 1000 a 2000 kg ha^{-1} en suelos de Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe; Vázquez et al. (2012) encontraron respuestas variadas en soja ante el agregado de diferentes correctores (caliza, dolomita) y dosis (0 a 2000 kg ha^{-1}) en suelos de la provincia de Buenos Aires y Santa Fe; Girón et al. (2016) encontraron respuestas positivas en soja ante el agregado de 1000 kg ha^{-1} de calcita y dolomita en suelos de Villegas y, más recientemente, Machetti (2021) encontraron respuesta en soja en ante el agregado de 1000 a 4000 kg ha^{-1} de

dolomita con yeso en un suelo de Magdalena, mientras que no encontraron respuesta ante el mismo tratamiento en un suelo de La Plata. La variabilidad en los resultados demuestra que la aplicación de correctores básicos en suelos de la RP es una práctica compleja donde intervienen características del producto, del suelo, del clima, de la tecnología y del cultivo (Vázquez, 2007; Machetti, 2021). En este marco, será necesario estudiar el efecto de los distintos correctores sobre los suelos para generar información que permita recomendar el uso de estos productos para lograr incrementar la producción de cultivos, sin comprometer la sustentabilidad de los sistemas.

La fertilización de suelos, a diferencia de los correctores, tienen como principal objetivo incrementar la concentración de cationes básicos en la fracción soluble del suelo para aumentar su disponibilidad para los cultivos (Álvarez et al., 2013; Bachmeier et al., 2013). El uso de fertilizantes cálcicos en Argentina es muy escaso pese a que existen evidencias de respuesta en cultivos de leguminosas por ser, en general, especies más sensibles que los cultivos de gramíneas a la deficiencia de nutrientes básicos, como ya se ha mencionado y demostrado en el Capítulo 3 (CIAFA, 2023; Marschner, 2023). En los suelos de la RP, Fontanetto et al. (2011), Gambaudo et al. (2007) y Vivas y Fontanetto (2003) encontraron incrementos en rendimiento de soja hasta 100 kg Ca ha^{-1} en suelos de Santa Fe, mientras que Girón et al. (2016) no encontraron respuesta en el rendimiento de soja ante la aplicación 50 kg Ca ha^{-1} en suelos de Villegas. Aun así, el conocimiento incipiente acerca de la reducción de bases como Ca en suelos de zonas templadas, implica que el tratamiento de esta problemática vía fertilización sea establecido sobre bases poco científicas. Por tal motivo, será necesario generar información que permita identificar la deficiencia de calcio en suelos de la RP para los cultivos forrajeros y generar herramientas que permitan recomendar dosis ajustadas de fertilizantes cálcicos para lograr incrementar la producción de MS.

El uso de fertilizantes cálcicos podría considerarse una alternativa coyuntural al uso de correctores básicos en sitios deficientes en bases o acidificados de la RP, puesto que podrían generar el mismo efecto sobre el cultivo. La mayor solubilidad de los fertilizantes respecto a los correctores permitiría incrementar más rápidamente los niveles de Ca soluble en suelo, pero así podría generar una menor capacidad del suelo para retener las bases solubles, principalmente en aquellos suelos con bajos contenidos de coloides (Millán et al., 2010; Vázquez y Millán, 2017). Asimismo, en sitios donde la principal limitante sería la baja disponibilidad de Ca soluble, el uso de correctores en forma anticipada podría generar el mismo efecto que el uso de fertilizantes cálcicos sobre los cultivos, puesto que ambos

elevarían los niveles de Ca soluble en suelo, pero el efecto de los productos sobre los parámetros químicos del suelo podría ser diferente (Vázquez y Pagani, 2015). En términos generales, podría considerarse que el efecto del uso de correctores relacionados con la fertilización cálcica demora mayor tiempo para generar modificaciones en el suelo, pero las modificaciones podrían perdurar mayor tiempo respecto al uso de fertilizantes. Paralelamente, la fertilización cálcica de cultivos sería una práctica más fácilmente de adoptar que el uso de correctores básicos en los planteos productivos extensivos de la RP dado que los fertilizantes se aplican en menores dosis, la logística del producto es más sencilla, y existe una mayor cantidad de maquinaria disponibles para su aplicación respecto a los correctores (CAFMA, 2020; CIAFA, 2023). Siendo que los resultados encontrados en el Capítulo 3 de esta tesis sugieren que la soja forrajera incrementaría la producción de MS ante el aumento de CaExt en suelos, será necesario evaluar comparativamente el efecto de fertilizantes y correctores cálcicos sobre los cultivares actuales de soja forrajera, y cuantificar sus efectos sobre las propiedades fisicoquímicas, químicas y en el BCaS de suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires. Estos estudios serán relevantes para generar criterios que permitan recomendar el uso de productos cálcicos en suelos de la RP, colaborando con la sustentabilidad de los sistemas productivos (Sarandón y Flores, 2014).

6.3. OBJETIVO ESPECÍFICO

El objetivo de este capítulo fue evaluar el uso de fertilizante y correctores cálcicos en suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires sobre 1) la productividad y exportación de Ca y Mg en cultivares actuales de soja forrajera, 2) propiedades fisicoquímicas y químicas del suelo y 3) balance de Ca en el suelo.

6.4. HIPÓTESIS ESPECÍFICA

La hipótesis de este capítulo fue que el agregado de fertilizantes cálcicos genera el mismo efecto que el uso de correctores sobre la producción de MS, CCaB, CMgB, ECaB y EMgB de cultivares actuales de soja forrajera; mientras que provoca efectos diferenciales sobre las propiedades fisicoquímicas y químicas del suelo y en el BCaS de suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires.

6.5. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un ensayo en invernáculo con soja forrajera, variedad Macro Seed LDC 8.5 de la empresa SeedEx, sobre los suelos utilizados en el Capítulo 5: Bellocq e Inchausti (Tabla 5-1). Se sembraron 8 semillas de soja en macetas con 3 kg de suelo que fueron raleadas a los 10 días luego de la emergencia para obtener 4 plántulas homogéneas por maceta. Las macetas fueron envueltas en bolsas de plástico para evitar el lixiviado de nutrientes y la percolación de agua. Cada maceta fue regada con agua destilada periódicamente para mantener un contenido hídrico equivalente a 80% de capacidad de campo. Se utilizó un diseño completamente aleatorizado (DCA) con dos factores con interacción (suelo y tratamiento) y tres repeticiones (macetas). Los tratamientos consistieron en aplicaciones de fertilizante y correctores cálcicos al suelo. El fertilizante utilizado fue cloruro de calcio ($CaCl_2$) y la enmienda utilizada fue carbonato de calcio ($CaCO_3$) con partículas menores a 50 µm. El fertilizante se agregó al momento de la siembra y la enmienda se agregó tres meses antes de la siembra sin incorporación al suelo simulando un planteo de siembra directa. Se realizaron cuatro tratamientos: T: testigo (sin aplicación de productos); F50: fertilizante equivalente a 50 kg ha^{-1} de Ca; F100: fertilizante equivalente a 100 kg ha^{-1} de Ca y C1500: equivalente a 1500 kg $CaCO_3$ ha^{-1}. Las dosis de fertilizante se definieron en base las referencias bibliográficas que permitan superar valores de 2 meq l^{-1} de CaExt (Capítulo 3), y que sean acordes a los planteos de fertilización realizados en la RP (CIAFA, 2023). El ajuste de la dosis de fertilizante se realizó en base a la información generada en las incubaciones de pasta de saturación para estos suelos (Capítulo 5). La dosis de fertilizante de 50 kg ha^{-1} de Ca generó valores de CaExt de 2,27 meq l^{-1} en el suelo de Bellocq y de 3,11 meq l^{-1} en el suelo de Inchausti, mientras que la dosis de 100 kg ha^{-1} de Ca generó valores de CaExt de 4,04 meq l^{-1} en Bellocq y 4,74 meq l^{-1} en Inchausti. La dosis de enmienda se correspondió con los valores máximos recomendados para estos suelos según la bibliografía (Vázquez et al., 2010).

El ensayo finalizó a los 50 días después de la siembra cuando las plantas fueron cortadas al ras del suelo. Las muestras del vegetal fueron secadas en estufa a 60°C con circulación forzada de aire hasta peso constante. En planta se midió MS y, luego de lavado del material con agua destilada se midió CCaB, CMgB utilizando como muestra representativa la anteúltima hoja trifoliada. Posteriormente se calculó ECaB y EMgB a través del producto entre la MS y la CCaB y CMgB, respectivamente. Se calculó el BCaS como la diferencia entre la cantidad de Ca agregada a cada unidad experimental y los valores registrados de ECaB. El suelo, una vez seco en estufa a 40°C con circulación forzada, fue molido y

tamizado por 2 mm para su acondicionamiento. Se realizaron análisis por triplicado de: pH actual (pH): relación suelo:agua de 1:2,5, determinación potenciométrica (IRAM-SAGyP, 2021b); conductividad eléctrica en extracto de saturación (CE): conductimetría (IRAM-SAGyP, 2021a); calcio soluble-disponible (CaExt): Ca en extracto de saturación: volumetría de formación de complejos con EDTA (IRAM-SAGyP, 2021a, 2022); CIC y cationes intercambiables: método del acetato de amonio 1N pH 7 (tamponado), determinación de CIC por destilación Kjeldahl (SAMLA, 2004), Ca (CaCIC) y Mg (MgCIC) por volumetría de formación de complejos, K (KCIC) y Na (NaCIC) por fotometría de llama (IRAM-SAGyP, 2022). Posteriormente, se calculó la sumatoria de bases en la fracción soluble-intercambiable (S) mediante la suma de CaCIC, MgCIC, KCIC y NaCIC. Se cuantificó la relación CaCIC S^{-1} y la relación CaCIC CIC^{-1}. Finalmente, se calculó el balance de calcio en suelo (BCaS) mediante la diferencia entre la cantidad de Ca agregado a las macetas en los tratamientos y la ECaB.

Los resultados fueron evaluados estadísticamente por medio de análisis paramétrico de la varianza (ANOVA) con previa comprobación de supuestos básicos. Se realizó una comparación múltiple de Tukey entre los tratamientos que evidenciaron diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$). Se utilizó el software estadístico RStudio® (R Core Team, 2023) y el software Excel® del paquete de Microsoft Office 365 para la confección de los gráficos (Microsoft, 2024).

6.6. RESULTADOS

La Tabla 6-1 muestra los resultados estadísticos de las variables analizadas respecto a los factores del ensayo.

*Tabla 6-1. Estadísticos ANOVA de resultados de variables de materia seca (MS), concentración de calcio en biomasa (CCaB), concentración de magnesio en biomasa (CMgB), exportación de calcio (ECaB), exportación de magnesio (EMgB) en planta de soja; pH, conductividad eléctrica (CE), calcio soluble-disponible (CaExt), calcio soluble-intercambiable (CaCIC), magnesio soluble-intercambiable (MgCIC), potasio soluble-intercambiable (KCIC), relación entre suma de bases intercambiables y capacidad de intercambio catiónico (S CIC^{-1}), relación entre calcio soluble-intercambiable respecto a sumatoria de bases intercambiables (CaCIC S^{-1}) y relación entre calcio soluble-intercambiable y capacidad de intercambio catiónica (CaCIC CIC^{-1}) de los suelos y balance de calcio en suelo (BCaS) respecto la interacción tratamiento*cultivo, al factor tratamiento y factor suelo del ensayo en invernáculo.*

Muestra	Variables	Tratamiento*Suelo		Tratamiento		Suelo	
		F	p	F	p	F	p
Planta	MS	0,59	0,63	3,53	<0,05	10,08	<0,01
	CCaB	0,60	0,63	1,92	0,17	12,70	<0,01
	CMgB	2,38	0,10	0,82	0,50	5,84	<0,05
	ECaB	0,96	0,43	4,74	<0,05	0,66	0,43
	EMgB	1,35	0,29	2,70	0,08	14,60	<0,01
Suelo	pH	24,38	<0,01	---	---	---	---
	CE	1,53	0,25	11,51	<0,01	12,33	<0,01
	CaExt	2,44	0,10	21,66	<0,01	226,4	<0,01
	CIC	2,67	0,08	1,79	0,19	1512,06	<0,01
	CaCIC	1,91	0,16	0,68	0,57	1224,48	<0,01
	MgCIC	1,04	0,40	0,83	0,50	30,90	<0,01
	S CIC^{-1}	0,77	0,53	2,55	0,09	10,23	<0,01
	CaCIC S^{-1}	2,31	0,11	0,76	0,53	7,57	<0,05
	CaCIC CIC^{-1}	4,50	<0,05	---	---	---	---
Balance	BCaS	0,96	0,44	1843,55	<0,01	0,66	0,43

6.6.1. Planta

La producción de MS de soja mostró diferencias entre tratamientos y entre suelos (Figura 6-1). El F100 mostró un incremento solamente respecto a T en un 32%, pero sin mostrar diferencias con F50 y C1500. El T, F50 y C1500 fueron similares en la producción de MS. El suelo de Inchausti incrementó la MS en un 20% respecto al suelo de Bellocq.

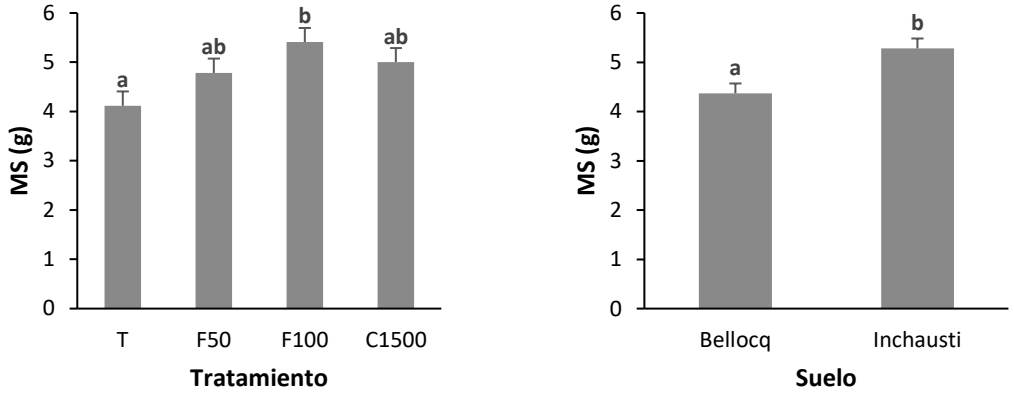


Figura 6-1. Materia Seca (MS) de soja por maceta según tratamiento (izquierda) y suelo (derecha). T: testigo; F50: 50 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante; F100: 100 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante y C1500: 1500 kg ha^{-1} de corrector. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos o suelos (p<0,05).

La CCaB y CMgB en soja mostraron diferencias solamente entre suelos (Tabla 6-2). El CCaB de soja fue mayor en Bellocq que en Inchausti. En contraposición, el CMgB de soja fue mayor en Inchausti que en Bellocq.

Tabla 6-2. Concentración de calcio en biomasa (CCaB) y concentración de magnesio en biomasa (CMgB) en soja respecto a los suelos. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre suelos para un mismo nutriente (p<0,05).

Suelo	CCaB		CMgB	
	(%)			
Bellocq	1,33	b	0,55	a
Inchausti	1,15	a	0,63	b

La ECaB se diferenció solamente entre tratamientos, mostrando una mayor extracción de F100 respecto a T (Figura 6-2, izquierda). La ECaB fue similar entre T, F50 y C1500. El patrón de comportamiento de ECaB fue similar al comportamiento de la producción de MS (Figura 6-1, izquierda). Por otro lado, la EMgB se diferenció solamente entre suelos. Inchausti incrementó la exportación de Mg en un 40% respecto a Bellocq (Figura 6-2, derecha). El patrón de comportamiento en la extracción de Mg fue similar al patrón observado en la producción de MS y a patrón en el contenido de Mg en soja entre los suelos (Figura 6-1, derecha, y Tabla 6-2, respectivamente).

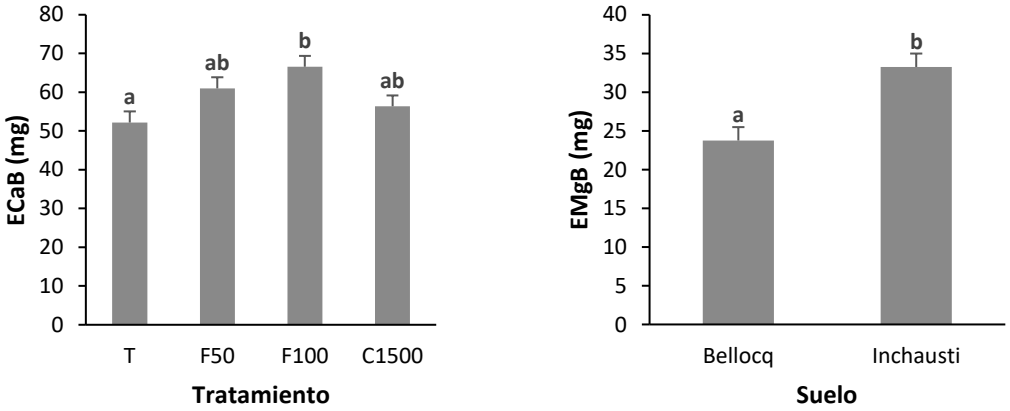


Figura 6-2. Exportación de calcio en biomasa de soja (ECaB) por maceta según tratamiento (izquierda) y exportación de Mg en soja (EMgB) por maceta según suelo (derecha). T: testigo; F50: 50 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante; F100: 100 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante y C1500: 1500 kg ha^{-1} de corrector. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos o suelos (p<0,05).

6.6.2. Suelo

El pH mostró interacción tratamiento*suelo (Figura 6-3). El tratamiento C1500 incrementó el pH de ambos suelos a valores superiores respecto a los otros tratamientos en un 11% en Bellocq y un 5% en Inchausti. Los restantes tratamientos en Inchausti tuvieron un pH superior a los mismos tratamientos en Bellocq.

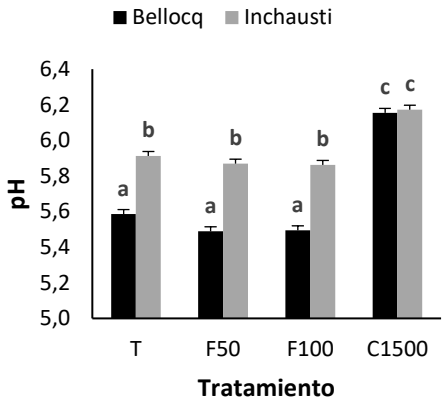


*Figura 6-3. Valor de pH en los diferentes tratamientos y suelos. T: testigo; F50: 50 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante; F100: 100 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante y C1500: 1500 kg ha^{-1} de corrector. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en la interacción tratamiento*suelo (p<0,05).*

La CE mostró diferencias entre tratamientos y entre suelos (Tabla 6-3). El F50 y F100 mostraron un incremento respecto a T y C1500 en los valores de CE. A su vez, T y C1500 no mostraron diferencias entre sí. El suelo de Inchausti arrojó una mayor CE que el suelo de Bellocq. El CaExt, al igual que CE, se diferenció entre tratamientos y suelos (Tabla 6-3). El F100 generó los mayores valores de CaExt, cercanos a 4 meq l^{-1}. Asimismo, el F50 mostró mayores valores de CaExt que T y C1500, que no se diferenciaron entre sí. El suelo de Inchausti tuvo un mayor contenido de CaExt que el suelo de Bellocq en el orden del 120% (3,96 vs 1,79 meq l^{-1}, respectivamente).

Tabla 6-3. Test de Tukey para conductividad eléctrica (CE) y calcio soluble-disponible (CaExt) para los diferentes tratamientos y suelos. T: testigo; F50: 50 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante; F100: 100 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante y C1500: 1500 kg ha^{-1} de corrector. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas dentro de un mismo factor y para una misma variable (p<0,05).

Factor	Nivel	CE (dS m^{-1})		CaExt (meq l^{-1})	
Tratamiento	T	0,42	a	2,27	a
	F50	0,55	b	3,06	b
	F100	0,61	c	3,75	c
	C1500	0,43	a	2,44	a
Suelo	Bellocq	0,46	a	1,79	a
	Inchausti	0,55	b	3,96	b

La CIC, CaCIC y MgCIC se diferenciaron solamente entre suelos, sin efectos por los tratamientos (Tabla 6-4). En la totalidad de los casos, Inchausti tuvo mayores valores que Bellocq en el orden del 100%. La relación S CIC^{-1} y CaCIC S^{-1} mostraron diferencias entre suelos (Tabla 6-4). El suelo de Inchausti mostró mayores valores en S CIC^{-1} (0,88 vs 0,80) y CaCIC S^{-1} (0,61 vs 0,55) que el suelo de Bellocq.

Tabla 6-4. Test de Tukey para capacidad de intercambio catiónica (CIC), calcio soluble-intercambiable (CaCIC), magnesio soluble-intercambiable (MgCIC), relación entre sumatoria de bases intercambiables y capacidad de intercambio catiónico (S CIC^{-1}) y relación entre calcio soluble-intercambiable y sumatoria de bases intercambiables (CaCIC S^{-1}) para los diferentes suelos en el ensayo en invernáculo. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre suelos para una misma variable (p<0,05).

Suelo	CIC		CaCIC (cmolc kg^{-1})		MgCIC		S CIC^{-1}		CaCIC S^{-1}	
Bellocq	8,66	a	3,73	a	2,51	a	0,80	a	0,55	a
Inchausti	14,63	b	7,88	b	4,30	b	0,88	b	0,61	b

La relación CaCIC CIC^{-1} mostró interacción suelo*tratamiento (Figura 6-4). La CaCIC CIC^{-1} fue similar entre tratamientos de Inchausti, mientras que fue mayor en F100 en Bellocq respecto a T y F50, sin mostrar diferencias con C1500 en el mismo suelo. La totalidad de los tratamientos de Inchausti mostraron mayores valores de CaCIC CIC^{-1} respecto a T y F50 en Bellocq. El F100 en Inchausti no se diferenció de F100 y C1500 en Bellocq.

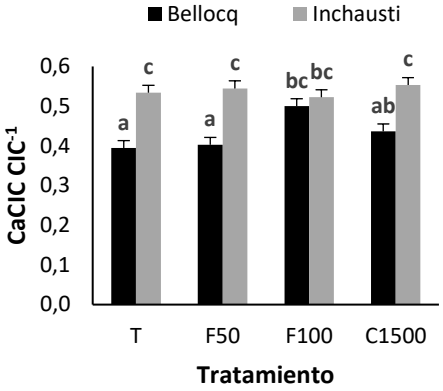


*Figura 6-4. Relación entre calcio soluble-intercambiable y capacidad de intercambio catiónico (CaCIC CIC^{-1}) para la interacción tratamiento*suelo. T: testigo; F50: 50 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante; F100: 100 kg ha^{-1} de Ca con fertilizante y C1500: 1500 kg ha^{-1} de corrector. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas para la interacción tratamiento*suelo (p<0,05).*

6.6.3. BCaS

El BCaS mostró diferencias entre todos los tratamientos (Figura 6-5). Solamente T mostró valores negativos en BCaS. El F50 tuvo valores levemente positivos (4 mg) y el F100 mostró valores cercanos a 64 mg. El C1500 tuvo los mayores valores (726 mg) que superaron ampliamente a los restantes tratamientos, siendo superior a F100 en un 1000%.

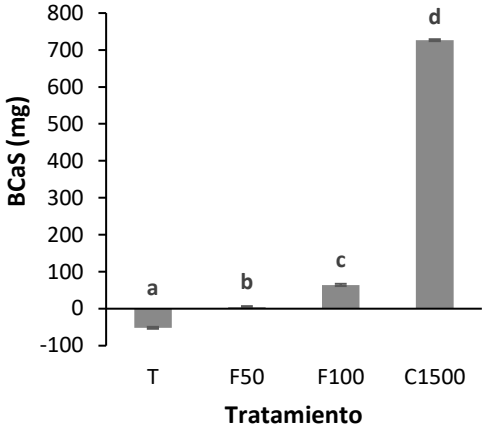


Figura 6-5. Balance de calcio en suelo (BCaS) por maceta según tratamiento. T: testigo; F50: 50 kg ha^{-1} de Ca de fertilizante; F100: 100 kg ha^{-1} de Ca de fertilizante y C1500: 1500 kg ha^{-1} de corrector. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (p<0,05).

6.7. DISCUSIÓN

El objetivo de este capítulo fue evaluar el uso de fertilizante y correctores cálcicos en suelos hapludoles de la provincia de Buenos Aires sobre 1) la productividad y exportación de Ca y Mg en cultivares actuales de soja forrajera, 2) propiedades fisicoquímicas y químicas del suelo y 3) balance de Ca en el suelo. Los principales resultados mostraron que el uso de fertilizantes cálcicos en dosis de 100 kg ha^{-1} de Ca produjo un incremento en la MS de soja forrajera, que podría haber ocurrido debido al incremento de CaExt generado por el fertilizante. Estos hallazgos demuestran la importancia de los la disponibilidad de nutrientes básicos en la fracción soluble del suelo para la producción de cultivos en suelos hapludoles de la RP, principalmente en cultivos actuales de la familia de las leguminosas utilizados para consumo animal (Zubillaga y Ciarlo, 2015; Vázquez y Millán, 2017; Filippi et al., 2021) y coinciden con los autores que observaron incremento en la producción de soja ante el uso de fertilizantes cálcicos en suelos de la RP (Vivas y Fontanetto, 2003; Gambaudo et al., 2007; Fontanetto et al., 2011). Por otro lado, el uso de correctores no produjo incrementos en la producción de MS de soja, a pesar de que generó un incrementó en el pH del suelo, de manera diferencial según el sitio de estudio y condición que podría estar asociada a la diferente capacidad buffer de los suelos (Bennardi et al., 2015). Estos

resultados demostrarían que la principal limitante para la producción de los cultivos podría asociarse mayormente a la disponibilidad de Ca en suelo por sobre los efectos de la acidez y están en línea con los autores que plantean que existiría una interacción específica según producto, suelo, cultivo, clima y tecnología en el uso de correctores en suelos de la RP (Vázquez et al., 2010; Machetti, 2021). En relación con el BCaS, los resultados mostraron que el uso de productos cálcicos ya sea fertilizantes o correctores, genera valores positivos en este parámetro y permitiría que mitigue el desabastecimiento de nutrientes (Sarandón y Flores, 2014; Abbona, 2017). Sin embargo, el BCaS es dependiente de la dosis de Ca agregada y de los niveles de ECaB extraídos, por lo que debiera considerarse las cantidades de producto cálcico agregado y el ECaB a lo largo de una campaña productiva para garantizar la mitigación de los balances negativos de nutrientes (Abbona, 2017). Por otro lado, se observó que el uso de fertilizantes cálcicos generó balances positivos de Ca, a pesar de incrementar los niveles de extracción de este nutriente. Los estudios realizados en esta tesis son importantes para entender la dinámica de nutrientes básicos en suelos hapludoles de la RP y generar herramientas que permitan incrementar la producción de cultivos forrajeros sin comprometer la sustentabilidad de los sistemas, principalmente en sitios donde los niveles de nutrientes básicos en suelo se encuentran en disminución y que incluso han generado acidificación de los suelos (Presutti, 2018; Sainz Rozas et al., 2019).

Las características de los suelos estudiados tuvieron un efecto marcado en algunos parámetros del cultivo y en propiedades del suelo. El suelo de Inchausti mostró mayores valores de MS, CMgB y EMgB, y menores valores CCaB en soja que el suelo de Bellocq; como así también Inchausti mostró mayores valores de CE, CaExt, CIC, CaCIC, MgCIC y relaciones S CIC^{-1} y CaCIC S^{-1} que Bellocq. Los mayores valores de MS en Inchausti se asociarían principalmente con un mejor abastecimiento de nutrientes, posiblemente se podría relacionar con los mayores niveles de CE, CaExt, CIC, CaCIC, MgCIC respecto al suelo de Bellocq. La mayor producción de MS debido a la mayor disponibilidad de nutriente en suelos ha sido reportada por autores que encontraron relación positiva entre la producción de soja y el contenido de Ca en el suelo (Barbieri et al., 2015). Los menores valores de CCaB en Inchausti podrían asociarse con la mayor producción de MS en este suelo, que habría generado una reducción de CCaB. La reducción de CCaB ante el incremento de MS podría haberse generado por un mayor incremento del flujo transpiratorio, que condiciona la tasa de fotosíntesis, respecto al incremento del flujo de Ca hacia la parte aérea de la planta (White y Holland, 2018; Marschner, 2023). Los mayores valores de CMgB en Inchausti respecto a Bellocq, podrían estar asociados al antagonismo entre Ca y Mg en soja, ya sea CCaB o CaExt, mencionado por algunos autores y observado

en Capítulo 3 de esta tesis (Rayar, 1981; Malavolta et al., 1997). Por otro lado, las relaciones S CIC^{-1} y CaCIC S^{-1} no se modificaron con la aplicación de los productos, y sería esperable puesto que los valores de CIC, CaCIC y MgCIC no se vieron afectados por el uso de productos cálcicos, ya sea fertilizantes o correctores. En relación con los indicadores S CIC^{-1} y CaCIC S^{-1}, estos resultados indicarían que estas relaciones no habrían permitido predecir diferencias en el comportamiento de soja ante el uso de diferentes dosis de fertilizante cálcico y/o correctores, coincidiendo con los reportes de los autores que reportan que el uso de indicadores relativos de Ca no sería adecuado para el diagnóstico de la fertilidad química del suelo (Kopittke y Menzies, 2007; Chaganti y Culman, 2018). Estos estudios demuestran que las condiciones iniciales de los suelos de la RP influyen significativamente en los parámetros productivos y dinámica de cationes básicos en el cultivo de soja, como así también demostraron que muchos de ellos no se modifican con el uso de productos cálcicos. Sin embargo, sería esperable que la exportación de cationes sin reposición impacte principalmente de forma negativa en los parámetros de CE, CaExt, CaCIC, MgCIC, y consecuentemente, en S CIC^{-1}, reduciendo la fertilidad de los suelos y, posiblemente, generando acidificación, tal como han reportado varios autores (Presutti, 2018; Sainz Rozas et al., 2019).

La aplicación de productos cálcicos generó diferencias en el pH, CE y CaExt de los suelos. Los valores de pH se incrementaron de manera diferencial según el suelo estudiado solamente con la aplicación de correctores, siendo esperable dada la reacción alcalina que generan los carbonatos en suelo (Vázquez y Pagani, 2015). Asimismo, el incremento de pH fue mayor en Bellocq que en Inchausti ante el agregado de la misma dosis de corrector. Este comportamiento se debe principalmente al poder buffer del suelo, asociado a los coloides presentes, y concuerdan con lo encontrado por algunos autores (Bennardi et al., 2015; Machetti, 2021). El uso de correctores, sin embargo, no incrementó los valores de CaExt o CaCIC del suelo a pesar de incrementar el pH. Esta condición podría deberse a que se aplicaron en forma superficial, simulando un planteo de siembra directa, y en el momento del corte aún no se habría solubilizado todo el producto agregado. Los carbonatos se consideran sales insolubles que deben aplicarse en forma pulverulenta y preferentemente con incorporación para lograr su reacción en suelo, aunque su comportamiento posee una gran dependencia con el producto, suelo, clima, tecnología y cultivo (Vázquez, 2007; Vázquez y Millán, 2017; Machetti, 2021). Por otro lado, el incremento de pH no provocó un incremento en la CIC, condición que podría deberse por la naturaleza de las arcillas illíticas predominantes de carga constante presentes en estos suelos (Imbellone et al., 2010; Millán et al., 2010). Paralelamente, el incremento de pH no

generó una mayor producción de MS de soja, a pesar de que este cultivo podría considerarse una especie a la acidez del suelo (Azcón-Bieto y Talón, 2008). Esta realidad, sin embargo, pudo deberse a que los valores de pH inicial de los suelos no fueron tan bajos como se ha reportado en otros sitios de la RP y será pertinente realizar estudios en suelos con menores valores de pH (Sainz Rozas et al., 2019). En relación con la CE y CaExt, se observó que el uso de fertilizantes cálcicos incrementó los valores de estos parámetros, de forma creciente según la dosis, mientras que los carbonatos no generaron efectos. Estos resultados eran esperables puesto que los fertilizantes cálcicos poseen una mayor solubilidad que los carbonatos, y, en consecuencia, incrementarían los valores de CaExt (Vázquez y Pagani, 2015). Asimismo, están en línea con los autores que mencionan que el principal objetivo buscado del uso de fertilizantes es incrementar los valores en la solución del suelo y así aumentar la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Álvarez et al., 2013; Bachmeier et al., 2013). Paralelamente, la mayor solubilidad de los fertilizantes habría generado el incremento en los valores de CE, puesto que se comportaría como electrolitos en la solución del suelo. Interesantemente el uso de las mayores dosis de fertilizante no superó valores de CE de 2 dS m^{-1}, que podrían limitar el crecimiento de algunos cultivos debido a restricciones osmóticas para la absorción de agua (USDA, 1954; Echeverría y García, 2015). Estos resultados demuestran que el uso de fertilizantes cálcicos y correctores posee un impacto diferencial en parámetros del suelo, y que incluso pueden ser diferentes según dosis de fertilizantes cálcicos y según suelos con el uso de correctores, coincidiendo con los autores que plantean una interacción producto, suelo, cultivo, clima y tecnología en los efectos del uso de carbonatos en suelos de la RP (Vázquez et al., 2010; Machetti, 2021).

El uso de fertilizantes cálcicos generó un incremento en la producción de MS, incrementando ECaB, pero no mostró valores negativos de BCaS. El incremento de MS en soja con el uso de 100 kg ha^{-1} de Ca en forma de fertilizante cálcico podría asociarse con una mejora en la disponibilidad de Ca en las raíces, evidenciada por el aumento de CaExt que generó este tratamiento en el suelo. Asimismo, los incrementos de CaExt que se asociaron con aumentos de MS alcanzaron valores cercanos a los 4 meq l^{-1}, coincidiendo con los resultados obtenidos en el Capítulo 3 de esta tesis, donde se evidenció un incremento en la MS en soja ante aumentos en la concentración de Ca en la SCR por sobre 2 meq l^{-1}. El aumento de la producción de soja ante el uso de fertilizantes cálcicos ha sido reportado por varios autores en suelos de la RP, incluso utilizando las mismas dosis de fertilizante cálcico (Vivas y Fontanetto, 2003; Gambaudo et al., 2007; Fontanetto et al., 2011). Estos resultados avalarían lo mencionado por Zubillaga y Ciarlo (2015) quienes

mencionan que la principal limitante para la producción de MS en los suelos molisoles de la RP podría deberse al desabastecimiento de nutrientes, incluso por sobre el pH del suelo, como así también indicarían que el CaExt podría ser un indicador apropiado para el diagnóstico de la suficiencia cálcica. Por otro lado, la aplicación de fertilizante cálcico en dosis de 100 kg ha^{-1} de Ca incrementó los valores de ECaB. Este comportamiento se asociaría con la mayor producción de MS que generó este tratamiento, puesto que el CCaB no se modificó. El incremento de ECaB podría haber reducido el BCaS, sin embargo, no generó valores negativos que generaría una reducción de los niveles de Ca en suelo. En este sentido, el BCaS fue negativo solamente cuando no se aplicaron productos cálcicos, asociado a la ausencia de incorporación de este elemento al sistema. En los tratamientos donde hubo aplicación de productos el balance fue positivo, incluso en aquellos que se aplicaron menos dosis de fertilizante que fueron cercanos a la neutralidad. Estos resultados, sin embargo, debieran comprobarse a futuro estudiando un ciclo completo (ciclo anual o campaña productiva) para garantizar los balances positivos, dado que de seguir cosechando las mismas plantas de soja o bien cosechar mayor materia seca, el incremento de ECaB asociado podría generar BCaS negativos (Abbona, 2017). En contraposición, se observaron valores negativos de BCaS cuando no hubo aplicación de productos cálcicos, evidenciando el empobrecimiento de los suelos y coincidiendo con los autores que afirman que los suelos molisoles de la RP han reducido su concentración en nutrientes básicos debido a extracción sin reposición de nutrientes (Presutti, 2016; Vázquez y Millán, 2017; Sainz Rozas et al., 2019). La realidad mencionada se asociaría con la escasa medición de los niveles de bases en los laboratorios de la región, que han impedido atender a la reducción en los niveles de nutrientes, siendo en la actualidad una limitante para la producción de los cultivos como se ha observado en estos estudios y mencionan algunos autores (Zubillaga y Ciarlo, 2015; Ciarlo et al., 2018). Asimismo, también se deberá atender a la dinámica de otros nutrientes básicos como Mg y K, que en la actualidad se encuentran en disminución y que incluso se han observado incrementos en la producción de cultivos extensivos ante su aplicación (Ventimiglia, 2022). La información generada es relevante para entender la dinámica de los efectos de uso de productos cálcicos en suelos de la RP y sus efectos en la extracción de nutrientes de los sistemas, principalmente en planteos ganaderos que podrían ser son agravantes en este parámetro por cosechar directamente el tejido vegetal para consumo animal en varios períodos del año (Bender et al., 2015). Asimismo, permitieron valorar que el uso de productos cálcicos permitiría mitigar los efectos negativos de la extracción de bases en los sistemas, con el objetivo de mantener la productividad de los suelos en el tiempo (Sarandón y Flores, 2014).

6.8. CONCLUSIONES PARCIALES

El uso de fertilizantes cálcicos en los suelos hapludoles de la RP incrementa la producción de MS de soja y la ECaB ante incrementos en los niveles de CaExt. Sin embargo, no influyen sobre la CCaB, CMgB y EMgB en soja y sobre propiedades químicas de los suelos como CIC o cationes en la fracción soluble-intercambiable. El uso de correctores básicos incrementa el pH del suelo forma diferencial según el poder buffer del sistema edáfico, pero no mejora los niveles de nutrientes en suelo y, en consecuencia, la producción de MS en soja. Las relaciones entre los niveles de nutrientes básicos en la fracción soluble-intercambiable y la CIC no lograron predecir el comportamiento de la soja ante el agregado de fertilizantes o correctores básicos. El uso de fertilizantes o correctores cálcicos genera un balance positivo de Ca en suelo impidiendo su desabastecimiento, colaborando con la sustentabilidad de los sistemas.

Capítulo 7

-

Discusión y conclusión general.

Futuras líneas de investigación

7.1. SINAPSIS

En el Capítulo 2 se presentaron evidencias de incremento en la producción de MS en cultivos ante el agregado de productos cálcicos en suelos de la Región Pampeana (RP), evidenciando una reducción en la fertilidad natural de los suelos. Paralelamente, se mencionó que actualmente no existen indicadores cálcicos que permitan diagnosticar sitios deficientes en Ca en suelos de la RP y, en ese marco, se propuso utilizar la concentración de calcio soluble-disponible en suelo (CaExt) como potencial indicador de fertilidad cálcica. Siendo que los valores de CaExt en suelos de la RP en la actualidad se desconocen, podrían ser estimados en base a los parámetros de suelos conocidos. Asimismo, los efectos de CaExt podrían ser comparables a los efectos de los niveles de Ca en solución en contacto con las raíces (SCR), pero sería necesario actualizar los estudios de Ca en SCR realizados en soja y raigrás ya que podrían estar desactualizados dado el incremento en los requerimientos nutricionales de los cultivos en los últimos años. En este marco, los capítulos experimentales de esta tesis estudiaron el efecto de distintas concentraciones de Ca en SCR sobre cultivares actuales de soja forrajera y raigrás anual (Capítulo 3), los niveles actuales de CaExt en suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires (Capítulo 4), herramientas metodológicas que se ajusten al comportamiento del Ca soluble ante el agregado de fertilizantes cálcicos (Capítulo 5) y el efecto de fertilizantes y correctores cálcicos en soja forrajera, en parámetros fisicoquímicos y químicos del suelo y en el balance de Ca de suelos hapludoles de Buenos Aires (Capítulo 6). Este último capítulo pretende recuperar e integrar las principales discusiones generadas en los distintos capítulos de esta tesis, mencionar las conclusiones más relevantes y resaltar aquellas áreas que requieren más investigación.

7.2. DISCUSIÓN GENERAL

El objetivo general de esta tesis fue generar criterios para la fertilización cálcica de cultivos forrajeros en suelos molisoles de la Región Pampeana de Argentina, propendiendo a la sustentabilidad de los sistemas productivos. La hipótesis general de esta tesis fue que la fertilización cálcica permite incrementar la producción de cultivos forrajeros en suelos molisoles de la Región Pampeana y mitigar los balances negativos de calcio en suelo, propendiendo a la sustentabilidad de los sistemas productivos. Los principales resultados demostrarían que los suelos de la RP actualmente podrían generar incrementos en la producción de MS de soja forrajera ante el agregado de fertilizantes cálcicos y, paralelamente, generar balances positivos de Ca en suelos molisoles de la provincia de Buenos Aires. Estos resultados sugieren que los suelos de la RP, naturalmente bien dotados de nutrientes, han reducido su fertilidad química a causa de las exportaciones sin reposición por las actividades agropecuarias y que a futuro podrían agravarse si no se comienzan a utilizar productos que incorporen Ca a los sistemas productivos (Sainz Rozas et al., 2019). Sin embargo, es necesario continuar con los estudios para generar criterios según sitios y cultivos que permitan definir dosis y tipos de productos cálcicos a utilizar a modo de generar incrementos en la producción de los cultivos, principal objetivo buscado con el agregado de nutrientes a los suelos, sin comprometer la sustentabilidad de los sistemas (Bachmeier et al., 2013; Sainz Rozas et al., 2019).

En el Capítulo 3 se estudiaron los efectos de Ca en SCR sobre cultivos forrajeros en la RP, permitiendo actualizar los valores de referencia dado que las principales investigaciones habían sido realizadas a mediados del siglo XX (Loneragan y Snowball, 1969; Rayar, 1981). Los principales resultados demostraron que la soja podría haber incrementado la demanda de Ca dado que se encontraron respuestas positivas en la producción de MS en concentraciones mayores a las reportadas por la bibliografía, a diferencia de lo ocurrido con el raigrás. Estos estudios demostrarían que es necesario actualizar los estudios relacionados con la demanda de nutrientes básicos en cultivos, principalmente en leguminosas, siendo que habrían incrementado su potencial de rendimiento asociado a los avances en biotecnología y mejoramiento genético (Ding et al., 2018; Filippi et al., 2021). La generación de información actualizada permitiría definir cultivos que incrementen la producción de MS ante el agregado de fertilizantes cálcicos, mejorando la oferta forrajera para los cultivos y, mayormente, en especies utilizadas con fines de incorporar forrajes de mejor calidad para el consumo animal (Romero, 2005). Sin embargo, estos estudios demostraron que las distintas concentraciones de Ca en SCR

modificaron la exportación de bases en Ca y Mg en soja y raigrás. Estos resultados sugieren que los suelos con mayores contenidos de Ca incluso pueden ser más extractivos en nutrientes. Por tal motivo, es necesario cuantificar los niveles de extracción incluso con el uso de fertilizantes cálcicos en ambos cultivos a modo de definir dosis de productos que permitan generar balances positivos de nutrientes básicos en suelos (Abbona, 2017). Esta consideración es importante puesto que los balances negativos de nutrientes han sido asociados como causa principal del desabastecimiento de bases y pérdida de fertilidad en suelos de la RP (Vázquez y Millán, 2017; Sainz Rozas et al., 2019).

La ausencia de indicadores de fertilidad cálcica en suelos de la RP podría haber colaborado con la reducción de bases en suelos de la RP y la falta de curvas calibradas de respuesta para fertilizantes básicos en cultivos extensivos (Zubillaga y Ciarlo, 2015). Tradicionalmente se ha utilizado la concentración relativa de Ca soluble en suelos y relación entre nutrientes como referencias de fertilidad de nutrientes básicos (Vázquez y Millán, 2017), pero se han realizado recopilaciones bibliográficas que desestimaron el uso de estos indicadores como diagnóstico de fertilidad de nutrientes básicos en suelos (Kopittke y Menzies, 2007; Chaganti y Culman, 2018). En este marco, se propuso el uso de CaExt como posible indicador diagnóstico de suficiencia cálcica en suelos de la RP, dado que los cultivos absorben nutrientes desde la fracción soluble-disponible del suelo, cuyos efectos podrían ser comparables con Ca en SCR, y que esta herramienta ha sido utilizada para generar curvas calibradas de respuesta en cultivos (Loneragan y Snowball, 1969; Zubillaga y Ciarlo, 2015; Marschner, 2023). Los estudios en el Capítulo 6 de esta tesis sugieren que la soja habría incrementado la producción de MS posiblemente a causa de un incremento en los valores de CaExt en suelo por el agregado de fertilizantes cálcicos. Incluso, se asoció el incremento a valores superiores a 2 meq l^{-1} de CaExt, similar al comportamiento observado en el Capítulo 3 para el mismo cultivo. En este sentido, el CaExt podría ser un indicador pertinente para el diagnóstico de la fertilidad cálcica en suelos de la RP, aunque los umbrales de suficiencia debieran ser calibrado para los distintos cultivos dado las diferencias en los requerimientos nutricionales (García y Correndo, 2016). Contar con indicadores y referencias calibradas permitirá identificar suelos de la RP que permitan incrementar la producción de MS ante el agregado de fertilizantes cálcicos.

Considerando que el CaExt podría ser un indicador de suficiencia cálcica en suelos y que se desconocen los valores en suelos molisoles de la RP, en el Capítulo 4 de esta tesis se han generado ecuaciones preliminares que permitirían estimar CaExt a partir de los parámetros conocidos de los suelos de la RP (Ciarlo et al., 2018). Estos estudios podrían

ser útiles para diagnosticar el estado actual de suficiencia cálcicas en suelos de la RP y generar un mapa para determinar zonas con bajas concentraciones de CaExt. Sin embargo, el ajuste de la ecuación demostró que podría haber errores en la exactitud del modelo, siendo necesario continuar con las investigaciones para intentar mejorar la bondad de ajuste de las ecuaciones predictivas en los suelos. Sin embargo, la comprobación del modelo demostró una gran potencialidad para estimar los valores de CaExt. En este sentido, se considera que los estudios debieran continuarse con mayor cantidad de suelos para evaluar el ajuste y el alcance del modelo dado que los resultados podrían indicar que sería factible incrementar el ajuste del modelo original. Por ello, se recomendaría evaluar y seleccionar sitios más homogéneos en los principales parámetros que determinan CaExt, aunque en detrimento del alcance del modelo, para lograr incluso mejores resultados (McBratney et al., 2002). Hasta el momento, se deberá medir directamente CaExt si se pretende utilizar el valor como indicador diagnóstico de fertilidad cálcica en suelos molisoles de la RP y más aún si se utilizarán los valores como indicadores diagnóstico en sitios particulares. Este panorama incluso no generaría mayores inconvenientes dado que el CaExt se mide en el mismo extracto que la CE, parámetro requerido para utilizar el modelo (IRAM-SAGyP, 2021a, 2022). En tanto no se avancen en los estudios, la ecuación generada podría ser útil para generar una caracterización acerca de los niveles de CaExt. Esta información podría ser valiosa para detectar zonas con bajos contenidos de CaExt y realizar estudios principalmente en esos sitios.

En este trabajo se propuso el CaExt como posible indicador diagnóstico de suficiencia cálcica en suelos, pero sería necesario contar con herramientas que permitan definir dosis de fertilizantes cálcicos en base a este parámetro. Por ello, en el Capítulo 5 de esta tesis se evaluaron diferentes metodologías de laboratorio para estudiar el comportamiento del Ca soluble ante el agregado de Ca. Los principales resultados indicaron que los valores de CaExt podrían ser estimados mediante ecuaciones generadas a través de la incubación de pastas de saturación de suelos con diferentes dosis de fertilizantes cálcicos (IRAM-SAGyP, 2021a). En el mismo ensayo se demostró que las isotermas de adsorción permitirían estudiar correctamente la dinámica de adsorción y desorción de Ca ante el agregado de fertilizantes cálcicos en suelos de la RP, pero de utilizar esta metodología se sobreestimarían los valores de CaExt (Beckett, 1964). En este marco, se considera posible ajustar la concentración de KCl utilizada en la metodología de isotermas de adsorción a modo que permita generar un equilibrio de cationes en el suelo de la RP acorde a los valores de cationes solubles. Contar con metodologías de isotermas de adsorción ajustadas permitiría simplificar la evaluación en laboratorio, puesto la mayor facilidad de realización,

y al menor uso de suelo, que posee respecto a la incubación de pastas de saturación. Independientemente de la metodología empleada, conociendo el comportamiento de los cultivos respecto a Ca en SCR, estos estudios serán necesarios para elaborar curvas calibradas de respuesta y definir dosis ajustadas de fertilizante cálcico que permitan incrementar la producción de MS de los cultivos, aumentando la eficiencia en el uso de los productos (Bachmeier et al., 2013; Sarandón y Flores, 2014).

Dado que los estudios relacionados con el uso de productos cálcicos en la RP son escasos, en el Capítulo 6 de esta tesis se comparó el uso de fertilizantes cálcicos y correctores sobre soja forrajera. Los principales resultados demostraron que los incrementos de MS podrían haberse generado debido al incremento de los valores de CaExt causados por los fertilizantes. Siendo que en la actualidad se discute si la principal limitante en suelos de la RP relacionada con la dinámica de cationes básicos es la baja concentración de nutrientes o los efectos negativos de la acidificación, estos estudios indicarían que la reducción de bases estaría limitando el crecimiento de los cultivos, principalmente de leguminosas, dado que el incremento de pH causado por el uso de corrector no aumentó la producción de MS de soja (Zubillaga y Ciarlo, 2015; Marschner, 2023). Sin embargo, dado que el uso de productos cálcicos en suelos de la RP ha demostrado resultados variables según tipo, suelo, cultivo, tecnología y clima, estos ensayos preliminares no serían suficientes para realizar un análisis acabado del tema (Machetti, 2021). Más aún, los valores de CaExt encontrados en todos los tratamientos testigos de los suelos fue mayor a los registrados en la caracterización de los suelos y podrían haber afectado los resultados encontrados. El incremento de CaExt en las macetas se explicaría por la mineralización antrópica generada por la aireación del suelo en su manipulación y al incremento en la temperatura que genera el invernáculo (Alconada Magliano y Lanfranco, 2020). Por tal motivo, las dosis de referencia y los valores de los parámetros se deberán comprobar en situaciones de campo que representen condiciones de mineralización y condiciones hídricas reales, por varios ciclos productivos para atender a la variabilidad climática del sitio. A pesar de que en la actualidad los efectos negativos de la reducción de bases en suelos de la RP y acidificación de suelos no sería la principal limitante para la producción de los cultivos en general, es necesario atender a esta problemática y realizar ensayos que permitan generar criterios para definir el tipo y dosis de productos cálcicos en suelos molisoles de la RP según el suelo y cultivo de interés (Taboada y Álvarez, 2008; Álvarez et al., 2013; Vázquez y Pagani, 2015).

Los escasos estudios encontrados en suelos de la RP donde se observó un incremento en la producción de soja podrían haberse debido al aumento en los valores de CaExt (Vivas y Fontanetto, 2003; Gambaudo et al., 2007; Fontanetto et al., 2011). Siendo que los autores utilizaron dosis de 100 kg ha^{-1} de Ca, similares a las utilizadas en este trabajo en el Capítulo 6, y observando resultados similares, podría especularse que el aumento de CaExt habría causado el incremento de MS. Más aún el uso de 100 kg ha^{-1} de Ca en el Capítulo 6 de esta tesis demostró que se generarían balances positivos de Ca en suelo, impidiendo su reducción a futuro (Abbona, 2017). Estas comparaciones podrían evidenciar que los suelos de la RP han disminuido su concentración en bases y que los efectos negativos de dicho proceso sobre la producción de cultivos podrían compensarse con el uso de dosis de fertilizantes acordes a los planteos de fertilización utilizados en la RP (CIAFA, 2023). Asimismo, el uso de fertilizantes respecto al uso de correctores permitiría que los sistemas productivos adopten más fácilmente la práctica debido a la logística del producto y a la disponibilidad de maquinaria para realizar la labor, incluso pudiendo realizar aplicaciones sitio-específica según los niveles de CaExt en el suelo (CAFMA, 2020; Beneduzzi et al., 2022).

Los estudios realizados en esta tesis podrían colaborar con la generación de indicadores diagnóstico de suficiencia de elementos que, en la actualidad, no se encuentran presentes en los planteos de fertilización de los sistemas productivos (CIAFA, 2023). Además, permiten generar conciencia acerca de la problemática pues, de continuar con esta dinámica, las deficiencias de nutrientes básicos podrían agravarse en el futuro a causa de la mayor extracción de nutrientes que realizan los cultivares actuales, incluso en otros cationes como K y Mg (Ferro et al., 2017; Filippi et al., 2021; Knez y Stangoulis, 2021). Finalmente, los resultados encontrados en esta tesis permitirían valorar el rol de macronutrientes secundarios, la importancia de la concentración de CaExt sobre la producción de los cultivos, la dinámica de los nutrientes en los sistemas y la generación de criterios diagnóstico y de fertilización en cultivares actuales de cultivos forrajeros para disminuir el empobrecimiento de los suelos y colaborar con la sustentabilidad de los sistemas productivos (Sarandón y Flores, 2014).

7.3. CONCLUSIÓN GENERAL

Los resultados encontrados en esta tesis podrían colaborar con la identificación de indicadores para diagnosticar suelos deficientes en calcio, en la cuantificación de los niveles de calcio soluble-disponible en suelos de la Región Pampeana, en el estudio de metodologías para estudiar la dinámica de calcio soluble ante el agregado de fertilizantes cálcicos y en la evaluación de fertilizantes cálcicos en comparación con correctores en suelos hapludoles de Buenos Aires sobre la producción de cultivos forrajeros y su impacto en parámetros fisicoquímicos y químicos del suelo y en el balance de calcio del suelo. En esta tesis se identificó que los estudios en nutrición cálcica de cultivos utilizados en la RP podrían estar desactualizados y que es necesario realizar investigaciones para determinar la demanda actual de nutrientes básicos, se propuso cuantificar el calcio en la fracción soluble-disponible del suelo como potencial indicador de suficiencia cálcica en suelos con resultados prometedores para el cultivo de soja, y se evaluaron metodologías para su estimación en suelos de la RP y estudio ante el agregado de fertilizantes cálcicos. Asimismo, permitirían considerar que los cultivos de la RP podrían incrementar la producción de MS con el agregado de fertilizantes cálcicos, mayormente que, con el uso de correctores básicos, incluso generando balances positivos de calcio en suelo, impidiendo su desabastecimiento a futuro. Estos estudios preliminares colaboran con el conocimiento para el desarrollo de criterios de fertilización cálcica pero no son suficientes para hacer un estudio acabado del tema. La nutrición cálcica y la acidificación es una problemática presente en el ámbito templado argentino que en la actualidad se encuentra en expansión e intensificación, y que compromete la producción de cultivos en la RP. Se debe atender rápidamente a esta problemática pues, de continuar con el planteo de producción, se incrementará la superficie afectada y las consecuencias podrían agravarse. Asimismo, en la medida que las limitaciones por suelos desprovistos en bases o acidificados sean más graves, será más difícil su remediación. Por tales motivos, es necesario realizar un seguimiento de esta problemática y seguir desarrollando herramientas diagnóstico y de manejo calibradas que permitan tomar decisiones acertadas en los sistemas productivos respecto al uso y dosis de fertilizantes y correctores básicos en la RP. Contar con estas herramientas permitirá reducir el impacto negativo de las actividades agropecuarias y colaborar con la sustentabilidad de los suelos, considerado un recurso natural no renovable.

7.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En el transcurso de la tesis realizada se han identificado líneas de investigación que resultan relevantes a ser estudiadas a futuro.

7.4.1. Actualizar estudios de Ca en SCR en cultivos

El estudio en soluciones nutritivas ha permitido comparar resultados entre 2, 10, 18 y 24 meq l^{-1} en soja y raigrás. Se encontraron diferencias en soja entre 2 y 10 meq l^{-1}. A futuro se propone el estudio más intensamente en soja entre las concentraciones de 2 y 10 meq l^{-1} y en concentraciones menores a 2 meq l^{-1} en raigrás. Asimismo, será necesario ampliar estas investigaciones a otros cultivos de interés en la RP, principalmente en cultivos de leguminosas.

7.4.2. Evaluar parámetros relacionados con la producción de granos

Estos estudios se centraron en la evaluación de la nutrición cálcica y criterios diagnósticos en el crecimiento de soja y raigrás con fines forrajeros. Se podrá extender los estudios en variables relacionadas con la producción de granos, principalmente en soja, siendo el principal objetivo de su uso en Argentina.

7.4.3. Ampliar la información de CaExt

La determinación de CaExt no es una práctica habitual en laboratorios de la RP, pero se ha demostrado que podría ser un indicador diagnóstico de suficiencia cálcica tal como ocurre en otros nutrientes. Más aún, CaExt es una determinación sencilla de adicionar a los laboratorios de suelos, principalmente por utilizar el mismo extracto donde se determina la CE. Se demostró que es posible predecir CaExt a partir de otros parámetros de suelos, pero las ecuaciones se ajustaron en forma aproximada a suelos de la provincia de Buenos Aires. Por ello, será pertinente realizar un análisis más extenso para generar ecuaciones que permitan su estimación con mayor exactitud. Se recomienda un estudio de clústeres y/o componentes principales para agrupar suelos y generar ecuaciones predictivas parciales que permitirán encontrar mayores niveles de ajuste.

7.4.4. Realizar estudios a campo

En esta tesis se han desarrollado criterios y herramientas para la fertilización cálcica y se ha comparado estos resultados con la aplicación de correctores en situación controlada (invernáculo). En el futuro se propone ampliar estos estudios en situación de campo y en diferentes años, para comprobar el ajuste y la robustez de los resultados encontrados.

7.4.5. Ampliar la escala temporal

Los estudios comparativos de aplicación de correctores y fertilizantes cálcicos han sido evaluados en la producción de MS, CCaB, CMgB, ECaB y EMgB en un ciclo de cultivo. Se propone a futuro extender los estudios para evaluar el efecto de los tratamientos aplicados a lo largo del tiempo sobre los cultivos y el suelo.

7.4.6. Calibrar metodologías

Los estudios realizados demostraron que las isotermas de Freundlich, Van Huay y Tempkin se ajustan a los suelos hapludoles de Buenos Aires, pero subestimaron la necesidad de fertilizante a agregar para lograr concentraciones predefinidas de CaExt. Se podría realizar un estudio que permita correlacionar los valores obtenidos para lograr ajustar los valores reduciendo principalmente la concentración de la KCl utilizada como matriz en la metodología de las isoterma. Esta información podría ser de utilidad en laboratorios de suelos debido a las ventajas metodológicas y prácticas que posee la metodología de isotermas de adsorción respecto a las pastas de saturación de suelos.

7.4.7. Estudiar dinámica de magnesio y potasio

Los estudios de este trabajo se han centrado en suelos deficientes en Ca de la Región Pampeana. En la actualidad, el desabastecimiento de bases también comienza a generar deficiencia en K, y posiblemente en su interacción con Mg. Al igual que el Ca, el K es un elemento considerado en exceso en estos suelos naturalmente y en la actualidad se han encontrado evidencias de respuesta ante el agregado de este nutriente como fertilizante. Existen evidencias que demuestran que el K y Mg son nutrientes que presentan antagonismos y, en consecuencia, deberá ser atendido en el estudio propuesto.

7.4.8. Evaluar propiedades físicas de los suelos

Los estudios realizados se centraron en la evaluación de los efectos del agregado de Ca en los parámetros sobre cultivos y en parámetros fisicoquímicos y químicos del suelo. Se recomienda estudiar el agregado de Ca en forma de fertilizantes en las propiedades físicas de los suelos, como así también el efecto de estas prácticas sobre la resistencia a agentes bióticos y abióticos en el crecimiento y desarrollo.

Bibliografia

Abbas H, Soltana S, Mahmoud M, Nasef M. 1996. Sorption-desorption reactions for Zinc and Cupper by some newly reclaimed soils in Egypt. Ann Agric Sci 34:407-427.

Abbona E. 2017. Flujos de nutrientes en la agricultura y la alimentación para un ecosistema alimentario sostenible en la provincia de Buenos Aires. Tesis de Doctorado. FCAyF UNLP. 263 pp.

Agnusdei M, Colabelli M, Fernández Grecco R. 2001. Crecimiento estacional de forrajes de pasturas y pastizales naturales para el sudeste bonaerense. Boletín técnico INTA Balcarce 152:1-17.

Alconada Magliano M, Lanfranco JW. 2020. El suelo en el paisaje. Parte II. Primera Edicion. La Plata: Edulp. 198 pp.

Alconada Magliano M, Lanfranco JW, Pellegrini AE. 2015. El suelo en el paisaje. Parte I. Primera Edicion. La Plata: Edulp. 150 pp.

Alí W, Hussain M, Alí M, Mubushar M, Raza M, Mohsin M, Abbas Nasir H. 2013. Evaluation of Freundlich and Langmuir Isotherm for Potassium Adsorption Phenomena. Intl J Agri Crop Sci 6:1048-1054.

Alva AK, Edwards DG, Asher CJ. 1991. Effects of acid soil infertility factors on mineral composition of soybean and cowpea tops. J Plant Nutr 14:187-203.

Álvarez R, Prystupa P, Rodriguez M, Álvarez C. 2013. Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Segunda Edición. Buenos Aires: FAUBA. 652 pp.

Anda M, Suryani E, Subardja D. 2015. Strategy to reduce fertilizer application in volcanic paddy soils: Nutrient reserves approach from parent materials. Soil Tillage Res 150:10-20.

de Araújo WA, Santana RS, Mauad M, da Silva RS. 2020. Dry matter accumulation and nutrient uptake in determinate and indeterminate soybeans. J Plant Nutr 44:508-522.

Ascencio J. 1987. Potassium and calcium distribution patterns along the leaf insertion gradient of bean plants grown in nutrient solutions. J Plant Nutr 10:455-484.

Azcón-Bieto J, Talón M. 2008. Fundamentos de Fisiología Vegetal. Segunda Edición. Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana de España S.L. 651 pp.

Bachmeier O, Buffa E, Hang S, Rollán A, Bachmeier EB, Hang S, Rollán A. 2013. Fertilidad y Fertilizantes. 7ma edición. Villa Cabrera, Córdoba: SIMA. 428 pp.

Baker D, Amacher M. 1981. The development and interpretation of a diagnostic soil-testing program. Pennsylvania State University Agricultural Experiment Station Bulletin 826.

Barbieri PA, Echeverría HE, Sainz Rozas HR, Martínez JP. 2015. Soybean and wheat response to lime in no-till Argentinean mollisols. Soil Tillage Res 152:29-38.

Barker A V., Pilbeam DJ. 2015. Handbook of plant nutrition. CRC Press. 774 pp.

Barth JG. 2021. Limestone and calcium in plants. Soin de la Terre. Retrieved:1-33.

Baxter I, Hosmani PS, Rus A, Lahner B, Borevitz JO, Muthukumar B, Mickelbart M V., Schreiber L, Franke RB, et al. 2009. Root suberin forms an extracellular barrier that affects water relations and mineral nutrition in Arabidopsis. PLoS Genet 5:1-12.

Beckett P. 1964. Studies on soil potassium II. The 'immediate' Q/I relations of labile potassium in the soil. Journal of Soil Science 15:9-23.

Bedrossian S, Singh B. 2004. Potassium adsorption characteristics and potassium forms in some New South Wales soils in relation to early senescence in cotton. Australian Journal of Soil Research 42:747-753.

Bell MA, Keulen H. 1995. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. Soil Science Society of America Journal 59:865– 871.

Bender RR, Haegele JW, Below FE. 2015. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern soybean varieties. Agron J 107:563-573.

Beneduzzi HM, Souza EG de, Moreira WKO, Sobjak R, Bazzi CL, Rodrigues M. 2022. Fertilizer recommendation methods for precision agriculture – a systematic literature study. Engenharia Agrícola 42:1-18.

Bennardi D, Díaz Gorostegui A, Vázquez M. 2015. Curvas de acidificación en suelos una herramienta predictiva. V. En: Jornada Universitaria de Ciencias Exactas y Naturales-Química. San Fernando del Valle de Catamarca, Argentina: FACEN, UNCa. p 1-15.

Blanco L. 2014. Sistema Nacional de Diagnóstico, Planificación, Seguimiento y Prospección Forrajero en Sistemas Ganaderos. Disponible en: http://produccionforrajes.org.ar/. Último acceso: marzo de 2023.

Bohn H, McNeal B, OConnor G. 1993. Química del Suelo. México: Limusa. 322 pp.

Bolt GH, de Boodt MF, Hayes MH, McBride MB, de Strooper EB. 2013. Interactions at the

Soil Colloid: Soil Solution Interface. Primera Edicion. Netherlands. 604 pp.

Bouma J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. Advances in Soil Science 9:177-213.

Bouyoucos GJ. 1962. Hydrometer method for making particle size analisis de soils. Agrom. Jor 54:464-465.

Bruns HA. 2016. Macro-Nutrient Concentration and Content of Irrigated Soybean Grown in the Early Production System of the Midsouth. Communications in Soil Science and Plant Analysis 47:17.

Burton MG, Lauer MJ, Mcdonald MB. 2000. Calcium Effects on Soybean Seed Production, Elemental Concentration, and Seed Quality. Crop Sci.:476-482.

CAFMA. 2020. La industria de la maquinaria agrícola en Argentina. Estructura, evolución 2002-2019 y persepectivas. CAFMA. Disponible en: https://cafma.org.ar/web/uploads/statistics-files/4/Maquinaria%20Agr%C3%ADcola%20Nacional%202002-2019,%20Informe%20CAFMA.pdf?1594650963. Último acceso: marzo de 2024.

Chaganti VN, Culman SW. 2018. Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. Crops & Soils 51:40-47.

CIAFA. 2023. Consumo de Fertilizantes 2022. Cámara de la Industria Argentina de Fertilizantes y Agroquímicos. CIAFA. Disponible en: https://www.ciafa.org.ar/files/MP2gUtcEjTJDcpjmQNzlwf1lAOXWsp72pMlX2nOQ.pdf. Último acceso: enero de 2024.

Ciarlo E, Cosentino D, García M, González F. 2018. Analisis de participacion de laboratorios de suelos en el programa PROINSA. Acta de conferencias, mesas panel, trabajos completos, comunicaciones y resúmenes. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo:45-49.

Clark RB. 1978. Differential response of corn inbreds to calcium. Commun Soil Sci Plant Anal 9:729-744.

Clement CR, Hopper MJ, Jones LHP. 1978. The Uptake of Nitrate by Lolium perenne from Flowing Nutrient Solution I. J Exp Bot 29:453-464.

Conn S, Gilliham M. 2010. Comparative physiology of elemental distributions in plants. Ann Bot 105:1081-1102.

Cox FR. 1994. Current phosphorus availability indices: characteristics and shortcomings.

En: Havlin JL, Jacobsen JS, editores. Soil Testing: Prospects for Improving Nutrient Recommendation. SSSA Special Publications. Vol. 40. Madison, WI: Soil Science Society of America. p 101-113.

Ding W, Clode PL, Clements JC, Lambers H. 2018. Effects of calcium and its interaction with phosphorus on the nutrient status and growth of three Lupinus species. Physiol Plant 163:386-398.

Diovisalvi VN, Reussi Calvo IN, Boxler M, García F. 2021. Relevamiento de Calcio, Magnesio, Potasio y Micronutrientes en Zonas de Diferente Productividad de Soja. Revista Argentina de la Ciencia del Suelo 39:63-79.

Echenique V, Pessino S, Diaz M, Selva JP, Luciani G, Zappacosta D, Cervigni G, Meier M, Garbus I, et al. 2008. Aportes de biotecnologia al mejoramiento del pasto llorón. Revista Argentina de Producción Animal 28:147-164.

Echeverría HE, García FO. 2015. Fertilidad de Suelos y Fertilidad de Cultivos. Primera Edición. Buenos Aires: INTA. 904 pp.

Emamgolizadeh S, Bateni SM, Shahsavani D, As-hrafi T, Ghorbani G. 2015. Estimation of soil cation exchange capacity using Genetic Expression Programming (GEP) and Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS. J. Hydrol 529:1590-1600.

Fadda G. 2016. Edafología, Universidad Nacional de Tucumán. Disponible en: https://www.edafologia.org/Descargas/Cartillas/Clasificacion%20de%20Suelos%20Xi.pdf. Último acceso: octubre de 2022.

Fanello D. 2016. Cambios estructurales y funcionales en las mitocondrias durante la senescencia de hojas y raíces. Tesis de Doctorado. UNLP. 179 pp.

Farheen N, Bushra, Muhammad MI, Fatima B, Zafar-ul-Hye, Muhammad RK, Maqshoof A. 2018. Modeling the potassium requirements of potato crop for yield and quality optimization. Asian J Agri & Biol 6:169-180.

Fassbender H, Bornemisza E. 1987. Química de suelos con énfasis en América Latina. Segunda Edición. San José, Costa Rica: Servicio Editorial IICA. 421 pp.

Fernandez Grecco R. 2000. Promoción de raigrás anual en un pastizal natural de la Pampa Deprimida bonaerense. Acta Congreso Argentino de Producción Aniamal:165-166.

Ferro DA, Machetti NE, Abbona EA, Vázquez ME. 2017. Exportación del Mg edáfico producida por cultivos extensivos e intensivos en los distintos partidos de la provincia de Buenos Aires. Revista de la Facultad de Agronomía 116:155-159.

Filippi D, Denardin LG de O, Ambrosini VG, Alves LA, Flores JPM, Martins AP, Pias OH de C, Tiecher T. 2021. Concentration and removal of macronutrients by soybean seeds over 45 years in brazil: A meta-analysis. Rev Bras Cienc Solo 45:1-18.

Fontanetto H, Gambaudo S, Keller O, Albrecht J, Weder E, Sillón M, Gianinetto G, Meoi G. 2011. Fertilización cálcica en soja en la zona central de Santa Fe. Información Técnica en Cultivos de Verano. Campaña 2011. Publicación Miscelánea INTA N° 121:94-99.

Fontanetto H, Keller O. 2006. Consideraciones sobre el manejo de fertilización de la soja. Información Técnica en Cultivos de Verano. Campaña 2006. Publicación Miscelánea INTA N° 106:45-79.

Foo KY, Hameed BH. 2010. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. Chemical Engineering Journal 156:2-10.

Freundlich H. 1906. Over the adsorption in solution. J. Phys. Chem 57:385-471.

Gambaudo S, Picco L, Soldano P, Cervetti A. 2007. Fertilización compuesta con calcio, magnesio y azufre en soja. Resultados experiencias campaña 2006/07. INTA. EEA Rafaela. Información Técnica cultivos de verano. Publicación Miscelánea 108:185-189.

García F, Correndo A. 2016. Cálculo de Requerimientos Nutricionales - Versión 2016. Cultivos de Cereales, Oleaginosas, Leguminosas, Industriales, Forrajeras y Hortalizas. IPNI. Disponible en: http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024. Último acceso: diciembre de 2023.

García M, Presutti M. 2018. Extracción de bases del modelo productivo, en los suelos de la provincia de Buenos Aires. En: Acta de conferencias, mesas panel, trabajos completos, comunicaciones y resúmenes. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Tucumán. p 526-531.

Gelati P, Vázquez M. 2008. Extracción agrícola de bases en el N de la provincia de Buenos Aires, Argentina: costo de su remediación e implicancias económicas. Revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica 7:117-129.

Genc Y, Tester M, McDonald GK. 2010. Calcium requirement of wheat in saline and non-saline conditions. Plant Soil 327:331-341.

Genú AM, Demattê JAM. 2011. Prediction of soil chemical attributes using optical remote sensing. Acta Sci Agron 33:723-727.

Gigli-Bisceglia N, Engelsdorf T, Hamann T. 2020. Plant cell wall integrity maintenance in model plants and crop species-relevant cell wall components and underlying guiding

principles. Cellular and Molecular Life Sciences 77:2049-2077.

Girón P, Macchiavello A, Barraco M, Ottaviano C, Ferro DA, Vázquez M. 2016. Aplicación de correctores básicos y fertilizantes cálcico-magnésicos en el cultivo de soja. Informaciones Agronómicas 24:20-23.

Graham E. 1959. An explanation of theory and methods of soil testing. Missouri Agric. Ext. Stn. Bull 734.

Groffman P, Howard G, Gold A, Nelson W. 1996. Microbila nitrate processing in shallow groundwater in a riparian forest. J Environ Qual 25:1309-1316.

Hannan A. 2008. Evaluation of sorption isotherm based soil solution potassium concentration levels for maximizing crop yields. PhD Thesis, University of Agriculture, Faisalabad, Pakistan. 142 pp.

He H, Bleby M, Veneklaas TM, Lambers EJ, Kuo H. 2012. Precipitation of Calcium, Magnesium, Strontium and Barium in Tissues of Four Acacia Species (Leguminosae: Mimosoideae). PLoS One 7:41563.

Henao-Toro MC, Hernández-Guzmán E. 2002. Disponibilidad de potasio en suelos derivados de cenizas volcánicas y su relación con la nutrición del café en la etapa vegetativa. Cenicafé 53:293-305.

Heredia O, Cruzate G, Rotondaro R. 2012. Estado actual del Ca en suelos pampeanos. CD Procedings XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo.

Herrera A, Rotondaro R. 2017. Relevamiento de fertilidad de los suelos pampeanos ¿Qué nos dicen los análisis de suelo? Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica 28:24-27.

Horn AL, Düring RA, Gäth S. 2005. Comparison of the prediction efficiency of two pedotransfer functions for soil cation-exchange capacity. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 168:372-374.

Imbellone P, Giménez J, Panigatti J. 2010. Suelos de La Región Pampeana. Procesos de Formación. Buenos Aires: INTA. 292 pp.

INTA. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. Buenos Aires, Argentina: INTA. 389 pp.

INTA. 2024. Visor GeoINTA. Disponible en: https://geo.inta.gob.ar/#4/-39.02/-66.77. Último acceso: marzo de 2024.

IRAM. 1997. Materiales calcáreos para uso agropecuario. Requisitos y métodos de ensayo. 1.ª ed. Buenos Aires: IRAM.

IRAM-SAGyP. 2016. Norma Nº 29.571-3:2016 Calidad ambiental. Calidad del suelo. Determinación de materia orgánica en suelo. Parte 3: Determinación de carbono orgánico oxidable por mezcla oxidante fuerte, microescala. Norma IRAM.

IRAM-SAGyP. 2018. Norma N° 29572:2018 Calidad ambiental - Calidad del suelo. Determinación de nitrógeno en suelo por el método Kjeldahl modificado. IRAM.

IRAM-SAGyP. 2020. Norma Nº 29.570-1:2020 2 ed. Calidad ambiental - Calidad del suelo. Determinación de fósforo extraíble en suelos. Parte 1 - Método Bray Kurtz 1 modificado (Extracción con solución de fluoruro de amonio - ácido clorhídrico). IRAM.

IRAM-SAGyP. 2021a. IRAM-SAGyP 29579:2021. Calidad del suelo. Determinación de la conductividad eléctrica en extracto de pasta de saturación para suelos de uso agropecuario. IRAM.

IRAM-SAGyP. 2021b. IRAM-SAGyP 29574:2021 Calidad del suelo. Determinación de pH en suelo para uso agropecuario. IRAM.

IRAM-SAGyP. 2022. IRAM-SAGyP 29577-1:2022 Calidad de suelo. Capacidad de intercambio catiónico y cationes básicos intercambiables. Parte 1: Determinación en suelos ligeramente ácidos a neutros y no calcáreos. IRAM.

Irurtia C, Rivero E, Michelena R. 2004. Pérdida de nutrientes por lixiviación y escurrimiento en siembra directa. Revistas de Recursos Naturales de Chile:1-6.

Kalra Y. 1998. Handbook of reference methods for plant analysis. Soil and Plant Analysis Council, Inc. New York: CRC Press. 291 pp.

Kassa M, Haile W, Kebede F. 2019. Evaluation of Adsorption Isotherm Models for Potassium Adsorption under Different Soil Types in Wolaita of Southern Ethiopia. Commun Soil Sci Plant Anal 50:388-401.

Kenyanya O. 2015. Studies on Potassium Requirements por Maize in Nyamira Country. Master of Science (Chemistry) in the School of Pure and Applied Sciences of Kenyatta University. 83 pp.

Kim JY, Kim Y. 2015. Sorption of cesium on weathered biotite: The effects of cations in solution. Catena (Amst) 135:107-113.

Kirkby E, Pilbeam D. 1984. Calcium as a plant nutrient. Plant Cell Environ 7:397-405.

Knez M, Stangoulis JCR. 2021. Calcium Biofortification of Crops–Challenges and Projected Benefits. Front Plant Sci 12.

Kopittke PM, Menzies NW. 2007. A Review of the Use of the Basic Cation Saturation Ratio and the “Ideal” Soil. Soil Science Society of America Journal 71:259-265.

Kumar A, Singh UM, Manohar M, Gaur VS. 2015. Calcium transport from source to sink: understanding the mechanism(s) of acquisition, translocation, and accumulation for crop biofortification. Acta Physiol Plant 37:1722.

Langmuir I. 1916. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. J. Am. Chem. Soc. 38:2221-2295.

LART. 2023. Sistema nacional de diagnóstico, planificación, seguimiento y prospección forrajera en sistemas ganaderos. Disponible en: www.lart.agro.uba.ar. Último acceso: junio de 2022. Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección.

Leao TP, Silva AP, Macedo MCM, Imhoff S, Euclides VPB. 2006. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. Soil Tillage Res 88:279-285.

Legget J, Frere M. 1971. Growth and nutrient uptake by soybean plants in nutrient solutions of graded concentrations. Plant Physiol 48:457-460.

Leon Perez SL. 2012. Efecto de cinco niveles de fosforo y carbonato de calcio en la producción de materia seca, extracción de fósforo en cebada (Hordeum vulgare L.) y su disponibilidad de fósforo en el suelo bajo condiciones de invernadero. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Trujillo. 48 pp.

von Liebig J. 1840. Organic chemistry in its applications to agriculture and physiology. First Edition. London: Taylor and Walton.

Limousin G, Gaudet JP, Charlet L, Szenknect S, Barthès V, Krimissa M. 2007. Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. Applied Geochemistry 22:249-275.

Lince Salazar LA, Rodríguez N, Valencia N, Sadeghia Khalajabadi S. 2015. Disponibilidad de Ca, Mg y K en función de las propiedades del suelo, Zona Cafetera Central de Colombia. Revista de Investigación Agraria y Ambiental 6:29-42.

Loneragan JF, Snowball K. 1969. Calcium requirements of plants. Austratian Journat of Agricutturat Research 20:465-478.

Luca L, García M, Vázquez M. 2006. Presencia de micorrizas como índice de remediación

en suelos encalados. Salta: XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.

Luz J. 2007. Soja forrajera ¿una nueva alternativa? GAPP InforTambo. Disponible en: https://produccion.com.ar/ver_nota.php?edicion=Mar_Abr2008&numero=171&id=109. Último acceso: diciembre de 2023.

Machetti N. 2021. Efectos sobre propiedades físicas de la remediación química de la acidez en suelos del ámbito templado argentino. Su incidencia en la producción vegetal. Tesis de Doctorado. FCAyF UNLP. 134 pp.

MAGyP. 2021. Estimaciones Agrícolas. Disponible en: https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones. Ministerio de Agricultura Ganaderia y Pesca. Último acceso: diciembre de 2023.

Malavolta E, Vitti GC, de Oliveira SA. 1997. Avalicáo do Estado Nutricional das Plantas. Principios y Aplicacóes. Segunda Edición. Sao Pablo: Potafos. 319 pp.

Marcano-Martinez E, McBride MB. 1989. Calcium and Sulfate Retention by Two Oxisols of the Brazilian Cerrado. Soil Science Society of America Journal 53:63-69.

Marschner H, Richter C. 1974. Calcium transport in roots of maize and bean plants. Plant Soil 40:193-210.

Marschner P. 2023. Mineral Nutrition of Plants. Fouth Edition. (Rengel Z, Cakmak I, White P, editores.). Academic Press.

McBratney AB, Minasny B, Cattle SR, Vervoort RW. 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. Geoderma 109:41– 73.

McBride M. 2000. Chemisorption and precipitation reactions. En: Sumner M, editor. Handbook of Soil Sciencie. London, UK: CRC Press. p B265-B302.

Melo VDF, Alleoni LRF. 2009. Química e mineralogia do solo. Parte I. Sociedad Brasileira de Ciencia do Solo. Viçosa: MG. 1380 pp.

Microsoft. 2024. Microsoft Office 365. Versión libre para cuentas educativas. Disponible en: https://www.microsoft.com/es-ar/microsoft-365. Último acceso: marzo de 2024.

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

Morrás H. 2008. El suelo, la delgada piel del planeta. Revista del Sitio Argentino de Producción Animal:22-27.

Morse W. 1950. Soybean production for hay and beans. USDA Farmers' Bull 2024:1-15.

Narváez Ortiz WA. 2017. Desarrollo de Modelos Matemáticos para el Estudio de la Concentración de Elementos en la Solución del Suelo. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 83 pp.

Navarro Blaya S, Navarro García G. 2003. Química Agrícola. Segunda Edición.

Noble AD, Sumner ME. 1988. Calcium and al interactions and soybean growth in nutrient solutions. Commun Soil Sci Plant Anal 19:1119-1131.

Onana AA, Mvondo Ze AD, Yerima BP, Agoume V. 2016. Comparison of different phosphorous adsorption models in acid forest soils of Bityili (Southern – Cameroon) and their relationship with soil properties. Int J Biol Chem Sci 10:820.

Pagel H, van Huay H. 1976. Wichtige Parameter der Phosphatsorptionkurven einiger BOden der Tropen und Subtropen und ihre zeitliche Veranderung durch P-Dtingung. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd 20:765-778.

Panigatti A. 2010. 200 años, 200 suelos. 1ra ed. Buenos Aires: INTA. 361 pp.

Pannu R, Singh Y, Singh B. 2003. Effect of long-term application of organic materials and inorganic N fertilizers on potassium fixation and release characteristics of soil under rice-wheat cropping system. Journal of Potassium Resource 19:1-10.

Pellegrini A, Ferro D, Bennardi D, Genazini C, Vázquez M. 2016. Efecto de la acidificación edáfica sobre los aluminosilicatos en un suelo de la región pampeana. En: XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rio Cuarto, Córdoba: AACS.

Presutti M. 2016. Extracción y reposición de nutrientes en la agricultura bonaerense. Memorias del XXI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo y XV Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo:736-743.

Presutti M. 2018. Susceptibilidad a la acidificación edáfica por extracción de nutrientes básicos por la agricultura extensiva bonaerense. Acta de conferencias, mesas panel, trabajos completos, comunicaciones y resúmenes. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo:673-678.

Presutti M, García M, Vázquez M. 2016. Acidificación de los suelos de la pradera pampeana. Mapeo de la saturación básica y de los índices relativos. Montevideo, Uruguay.

Quiñonez A, Dalla Fontana D, Mollo A. 2003. Respuesta de alfalfa al agregado de fósforo, boro y calcio. Revista FAVE Ciencias Agrarias 2:47-54.

R Core Team. 2023. R: A language and environment for statistical computing. Disponible en: https://www.R-project.org/. Último acceso: febrero de 2024.

Rayar A. 1981. Effect of calcium concentration on growth and ion uptake in soybean plants in solution culture. Z. Pflanzenphysiologie 105:59-64.

Romero L. 2005. Soja para pastorear. INTA Rafaela Proyecto Regional de Lechería. Disponible en https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas%20artificiales/76-soja_pastoreo.pdf. Último acceso: enero de 2024.

Safadoust A, Feizee P, Mahboubi AA, Gharabaghi B, Mosaddeghi MR, Ahrens B. 2014. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. Agric Water Manag 136:34-41.

Sainz Rozas H, Eyherabide M, Larrea G, Martínez Cuesta N, Angelini H. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. Actas Simposio Fertilidad:141-158.

Samadi A. 2006. Potassium Exchange Isotherms as a Plant Availability Index in Selected Calcareous Soils of Western Azarbaijan Province, Iran. Turk J Agric For 30:213-222.

SAMLA. 2004. Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de Análisis de Suelos. Buenos Aires: SAGyP.

Sarandón S, Flores C. 2014. Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables. Primera Edicion. La Plata: Edulp. 467 pp.

Scheinost AC, Sinowski W, Auerswald K. 1997. Regionalization of soil buffering functions: a new concept applied to K/Ca exchange curves. Advances in GeoEcology 30:23– 38.

Scheneiter J. 2014. El raigrás anual en las regiones Pampeana y sur de la Mesopotamia. Disponible en: https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas%20artificiales/193-raigas_anual.pdf. Último acceso: febrero de 2024.

Sharma D, Jamra G, Singh UM, Sood S, Kumar A. 2017. Calcium biofortification: Three pronged molecular approaches for dissecting complex trait of calcium nutrition in finger millet (Eleusine coracana) for devising strategies of enrichment of food crops. Front Plant Sci 7.

Shaviv A, Mattigod S V, Pratt PF, Joseph H. 1985. Potassium Exchange in Five Southern California Soils with High Potassium Fixation Capacity. Soil Science Society of America

Journal 49:1128-1133.

Silva Domingues L, Ribeiro ND, Andriolo JL, Possobom Della Flora TM, Mezzomo Zemolin EA. 2014. Selection of common bean lines for calcium use efficiency 1 Seleção de linhagens de feijão para eficiência no uso de cálcio. Rev. Ciênc. Agron:767-776.

Silva Rossi MM, del Rollán AAC, Bachmeier OA. 2013. Disponibilidade de fósforo na área central da Pampa Argentina. 1: Relação entre parâmetros do solo, processos de adsorção e rendimentos de trigo, soja e milho em diferentes ambientes de solo e manejo da cultura. Spanish Journal of Soil Science 3:45-55.

Singh U, Pandey D, Kumar A. 2014. Determination of calcium responsiveness towards exogenous application in two genotypes of Eleusine coracana L. differing in their grain calcium content. Acta Physiol Plant 36:2521-2529.

Snakin V, Prisyazhnaya A, Kovács-Láng E. 2001. Soil Liquid Phase Composition. Amsterdam: Elsevier. 321 pp.

Sparks DL. 2003. Soil Solution–Solid Phase Equilibria. Chapter 4. In: Environmental Soil Chemistry. Second Edition. Academic Press: 115-132.

Taboada M, Álvarez C. 2008. Fertilidad Física de los Suelos. Segunda Edición. Buenos Aires: UBA. 160 pp.

Tempkin M, Pyzhev V. 1940. Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalyst. Acta Phys. Chim. USSR 12:327-356.

USDA. 1954. Salinity Laboratory Staff Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils U.S.D.A. Handbook:125.

USDA. 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12.ª ed. Washington, DC, Estados Unidos: Soil Survey Staff. USDA - Natural Resources Conservation Service. 410 pp.

USDA. 2017. Soil Survey Manual: Agriculture Handbook N° 18 (Revision). Soil Science Division Staff. USDA. 639 pp.

USDA. 2023. Soil Texture Calculation. Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/resources/education-and-teaching-materials/soil-texture-calculator. Último acceso: diciembre de 2023. Natural Resources Conservation Service.

Vázquez M. 2007. Calcio y Magnesio del suelo: Encalado y Enyesado. En: Echeverría H, García F, editores. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. 1.ª ed. Buenos Aires: INTA. p 161-185.

Vázquez M, Pagani A. 2015. Calcio y magnesio. Manejo de fertilización y enmiendas. En: Echeverría EH, García F, editores. Fertilizad de suelos y fertilización de cultivos. Buenos Aires: INTA. p 317-350.

Vázquez M, Terminello A, Casciani A, Millán G, Cánova D, Gelati P, Guilino F, Dorronzoro A, Nicora Z. 2012. Respuesta de la soja (Glycine max L. Merr) a enmiendas básicas en algunos suelos de las provincias de Buenos Aires y Santa Fe. Revista Argentina de la Ciencia del Suelo 30:43-56.

Vázquez M, Terminello A, Casciani A, Millán G, Gelati P, Guilino F, García Díaz J, Kostiria J, García M. 2010. Influencia del agregado de enmiendas básicas sobre la producción de alfalfa (Medicago sativa L.) en ámbitos templados argentinos. Revista Argentina de la Ciencia del Suelo 28:141-154.

Vázquez ME, Millán GJ. 2017. Acidez del suelo Origen, diagnóstico, consecuencias y tratamiento. En: Vázquez M, editor. Manejo y Conservación de Suelos Con especial énfasis en situaciones argentinas. Buenos Aires: Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. p 229-217.

Ventimiglia L. 2022. Ensayos con potasio en el centro oeste de Buenos Aires. En: 3er Seminario de Potasio en Argentina. Rosario, Santa Fe: FERTILIZAR Asociación Civil. p 5.

Vivas H, Fontanetto H. 2003. Fósforo, azufre y calcio en la producción de soja . Videla, Departamento San Justo. 2002-03. . Información Técnica de cultivos de verano INTA Rafaela. Campaña 2003. Publicación Miscelánea 100:1-5.

Wang Y, Kang Y, Ma C, Miao R, Wu C, Long Y, Ge T, Wu Z, Hou X, et al. 2017. CNGC2 is a Ca2+ influx channel that prevents accumulation of apoplastic Ca2+ in the leaf. Plant Physiol 173:1342-1354.

Weber C. 2016. Making Logarithms Accessible – Operational and Structural Basic Models for Logarithms. Journal für Mathematik-Didaktik 37:69-98.

White P, Holland J. 2018. Calcium in Plant Physiology and its Availability from the Soil. En: Proceedings of The International Fertiliser Society 827. UK: International Fertiliser Society.

White PJ. 2015. Calcium. En: Barker AV, Pilbeam DJ, editores. Handbook of Plant Nutrition. Second Edition. CRC Press. p 165-198.

Wilson MG, Sasal MC, Caviglia OP. 2013. Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol

using least limiting water range: Effect on early wheat growth. Geoderma 192:354-361.

Zapata Hernandez R. 2004. Química de la Acidez. 1ra ed. Medillín, Colombia: Caragraphis. 208 pp.

Zapata Hernández R. 2006. Química de los Procesos Pedogenéticos. 1ra ed. Medillín: Universidad Nacional de Colombia. 358 pp.

Zubillaga E, Ciarlo E. 2015. Nutrientes Básicos. En: Álvarez R, editor. Fertilidad de Suelos y Fertilización en la Región Pampeana. Buenos Aires: FAUBA. p 177-193.