



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA



4 **FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES**

5

6

7

**Tesis de Grado**

8

9

DESARROLLO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA PREDECIR LA

10

CONCENTRACIÓN INICIAL EN SOLUCIÓN EXTERNA, CURVA DE ADSORCIÓN Y

11

DOSIFICACIÓN DE CALCIO EN SUELOS DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

12

13

14

15

16 **Nombre y apellido:** Andreini, Brian

17 **D.N.I.:** 37.837.892

18 **Legajo:** 27237/5

19 **Email:** brian\_a594@hotmail.com

20 **Celular:** 02364 15548522

21

22

23

24 **Nombre y apellido:** Taraburelli, Lautaro

25 **D.N.I.:** 36.645.735

26 **Legajo:** 27219/3

27 **Email:** lautat-10@hotmail.com

28 **Celular:** 0291 156452372

29

30

31

32 **Director:** Ing Agr. Daniel Adalberto Ferro (Manejo y Conservación de Suelos)

33 **Codirector:** Ing. Agr. Guillermo José Millán (Manejo y Conservación de Suelos)

34 **Fecha de entrega:** 13 de septiembre de 2019

35	<b><u>INDICE</u></b>	
36	<b>RESUMEN.....</b>	<b>2</b>
37	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
38	<b>Nutrición vegetal.....</b>	<b>3</b>
39	<b>Fertilidad química del suelo.....</b>	<b>4</b>
40	Factor Capacidad: Solución Interna.....	4
41	Renovación .....	7
42	Factor Intensidad: Solución Externa .....	8
43	<b>Modelos matemáticos predictivos.....</b>	<b>10</b>
44	Generales.....	10
45	Solución Externa .....	12
46	Isoterma de Adsorción.....	14
47	<b>Fertilización.....</b>	<b>18</b>
48	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
49	<b>HIPÓTESIS .....</b>	<b>20</b>
50	<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
51	<b>Predicción de Ca soluble .....</b>	<b>21</b>
52	<b>Curva de adsorción y función de dosificación.....</b>	<b>22</b>
53	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>24</b>
54	<b>Predicción de Ca soluble .....</b>	<b>24</b>
55	<b>Curvas de adsorción .....</b>	<b>27</b>
56	Primer Segmento.....	27
57	Segundo Segmento.....	34
58	<b>Función de dosificación.....</b>	<b>42</b>
59	Primer Segmento.....	42
60	Segundo Segmento.....	48
61	<b>CONCLUSIÓN.....</b>	<b>55</b>
62	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>56</b>
63	<b>ANEXO.....</b>	<b>62</b>
64		

65 **RESUMEN**

66 Los cultivos absorben nutrientes como calcio (Ca) y magnesio (Mg),  
67 satisfaciendo sus requerimientos mayoritariamente mediante la absorción por sus raíces  
68 desde la solución externa del suelo. Los objetivos de este trabajo fueron: predecir la  
69 concentración de Ca en la solución externa del suelo a partir de otros parámetros  
70 edáficos en suelos de Buenos Aires y determinar una curva de adsorción y de  
71 dosificación de calcio sobre tres suelos de Buenos Aires. Se realizó la determinación  
72 analítica de rutina en 24 suelos y en tres se determinaron diferentes relaciones entre  
73 agregado de Ca y concentración final de Ca en solución externa, para realizar ambas  
74 funciones. Se utilizó un software estadístico para realizar una regresión múltiple con  
75 selección de variables paso a paso para el Ca soluble y se ajustaron diferentes  
76 funciones lineales (lineales, polinómicas) y no lineales (Freundlich, Langmuir) para la  
77 curva de adsorción y función de dosificación. La regresión de predicción de Ca soluble  
78 a partir de la conductividad eléctrica que arrojó mejores datos estadísticos fue con las  
79 variables conductividad eléctrica en el extracto de saturación y la relación entre Ca  
80 intercambiable sobre la suma de bases, con un grado de ajuste  $R^2=0,55$ . La curva de  
81 adsorción de calcio y la función de dosificación que arrojó los mejores valores  
82 estadísticos fue la regresión polinómica de grado dos en bajas concentraciones y una  
83 regresión lineal en altas concentraciones, en ambos casos. El poder predecir la  
84 disponibilidad de Ca soluble y describir el efecto de adicionar o estimar pérdidas de  
85 determinada cantidad de un elemento y cómo influye en la solución del suelo, ayudaría  
86 a comprender la concentración de un nutriente como el Ca. Se logró generar una función  
87 de regresión predictiva de la concentración de calcio en solución externa a partir de  
88 algunos parámetros edáficos y se pudo ajustar una curva de adsorción y una función de  
89 dosificación para cada uno de los suelos analizados

90

91 **INTRODUCCIÓN**92 **Nutrición vegetal**

93 Desde el punto de vista fisiológico, un elemento es considerado como nutriente  
94 cuando la planta no puede completar su ciclo de vida en su ausencia y cuando no puede  
95 ser reemplazado por otro mineral cuando participa en cierto metabolismo vegetal, como  
96 por ejemplo, en una reacción enzimática. Los cultivos necesitan cantidades absolutas y  
97 relativas de los elementos minerales en el tejido vegetal, dependiendo de la especie y  
98 de la edad de la planta (Marschner, 2012).

99 Las plantas satisfacen sus requerimientos mediante la absorción de nutrientes  
100 por sus raíces, fundamentalmente. Existen diferentes vías de absorción de nutrientes:  
101 activas y pasivas. La absorción pasiva de nutrientes ocurre a favor de gradiente de  
102 potencial electroquímico, sin necesidad de aporte de energía (ej. difusión, flujo masal),  
103 mientras que la activa es un mecanismo de difusión en contra de un gradiente de  
104 concentración que requiere aporte de energía por parte de la planta para realizarlo  
105 (bombas, canales). Cuando la regulación de la absorción no puede ser ejercida por la  
106 propia planta, el suelo debe poder ofertar estos elementos en cantidades adecuadas,  
107 absolutas y relativas, para satisfacer adecuadamente la demanda nutricional. Tal es el  
108 caso del calcio (Ca) y magnesio (Mg) en suelos de la Región Pampeana, como  
109 evidenciaron Arrigo & Conti (1985), ya que se absorben mayoritariamente por flujo  
110 masal, sin tener la planta posibilidad de regularlos. Debido a este hecho, el diagnóstico  
111 de las condiciones de suficiencia-deficiencia de los nutrientes en el suelo se torna  
112 complejo y dependiente de las características de los sistemas de producción abordados.

113

114

**115 Fertilidad química del suelo**

116 La fertilidad química del suelo puede entenderse a partir de la interacción entre  
117 abastecimiento y dotación de nutrientes. El abastecimiento representa las condiciones  
118 físicas o físico-químicas que regulan la disponibilidad de los nutrientes. La dotación  
119 representa la concentración de los nutrientes en suelo y puede subdividirse en los  
120 factores capacidad e intensidad. El factor capacidad constituye la fracción fácilmente  
121 disponible en el corto-mediano plazo (nutrientes adsorbidos a coloides, precipitados,  
122 etc.), mientras que el factor intensidad representa aquellos nutrientes que se encuentran  
123 disponibles para ser adsorbidos por las plantas (solubles). El proceso que interviene en  
124 el pasaje de nutrientes desde el factor capacidad a intensidad se denomina renovación.

125

**126 *Factor Capacidad: Solución Interna***

127 Los cationes, como en el caso del Ca y Mg, pueden estar retenidos mediante un  
128 fenómeno físico de superficie (adsorción) a los coloides del suelo (arcilla, materia  
129 orgánica, etc.) formando parte de la denominada solución interna del suelo (fracción  
130 intercambiable). Este fenómeno ocurre debido a las cargas positivas de los cationes y  
131 las cargas negativas de los coloides, estas últimas pudiendo ser permanentes o como  
132 variables según el pH del suelo. La sumatoria de cargas negativas que poseen los  
133 coloides del suelo por unidad de masa se denomina capacidad de intercambio catiónica  
134 (CIC).

135 La adsorción de los cationes en suelo depende tanto de los coloides como de  
136 las características de los iones presentes. Según Zhang & Zhao (1997) y Jaramillo  
137 (2002), las propiedades de los coloides que afectan el intercambio iónico en el suelo son  
138 la cantidad y tipo de coloides presentes (cantidad-tipo de arcilla y de materia orgánica,  
139 superficie específica de dichos coloides) y densidad de cargas. Las propiedades de los  
140 iones que afectan su capacidad de intercambio, según Jaramillo (2002) y Navarro Blaya

141 & Navarro García (2003) son la carga del ión, la dimensión del radio hidratado y su  
142 concentración. En relación a lo antedicho se han establecido series denominadas  
143 “liotrópicas” en las cuales se ordenan los iones de acuerdo con su capacidad de ser  
144 adsorbidos (Bohn et al., 1993; Navarro Blaya & Navarro García, 2003). Además, existe  
145 un fenómeno denominado “selectividad” de la adsorción haciendo alusión a la  
146 preferencia por ciertos iones en la fracción coloidal, debiéndose a cuestiones  
147 fundamentalmente estéricas. Fassbender & Bornemisza (1987) informaron varias series  
148 liotrópicas para cationes de acuerdo con el tipo de coloide intercambiador. Los autores  
149 afirman que estas series pueden variar con el pH del medio. Es interesante destacar  
150 que en todas las series, el Na es el catión de menor preferencia:

- 151 - Illita:  $Al > K > Ca > Mg > Na$
- 152 - Caolinita:  $Ca > Mg > K > Al > Na$
- 153 - Montmorillonita:  $Ca > Mg > H > K > Na$
- 154 - Materia orgánica:  $Ca > Mg > K > Na$

155 La concentración de los cationes en la solución interna del suelo se ha utilizado  
156 y se utiliza como método diagnóstico de su disponibilidad. Graham (1959) fue uno de  
157 los pioneros en investigar la importancia de la concentración relativa de los nutrientes  
158 básicos en la fracción intercambiable del suelo, encontrando que la situación ideal para  
159 las condiciones las que trabajó, estaban constituidas por un 65 a 85% de saturación  
160 básica total ( $(Ca + Mg + K + Na) \times 100 / CIC$ ), igual rango de saturación cálcica ( $Ca \times$   
161  $100 / (Ca + Mg + K + Na)$ ), 6 a 12% de saturación magnésica ( $Mg \times 100 / (Ca + Mg + K +$   
162  $Na)$ ) y 1 a 5% de saturación potásica ( $K \times 100 / (Ca + Mg + K + Na)$ ). Más recientemente,  
163 Baker & Amacher (1981) definieron valores normales de entre 60 y 80% para Ca, 10 a  
164 20% para Mg y 2 a 5% para K. Sin embargo, ambos boletines fueron una descripción  
165 general para el diagnóstico teórico de fertilidad, ya que los procedimientos y datos  
166 experimentales no fueron citados. Aún así, el uso de este tipo de índices relativos como  
167 única herramienta de diagnóstico puede derivar en conclusiones erróneas respecto de

168 la suficiencia de los nutrientes, por lo que solo deberían considerarse como  
169 evaluaciones complementarias; muchos autores, entre ellos Oliveira & Parra (2003) y  
170 Sadeghian (2012) demostraron que la variación de estas relaciones tuvieron poca  
171 influencia sobre rendimientos de especies cultivadas, sin embargo, existen  
172 investigaciones que por el contrario, entre ellas las de Muñoz et al. (1998), Büll et al.  
173 (1998), Anjos Reis et al. (1999), Borie et al. (1999), Demanet et al. (1999) y Loide (2004),  
174 destacaron la importancia de la saturación particular de los cationes y sus relaciones en  
175 el desarrollo de otras especies.

176 La solución interna del suelo puede servir en términos generales para la  
177 caracterización del suelo o como el análisis desde una perspectiva general de la  
178 fertilidad del suelo (Huggett, 1975; Ponge, 2005). La solución interna del suelo almacena  
179 nutrientes y podría permitir estimar la capacidad que posee el suelo para suministrar  
180 nutrientes a la planta. Sin embargo, no implica adecuadamente, y en algunos casos no  
181 implica en absoluto, la disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo, así como los  
182 cambios inducidos por las raíces de las plantas y por el microbioma edáfico (Marschner,  
183 2012). Desde una perspectiva de estudio del sistema de suelo para fines agrícolas, la  
184 solución externa de un sistema es muy importante para estudiar y comprender debido a  
185 su estrecha relación con la nutrición del cultivo, siendo la fuente principal de la cual las  
186 raíces absorben todos los elementos en sus formas iónicas y que son indispensables  
187 para su desarrollo (Mengel & Kirkby, 2001; Snakin et al., 2001). Más aún, algunos  
188 autores (Bolt, 2013, citado en Narváez Ortiz, 2015) consideran que la solución interna  
189 del suelo es variable y por lo tanto no se podría especificar los niveles adecuados para  
190 el crecimiento de las plantas, más bien se le podría atribuir que tanto influye lo presente  
191 en la solución externa del suelo sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas, y de  
192 esa forma poder, con mayor detalle, especificar niveles idóneos para determinados  
193 cultivos. El grado de concentración de los elementos en la solución interna del suelo, es  
194 un indicador de la capacidad que presenta el sistema edáfico de proveer nutrientes hacia

195 un medio acuoso que está en contacto directo con las raíces de las plantas y es de  
196 donde toman los nutrientes (Mengel & Kirkby, 2001).

197 El estudio de los niveles nutrimentales del sistema suelo se ha realizado desde  
198 un enfoque reduccionista, el cual nos ha dado una comprensión profunda de las  
199 unidades más simples del sistema suelo (Coveney & Fowler, 2005), enfocándonos  
200 exclusivamente al estudio de determinadas propiedades físicas, químicas y biológicas  
201 del subsistema sólido. Si bien el estudio del mencionado subsistema es un indicativo del  
202 contenido potencial de aporte mineral de la fase sólida hacia la solución del suelo, lo  
203 importante es conocer el contenido nutrimental asequible para la planta (elementos  
204 asimilables).

205

#### 206 *Renovación*

207 Una propiedad presente en el sistema edáfico es el poder amortiguador de la  
208 variación de la concentración de los nutrientes en la solución externa del suelo, mediado  
209 por el proceso de renovación. En el caso de los cationes del suelo, esta propiedad puede  
210 definirse como el proceso físico-químico por el cual el complejo coloidal adsorbe o  
211 desorbe cantidades equivalentes de los mismos de la fase líquida o de contacto del  
212 suelo (Fuentes, 1971). Este equilibrio se establece entre los subsistemas de la fase  
213 sólida y la fase líquida, pero aun así pueden desplazarse en uno u otro sentido (Navarro  
214 Blaya & Navarro García, 2003).

215 Este fenómeno es fundamental en el funcionamiento y comportamiento de la  
216 solución, porque nos indica la capacidad que tiene el sistema edáfico, más específicamente  
217 la fase sólida del suelo para reponer o mantener las concentraciones o niveles de un  
218 determinado elemento en la solución externa del suelo (Barber, 1984; Van Rees et. al.,  
219 1990; Comerford, 1999; Tinker & Nye, 2000). El conocer el poder regulador del suelo se  
220 ha utilizado para conocer la disponibilidad de nutrientes (Van Rees et. al., 1990). Es

221 debido a esta complejidad que el proceso de renovación se torna complejo y  
222 dependiente de cada sistema en particular, impidiendo su estudio de manera  
223 generalizada haciendo necesaria la realización de estudios particulares de cada suelo  
224 en laboratorio.

225

#### 226 *Factor Intensidad: Solución Externa*

227 La concentración de nutrientes en la solución externa del suelo es el resultado  
228 íntegro de la interacción de todos los subsistemas del sistema suelo, y que puede ser  
229 catalogada como una propiedad emergente. Mencionada propiedad emergente puede  
230 ser estudiada desde su composición mineral para poder comprender lo que realmente  
231 está sucediendo en el sistema suelo desde una perspectiva nutrimental y le permitirá al  
232 sistema edáfico llevar a cabo determinadas funciones, dentro de ellas proveer en forma  
233 asimilable los diferentes nutrientes para el crecimiento de las plantas y organismos  
234 presentes en el sistema edáfico (Vezzani, 2001; Concepción, 2002; Schmitz, 2003). Se  
235 estima que la concentración de nutrientes en la solución externa del suelo, para suelos  
236 no salinos, es 100 veces menor a la concentración del mismo en la solución interna. Sin  
237 embargo, por lo antedicho es evidente que dicha relación es meramente didáctica y no  
238 puede ser utilizada con fines diagnósticos.

239 La determinación de Ca en la solución externa del suelo no se realiza en  
240 laboratorios con fines diagnóstico ya que no existen curvas que ajusten dichos valores  
241 con el comportamiento de las especies vegetales. Aun así, es dable esperar que dichos  
242 valores se ajustaran directamente con la disponibilidad de nutrientes si se ajustara con  
243 la demanda del cultivo y su capacidad de absorción. Algunos autores han trabajado  
244 sobre la concentración de nutrientes necesarios de Ca en solución que permitan  
245 desarrollos óptimos (Aued & Malchiodi, 2018).

246            Navarro Blaya & Navarro García (2003) mencionaron que desde el análisis y  
247 estudio de la fase sólida es difícil predecir la concentración de nutrientes en la solución  
248 externa debido a la compleja interacción existente entre ellos y a la variabilidad de los  
249 métodos de análisis. Estos métodos dependen mucho del potencial extractor de las  
250 diferentes técnicas empleadas en los laboratorios agrícolas, dependiendo del tipo de  
251 suelo como del cultivo presente, a sabiendas que los mecanismos extractores no son  
252 idénticos entre las diferentes especies vegetales. Algunas condiciones del entorno se  
253 pueden enumerar y con esto podrían indicarse ciertas tendencias y aproximaciones  
254 (Bolt, 2013). A los términos mencionados sería de gran utilidad poder contar con curvas  
255 predictivas de concentraciones de los elementos en la solución externa del suelo en  
256 cada caso particular como datos iniciales sobre la fertilidad química de los mismos, que  
257 permitan iniciar estudios de suficiencia/deficiencia de nutrientes en relaciones más  
258 directas entre la concentración de los elementos y de donde son absorbidos por los  
259 cultivos.

260            La composición elemental de la solución del suelo refleja el impacto global de  
261 todos los componentes bióticos y abióticos, incluyendo el proceso de nutrición de las  
262 plantas (Snakin, 2001). Para poder resolver todas estas incógnitas, el estudio de la  
263 composición elemental de la solución del suelo resultaría una adecuada elección, de  
264 esta forma no caeríamos en el reduccionismo de los sistemas, sino que estaríamos  
265 estudiando el resultado de los efectos directos de las interacciones del sistema edáfico  
266 como un todo y no solo comprender de forma cuantitativa y detallada los procesos de  
267 interacción que rigen la composición de la solución del suelo (Bolt, 2013).

268

**269 Modelos matemáticos predictivos**270 *Generales*

271 La implementación de modelos matemáticos en el estudio de los sistemas  
272 complejos es de vital importancia para la comprensión de cualquier sistema, la  
273 recolección de muchos datos experimentales no es indicativo que tenemos un gran  
274 conocimiento del sistema sino solo gran cantidad de información. El paso crucial en  
275 estos estudios es la utilización de toda esta información desde una perspectiva  
276 predictiva y del cómo funciona el sistema. En el estudio de sistemas complejos y de sus  
277 propiedades emergentes se pueden utilizar enfoques multidisciplinarios que estudian  
278 las interacciones múltiples y complejas, de y entre los componentes medidos en el  
279 sistema (Porras & Bayman, 2011). Dentro de este tipo de estudios se encuentran los  
280 análisis multivariados; un detalle con este tipo de análisis es el uso de toda la  
281 información recolectada, con la cual existe riesgo de usar información repetida que  
282 tenga alta colinealidad, misma que pueden irse depurando para elegir determinadas  
283 variables (variables independientes o variables de acondicionamiento) que influyan más  
284 en el sistema y puedan explicar su funcionamiento (Jenny, 1941). En la estadística  
285 multivariada, los métodos que pueden ser utilizados en el estudio del conocimiento de  
286 la composición elemental de la solución del suelo se encuentra:

287 - Análisis no supervisados:

- 288 1. El análisis de componentes principales puede ser utilizado como herramienta  
289 descriptiva que reduce la dimensionalidad del conjunto de datos multivariados,  
290 remueve las interrelaciones existentes entre variables, organiza los datos en forma  
291 de vectores ortogonales; con este método lo que se logra es crear una función lineal  
292 con la cual explicar el comportamiento multivariado del sistema constituido por la  
293 solución del suelo (James et. al., 2013).

294 2. Análisis de conglomerados (clusters) utilizado para el agrupamiento de variables,  
295 reconocer patrones jerárquicos y orientarnos a la reducción de la dimensión de  
296 estudio en grupos homogéneos en función de las similitudes o similitudes entre  
297 ellos (Peña, 2002).

298 - Análisis predictivos:

299 1. Regresiones múltiples que nos ofrecen la ventaja de utilizar toda la información en  
300 la construcción del modelo seleccionando las variables que influyan en la respuesta  
301 y descartando las variables que no aporten información y no tengan efectos  
302 significativos (James et. al., 2013).

303 2. Correlaciones canónicas que tienen como finalidad estudiar la relación multivariante  
304 de dos grupos homogéneos de variables, en particular, los dos grupos pueden  
305 corresponder a las mismas variables medidas en dos momentos distintos en el  
306 tiempo y el espacio (Peña, 2002).

307 El uso de modelos de ecuaciones estructurales es otra opción a considerar como  
308 una herramienta para el estudio de la composición elemental de la solución del suelo, el  
309 cual nos permite el uso de dos o más estructuras (causa-efecto) para modelar las  
310 relaciones multivariantes (Grace, 2006) y nos representa las relaciones directas versus  
311 las indirectas, así como las contribuciones parciales de las variables explicativas  
312 correlacionadas e hipótesis alternativas. La metodología también permite la inclusión de  
313 variables latentes no observadas y el agrupamiento de efectos de variables múltiples en  
314 variables compuestas (Grace & Bollen, 2008). Además, pueden utilizarse para derivar  
315 nuevas hipótesis.

316

317 *Solución Externa*

318 Lince Salazar et al. (2015), en un estudio realizado en la zona central cafetera  
319 de Colombia, lograron ajustar una función de regresión lineal múltiple con una confianza  
320 del 95% para determinar la disponibilidad de Ca, Mg y K en función de las propiedades  
321 del suelo. Dichos autores encontraron que las concentraciones de Ca, Mg y K en la  
322 mayoría de los casos, en ambas fases (fase de cambio y solución), no presentaron  
323 diferencia estadística en los primeros 30 cm del perfil, salvo algunas excepciones,  
324 principalmente en los primeros 5 cm de profundidad (pudiendo deberse a la actividad de  
325 los ácidos orgánicos, enzima fosfatasa y/o quelantes). Finalmente, se determinó que las  
326 concentraciones de Ca en la solución se explicaron desde 36,97% hasta 88,1% por la  
327 fase de cambio, las de Mg desde 32,23% hasta 97,3% y las de K desde 79,06% hasta  
328 94,68% mediante modelos lineales que incluyeron nutrientes de suelo y propiedades  
329 como CIC, pH y contenido de arcillas. Las concentraciones de Ca, Mg, K en la solución  
330 del suelo se lograron explicar por la fase de cambio, mediante modelos lineales  
331 generales (se incluyen todas las unidades de suelo) y modelos individuales (para cada  
332 unidad). El Ca, por ejemplo, fue explicado por un modelo general con expresión directa  
333 de las variables K, P y Mn de la fase de cambio; el cual difirió de los modelos individuales  
334 por un menor  $R^2$  (52,56%), además también difirió por no contar con otras variables  
335 explicativas. Con estos modelos se corroboraron las propuestas de otros autores (Anda  
336 et al., 2015; Emamgolizadeh et al., 2015) al indicar que hay relación entre la  
337 disponibilidad de Ca, Mg y K con los micronutrientes del suelo, propiedades químicas  
338 del suelo como la CIC o el pH y con el contenido de arcillas. La relación entre la  
339 concentración del catión en la solución (intensidad) y la concentración en la fase de  
340 cambio (capacidad) en algunos casos se explicó con la presencia del catión en los  
341 modelos. En los modelos en los cuales la concentración del catión en solución no se  
342 explicó en función del catión en la fase de cambio se puede deber a lo que Arias et. al.

343 (2009), Melo et. al. (2009) y Sparks (2003) identifican como consecuencia de las  
344 interacciones entre iones, la fijación por parte de las arcillas y la influencia de la CIC y  
345 el pH.

346       Para ampliar la investigación sobre el comportamiento dinámico de la solución  
347 del suelo es conveniente utilizar nuevas herramientas para su modelado, como el  
348 modelo lineal y polinómico que hace posible pronosticar variables de respuestas  
349 cualitativas y cuantitativas a partir de variables cuantitativas y cualitativas predictivas.  
350 Pero esta no es la única aplicación que se puede dar a los modelos lineales y  
351 polinomiales: también permiten la construcción de modelos predictivos, seleccionando  
352 las variables con mayor influencia en la respuesta y descartando las variables que no  
353 aportan información relevante, o no tienen efectos significativos (James et. al., 2013).  
354 Este tipo de análisis se ha informado al modelar la respuesta de absorción de los  
355 elementos minerales en maíz y arroz (Li et al., 1998), así como en la predicción de  
356 ciertas propiedades de suelos como pH, Ca, Mg, K, P, Al y H, suma de bases y  
357 saturación de aluminio, utilizando datos espectrales del suelo a diferentes profundidades  
358 (Genú & Demattê, 2011). Esta energía resulta principalmente de la interacción de cuatro  
359 factores: i) contenido de materia orgánica; ii) humedad del suelo; iii) contenido de  
360 minerales, y iv) textura (Van der Meer, 1999).

361       De acuerdo con los coeficientes obtenidos por el método de validación cruzada  
362 para todas las variables medidas en la solución del suelo, el pH fue la única variable que  
363 se ajustó a la del modelo lineal, donde las variables categóricas predictivas: tratamientos  
364 (agua de riego, solución nutritiva Steiner, fertilizantes sólidos y extracto acuoso  
365 orgánico) y los tipos de suelo (calcáreos y forestales) obtuvieron el coeficiente de error  
366 de validación más bajo. Se obtuvieron modelos con diferentes grados polinomiales,  
367 donde en el caso de la concentración de K, Ca y Na el modelo adecuado fue el  
368 cuadrático, mientras que para el potencial redox, el N, el Mg y el B es el de grado  
369 cuartico. Dentro de todos los modelos polinomiales se encontraron implícitas las

370 variables categóricas (tratamientos y tipos de suelos). Por lo tanto, sería posible realizar  
371 estudios semejantes para otras zonas geográficas de manera de poder explicar las  
372 variaciones de concentración de un nutriente como el Ca, a partir de diferentes  
373 parámetros físicos, químicos y/o biológicos que se incluyan en los modelos utilizados.

374

#### 375 *Isoterma de Adsorción*

376 Para el estudio de la adsorción de un elemento sobre la superficie de un coloide  
377 se han utilizado funciones llamadas “isotermas de adsorción” (Tan, 1993; McBride,  
378 2000; Foo & Hameed, 2010; Long et al., 2016). Estas funciones relacionan la cantidad  
379 de molécula/ión adsorbido con la concentración de los mismos en la solución. Dichas  
380 funciones han sido clasificadas en 4 tipos: L, S, C y H, según McBride (2000):

381 - Tipo L: esta isoterma refleja una relativa alta afinidad entre el adsorbido  
382 (ión/molécula) y el adsorbente o intercambiador. Es usualmente indicativa de  
383 quimiosorción.

384 - Tipo S: esta isoterma sugiere una adsorción cooperativa, la cual opera cuando  
385 la unión entre los iones/moléculas en la solución es mayor que la unión de estas  
386 con el intercambiador. Esta condición favorece la agrupación de moléculas en la  
387 superficie del coloide, ya que las uniones entre sí son más fuertes que la unión  
388 con la superficie del intercambiador

389 - Tipo C: esta isoterma sugiere una afinidad relativamente constante entre las  
390 moléculas/iones de la solución con el intercambiador. Este fenómeno es  
391 usualmente observado sólo en bajos rangos de adsorción. La desviación de la  
392 isoterma lineal (C) se debe a elevados niveles de adsorción. Un ejemplo de  
393 isoterma de tipo C, es el caso de moléculas orgánicas no polares de interés en  
394 suelos. La linealidad de la isoterma de tipo C es frecuentemente una adecuada  
395 descripción de la realidad en estos casos.

396 - Tipo H: esta isoterma indica una muy fuerte interacción molécula/ión o  
397 adsorbente con el intercambiador (quimiosorción), siendo realmente un caso  
398 extremo del tipo de isoterma L. Esta isoterma no es frecuentemente encontrada  
399 con moléculas orgánicas ya que pocas de ellas forman uniones iónicas o  
400 covalentes con los coloides

401 Las ecuaciones de Langmuir y Freundlich son utilizadas para describir isothermas  
402 de adsorción. Ambas reproducen la pendiente general de las isothermas de tipo L y H,  
403 respectivamente, decreciendo a mayores niveles de adsorción. La fórmula de la  
404 ecuación de Langmuir es (Sposito, 1989):

$$405 \quad q_i = b \left[ \frac{Kc_i}{(1 + Kc_i)} \right]$$

406 Según la ecuación de Langmuir, la cantidad ( $q_i$ ) de un ión/molécula adsorbida (i)  
407 está relacionada directamente con la concentración en equilibrio de dicho ión/molécula  
408 en la solución ( $c_i$ ), a través de los parámetros K y b. La magnitud de la pendiente inicial  
409 de la isoterma está determinada por K, la cual es, además, una medida de la afinidad  
410 del adsorbido con la superficie del intercambiador. El valor de b es el límite mayor de  $q_i$   
411 y, por lo tanto, representa la máxima adsorción de i, determinada por el número de sitios  
412 reactivos de adsorción en la superficie de dicho intercambiador.

413 La ecuación de Freundlich posee la siguiente fórmula:

$$414 \quad q_i = ac_i^n$$

415 Los parámetros a y n son parámetros ajustables de valores positivos. El valor de  
416 n oscila entre 0 y 1, y cuando  $n = 1$  la isoterma es lineal de tipo C. Los parámetros a y n  
417 se estiman graficando el  $\log q_i$  sobre el  $\log c_i$ .

418 Es posible que en casos reales ocurran isothermas más complejas, sin embargo,  
419 las mismas pueden ser consideradas híbridas de los cuatro tipos principales descriptos.  
420 Sólo las de tipo H y L son típicas de quimiosorción, mientras que la tipo S y C son  
421 indicativas de adsorción de naturaleza física, generalmente. Las funciones descriptas

422 por las isothermas no prueban los mecanismos de adsorción involucrados, sino que sólo  
423 evidencian los mecanismos de interacción, los que posteriormente deben ser  
424 confirmados por métodos directos de medición como la microscopía electrónica  
425 (McBride, 2000).

426 Según Kinniburgh (1986), el ajuste de las ecuaciones isotérmicas de adsorción  
427 a los datos experimentales es a menudo un aspecto importante de los datos de análisis.  
428 Si las isothermas de Langmuir y Freundlich son utilizadas, entonces se debe dar  
429 consideración a la adecuada ponderación de las observaciones. Preferiblemente  
430 regresión no lineal (mínimos cuadrados no lineales) deben utilizarse ya que este permite  
431 que estas isothermas se ajusten directamente y también permite a otras isothermas para  
432 ser probadas con poco esfuerzo extra.

433 Aunque las isothermas de Langmuir y Freundlich fueron presentadas por primera  
434 vez hace unos 70 años, todavía siguen siendo las dos ecuaciones isotérmicas de  
435 adsorción más utilizadas. Su éxito, sin duda, refleja su capacidad para adaptarse a una  
436 amplia variedad de datos de adsorción bastante bien, pero también puede reflejar  
437 parcialmente la simplicidad atractiva de las ecuaciones isotérmicas y la facilidad con que  
438 sus parámetros ajustables pueden ser estimados. Ambas ecuaciones isotérmicas  
439 pueden ser transformadas a una forma lineal y por lo tanto sus dos parámetros  
440 ajustables se estiman fácilmente ya sea por medios gráficos o regresiones lineales. Esta  
441 facilidad de ajuste puede haber llevado a las isothermas de Langmuir y Freundlich a que  
442 disfruten de algo más de "éxito" del que merecen, ya que un examen más detenido de  
443 los datos a menudo revela desviaciones sistemáticas de las isothermas ajustadas.

444 La forma usual de ajustar las isothermas de Langmuir y Freundlich implica encajar  
445 una de las formas transformadas de la ecuación original de la isoterma ya sea por  
446 medios gráficos o por regresión lineal del peso no ponderado. Las extensiones más  
447 prometedoras para el Langmuir y las isothermas de Freundlich se basan en el Langmuir  
448 generalizado e isothermas exponenciales generalizadas.

449 Los parámetros ajustables en las isothermas de Langmuir y Freundlich son  
450 normalmente estimadas por regresiones lineales dando lugar a diferentes estimaciones  
451 de parámetros dependiendo de cuál de las formas lineales se ajusta. Esta es porque  
452 cada una de estas transformaciones cambia la distribución de errores original (para bien  
453 o para mal). El mejor ajuste no es necesariamente lo que da el coeficiente de correlación  
454 más alto, sino más bien en el que la distribución de errores resultante coincide más con  
455 la "verdadera" distribución de errores. La transformación preferida puede por lo tanto,  
456 variar de conjunto de datos a conjunto de datos.

457 Algunas isothermas se acercan a un máximo de adsorción en altas  
458 concentraciones y se asemejan a una isoterma lineal a bajas concentraciones. Es cierto  
459 que los parámetros que describen este comportamiento asintótico no siempre puede ser  
460 bien definido debido a la limitada gama de datos experimentales disponibles, pero su  
461 presencia en las ecuaciones isotérmicas hace que sea un asunto simple definir valores  
462 razonables. Esta puede que no sea tan buena como almacenar junto a cada conjunto  
463 de isothermas parámetros de su rango válido pero es más sencillo. Siempre que la  
464 variable independiente (solución) sea reemplazada por una relación adecuada de  
465 actividad (o concentración), la flexibilidad de las isothermas de propósito general  
466 anteriores también pueden ser utilizadas con éxito para describir las reacciones de  
467 intercambio iónico.

468 Todas las isothermas discutidas aquí podrían ser razonablemente llamadas  
469 "empíricas" porque no se derivan de principios moleculares o termodinámicos. Son  
470 puramente descriptivas, y descripción no es lo mismo que explicación. Sin embargo, hay  
471 razones sólidas por las que se puede esperar que tales isothermas empíricas sigan  
472 jugando un papel importante en la química ambiental y, potencialmente para las ciencias  
473 agrarias. A su vez, en contraposición a las curvas de adsorción, quienes evalúan la  
474 cantidad de nutrientes adsorbidos, cabe hacer mención sobre la utilidad de contar con  
475 la información acerca de cuanta cantidad de nutrientes queda en solución ante el

476 agregado de fertilizantes básicos sólidos. Dicha información podría ser pertinente en la  
477 toma de decisión sobre las dosis de fertilizantes utilizadas para la práctica agrícola de  
478 fertilización, favoreciendo la eficiencia en la utilización de los recursos.

479

## 480 **Fertilización**

481 La práctica de la fertilización básica se lleva a cabo cuando se detectan  
482 deficiencias nutricionales, sean estas absolutas o relativas, por medio de los métodos  
483 diagnósticos mencionados precedentemente. El objetivo de fertilizar es aumentar la  
484 producción de materia seca (granos, forraje, carne) por unidad de superficie mediante  
485 la incorporación de nutrientes catiónicos básicos en forma de sales sintéticas o  
486 minerales naturales. La cantidad de fertilizante a emplear por unidad de superficie  
487 (dosis) se determina por medio de curvas de calibración realizadas a partir de ensayos  
488 zonales, y discriminadas entre ellas por tipo de cultivo y nutriente.

489 La fertilización con bases como Ca y Mg, no es una práctica habitual en los  
490 sistemas productivos de Argentina. Sin embargo, es común obtener resultados  
491 satisfactorios de su empleo en producciones intensivas (hortícolas y frutales  
492 fundamentalmente). Existe, por lo tanto, la incertidumbre de si la variabilidad de  
493 respuesta a la aplicación de estas bases en cultivos extensivos obedece a su baja  
494 eficiencia o la incorrecta tecnología en su empleo. Fontanetto et al., (2011), a título de  
495 ejemplo, encontraron que la fertilización cálcica produjo efectos positivos sobre la  
496 producción de soja en la provincia de Santa Fe. Por otro lado, Narvárez (2015), demostró  
497 que la concentración de iones en la solución externa del suelo aumenta con el agregado  
498 de fertilizantes básicos sólidos, evidenciando una mayor fertilidad en esos casos.  
499 Resultados similares fueron encontrados por Kuchenbuch & Jungk (1984) evaluando el  
500 contenido de K intercambiable.

501 Desde un punto de vista agrícola, la aplicación de soluciones nutritivas presenta  
502 ventajas de dosificación, mayor eficiencia y aplicaciones localizadas, pero a pesar de  
503 esto, el tratamiento con la aplicación de fertilizantes sólidos, mostraron mayores niveles  
504 de iones disueltos en los suelos, posiblemente debido al suministro de nutrientes de  
505 forma controlada a lo largo del tiempo, aunque los fertilizantes utilizados fueron solubles  
506 en agua y no de liberación lenta (Narváez, 2015).

507 La investigación para el desarrollo de diagnósticos calibrados de nutrientes  
508 básicos, entre ellos Ca y Mg, es muy reducido para las condiciones de cultivos  
509 extensivos y suelos de Argentina, particularmente del área templada central. Contar con  
510 tal información sería de utilidad para optimizar el uso de los recursos naturales escasos  
511 y promover un sistema de producción agropecuario con bases en la conservación del  
512 suelo. Éste desarrollo incipiente del conocimiento del fenómeno de acidificación y su  
513 tratamiento vía fertilización hace que el manejo de ésta problemática sea reducida y  
514 generalmente sobre bases poco científicas y hasta, en muchos casos, prescriptos por  
515 las empresas comercializadoras de estos insumos.

516 **OBJETIVOS**

- 517       • Predecir la concentración de calcio en la solución externa del suelo a partir de  
518            otros parámetros edáficos en suelos de la provincia de Buenos Aires
- 519       • Determinar una curva de adsorción de calcio sobre tres suelos de la provincia de  
520            Buenos Aires
- 521       • Determinar una función de dosificación (relación entre la dosis de fertilizantes  
522            cálcicos y la concentración final de Ca en solución externa) sobre tres suelos de  
523            la provincia de Buenos Aires

524

525

526 **HIPÓTESIS**

- 527       • Es posible generar una función de regresión para predecir la concentración de  
528            calcio en la solución externa a partir de otras determinaciones físico-químicas  
529            del suelo
- 530       • Es posible ajustar una curva de adsorción para el catión calcio
- 531       • Es posible ajustar una función de dosificación entre el agregado de diferentes  
532            dosis de fertilizante cálcico y la concentración final de Ca en solución externa

533

534

**535 MATERIALES Y MÉTODOS**

536 Se realizó la determinación de 24 suelos, cuyas muestras fueron seleccionadas  
537 a partir de las siguientes características: ubicación en la posición de loma, de 0 a 20 cm  
538 de profundidad, suelos no salinos y no sódicos, con pH menor a 7 y de uso agropecuario.  
539 Fueron muestreados mediante muestra compuesta con 20 submuestras por muestra  
540 para superficies de 50 ha. Dichas muestras fueron secadas mediante circulación forzada  
541 a 40°C, mortereadas y tamizadas según la determinación practicada.

542

**543 Predicción de Ca soluble**

544 Sobre los suelos, siguiendo los protocolos SAMLA (2004), se realizaron los  
545 siguientes análisis:

- 546 a) pH actual: relación suelo/agua de 1/2,5, determinación potenciométrica (pH)  
547 b) textura: método de Bouyoucos. Determinación de Arena, Limo y Arcilla.  
548 c) Carbono Oxidable (CO) determinado por metodología Walkley & Black micrométodo  
549 d) Nitrógeno total por digestión ácida y destilación Kjeldahl (Nt)  
550 e) Fósforo extractable por metodología Bray-Kurtz 1 (Pbk)  
551 f) CIC y cationes intercambiables: método del acetato de amonio 1N pH 7 (bufferado),  
552 determinación de CIC por destilación Kjeldahl, Ca (CaCIC) y Mg (MgCIC) por  
553 quelatometría; K (KCIC) y Na (NaCIC) por fotometría de llama.  
554 g) Saturación con bases (S/CIC): se calcularon en base a la suma de cationes  
555 intercambiables (S) en relación a la CIC)  
556 h) Relación CaCIC/S y CaCIC/CIC  
557 i) Conductividad Eléctrica y Ca en extracto de saturación (CaCE)

558 Utilizando software estadístico (Di Rienzo et al., 2015), se realizó una regresión  
559 lineal múltiple que permitan inferir la concentración de Ca en la solución externa del  
560 suelo mediante el método de estadístico de selección de variables paso a paso

561 (Stepwise) con significancia de parámetros p-valor  $<0,05$ , utilizando las determinaciones  
562 efectuadas como variables regresoras. También se evaluaron otros parámetros  
563 estadísticos como el nivel de ajuste de la regresión a través del valor de  $R^2$ , el cuadrado  
564 medio del error (CMError), el error cuadrático medio predictivo (ECMP) y los valores de  
565 AIC (criterio de información de Akaike) y BIC (criterio de información bayesiano) que se  
566 asocian a la calidad relativa del modelo.

567

### 568 **Curva de adsorción y función de dosificación**

569 Para la creación de las funciones de adsorción y de dosificación, los suelos se  
570 analizaron por el procedimiento de cantidad/intensidad basado en el método descrito en  
571 Beckett (1964), modificado para Ca.

572 Se prepararon por separado una solución madre de cloruro de calcio, 10 mmol/l  
573 de  $\text{CaCl}_2$  y cloruro de potasio, 10 mmol  $\text{l}^{-1}$  de KCl. A partir de estas soluciones separadas,  
574 se prepararon concentraciones graduadas de calcio. Los tratamientos consistieron en  
575 agregar diferentes concentraciones de Ca, expresadas en miliequivalentes de Ca  
576 agregadas por litro (meqagr/l), a cada una de las muestras. Las dosis fueron de 0,25;  
577 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8 y 9 meqagr  $\text{l}^{-1}$ .

578 Se pesaron duplicados de 4 g de suelos de cada muestra de suelo y se  
579 transfirieron cuantitativamente a cada uno de los cinco tubos de plástico de 50 ml.  
580 Luego, se agregaron 40 ml de las soluciones de concentración graduada a los tubos de  
581 plástico identificados de manera correspondiente. Las suspensiones se agitaron luego  
582 con un agitador vaivén horizontal durante media hora (180 rpm y  $25 \pm 1$  ° C) y se dejaron  
583 equilibrar durante la noche. Después del equilibrio, las suspensiones se filtraron  
584 utilizando un papel de filtro Whatman N° 42, y las soluciones de equilibrio se analizaron  
585 para determinar Ca mediante determinación por complejometría con EDTA.

586            Para el cálculo de la curva de adsorción se determinó la concentración de Ca  
587 final en solución externa (meql<sub>ext</sub>) y se realizó la diferencia entre ella y la concentración  
588 de Ca agregada en cada tratamiento (meqagr/l) para realizar el cálculo de cantidad de  
589 miliequivalentes adsorbidos por gramo de suelo (meqads/g). En la función de  
590 dosificación se realizó la comparación entre la cantidad de calcio agregada en cada  
591 tratamiento (meqagr/l) y la concentración final de Ca en solución externa (meql<sub>ext</sub>).

592            Utilizando software estadístico (Di Rienzo et al., 2015), se ajustó el Ca presente  
593 en solución externa para cada uno de los tratamientos realizados mediante el agregado  
594 de Ca para los tres suelos en función de diferentes modelos lineales (simples y  
595 polinomiales) como también no lineales para las diferentes isothermas de adsorción y  
596 funciones de dosificación. Se realizaron pruebas de significancia de la regresión ANOVA  
597 y la significancia de los parámetros encontrados, evaluando los coeficientes de  
598 regresión. Se consideraron supuestos básicos (normalidad de los residuos,  
599 homocedasticidad de varianzas, entre otros), grado de ajuste de la regresión  
600 considerando bajos valores de cuadrado medio del error (CMError) y la combinación de  
601 simplicidad y pertinencia del modelo mediante bajos valores de AIC y BIC.

602

**603 RESULTADOS Y DISCUSIÓN****604 Predicción de Ca soluble**

605 El detalle de los resultados de los suelos analizados se presenta en el **ANEXO**,  
606 siendo pertinente aclarar que los resultados encontrados de Ca soluble en extracto de  
607 saturación variaron entre 1 y 2,8 meq l<sup>-1</sup>

608 El análisis de la regresión de predicción de Ca soluble en función de las variables  
609 analizadas por el método de selección de variables paso a paso (Stepwise) se presenta  
610 en la **Tabla 1**. La regresión retuvo a las variables CE y Ca/S, arrojando un R<sup>2</sup> de 0,55;  
611 un ECMP de 0,143, y una calidad relativa del modelo con valores aceptables de 21,047  
612 y 25,759 para el AIC y BIC, respectivamente. Los parámetros asociados fueron de 2,17  
613 para CE (p-valor=0,0021), 2,554 para Ca/S (p-valor=0,052) y el término independiente  
614 fue de -0,925 (p-valor=0,1266).

615 Se observa que las dos variables fueron significativas (p-valor<0,05) aunque el  
616 término independiente no se pudo comprobar que es significativamente diferente a 0,  
617 pero aun así pertenece al modelo emitido. La función fue:

618

$$619 \quad CaCE \text{ (meq/l)} = 2,17 \text{ CE (dS/m)} + 2,554 \text{ Ca/S} - 0,925$$

620

621 El grado de ajuste alcanzado por cada variable analizada de manera individual,  
622 CE y Ca/CIC fueron de 0,3452 y de 0,2762, respectivamente (**Figuras 1A y 1B**).

623

624 **Tabla 1.** Análisis de regresión lineal y Coeficientes de regresión y estadísticos  
 625 asociados para la función de predicción de Ca soluble en función de las variables de  
 626 suelos analizadas.

### 627 Análisis de regresión lineal

628

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
CaCE	24	0,551	0,508	0,143	21,047	25,759

631

632 *Selección Stepwise. Máximo p-valor para entrar: 0,05 Máximo p-valor para retener: 0,05*633 *Número original de regresoras: 17, regresoras retenidas en el modelo 2*

634

635

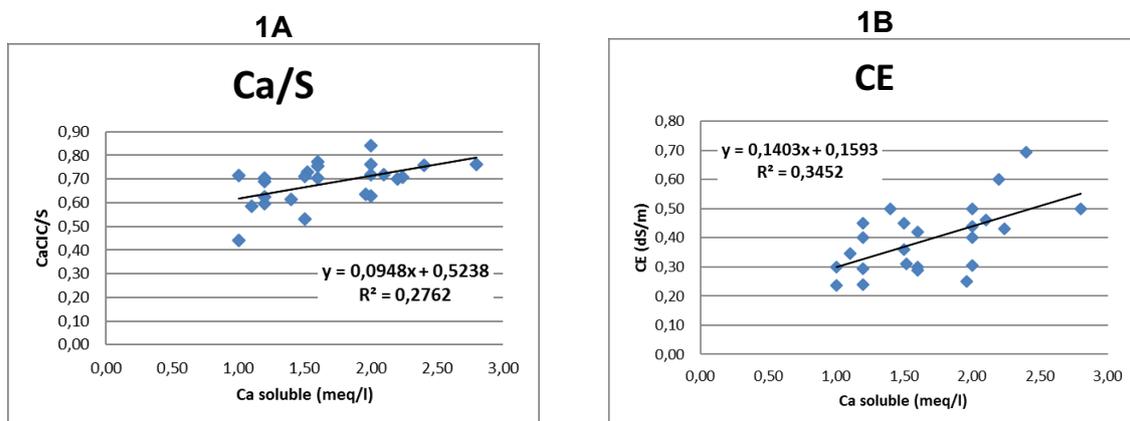
### 636 Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	-0,925	0,582	-2,134	0,284	-1,591	0,1266		
CE	2,175	0,619	0,887	3,462	3,513	0,0021	13,826	1,022
Ca/S	2,554	0,820	0,850	4,258	3,116	0,0052	11,316	1,022

641 *Error cuadrático medio: 0,115243*

642

643



**Figura 1.** Gráficos de las dos variables independientes con alto grado de ajuste y significancia, encontradas para generar un modelo predictivo de Ca en solución externa a partir de variables edáficas. **A:** Ca soluble en miliequivalentes por litro de solución externa en relación a la conductividad eléctrica medida en deciSiemens por m (dS/m). **B:** Ca soluble en miliequivalentes por litro de solución externa versus la relación de Ca y S, siendo S la suma de las bases de los suelos, representada como relación sin unidades.

644

645           Se logró ajustar una regresión de predicción de calcio soluble a partir de algunos  
646 parámetros edáficos en algunos suelos de la provincia de Buenos Aires, con grados de  
647 ajustes medios, asociado a que los suelos fueron similares, resultantes de la evolución  
648 de un mismo material de origen por pertenecer a una determinada zona geográfica  
649 dentro de la provincia, y a su vez con historiales productivos semejantes, regidos  
650 principalmente por la agricultura extensiva. Al igual que Lince Salazar et al. (2015)  
651 quienes también lograron ajustar una función de regresión lineal múltiple para  
652 determinar la disponibilidad de Mg, K y Ca en función de las propiedades del suelo en  
653 la zona central cafetera de Colombia, en este trabajo se logró encontrar una función con  
654 un ajuste significativo, para predecir la disponibilidad de Ca en solución externa, aunque  
655 debería seguirse trabajando para mejorar el grado de ajuste a valores agronómicos  
656 confiables para su utilidad. Se evidenció en el modelo que considerar la variación de la  
657 CE y el Ca/S puede explicar el 55% de la variación del Ca soluble, porcentaje muy similar  
658 al encontrado por los autores mencionados que fue de 52,56, pero con diferentes  
659 variables regresoras, las cuales fueron K, P y Mn de la fase de cambio. Con estos  
660 modelos, se ampliaron las relaciones edáficas entre nutrientes ya mencionadas por  
661 Anda et al. (2015) y Emamgolizadeh et al. (2015) quienes indicaron que hay relación  
662 entre la disponibilidad de Ca, además de Mg y K, con los micronutrientes del suelo y las  
663 propiedades químicas del suelo como la CIC o el pH. Por lo demostrado aquí, y como  
664 afirman Genú & Demattê (2011), es posible realizar estudios semejantes para otras  
665 zonas geográficas de manera de poder explicar las variaciones de concentración de un  
666 nutriente como el Ca, a partir de diferentes parámetros físicos, químicos y/o biológicos  
667 que se incluyan en los modelos utilizados.

668 **Curvas de adsorción**

669 En la curva de adsorción se identificó que se presentan dos segmentos con  
670 comportamiento diferencial en los tres suelos. El primer segmento corresponde a los  
671 tratamientos de 0,25 a 3 meqagr/l, mientras que el segundo segmento de 3 a 9 meqagr/l.  
672

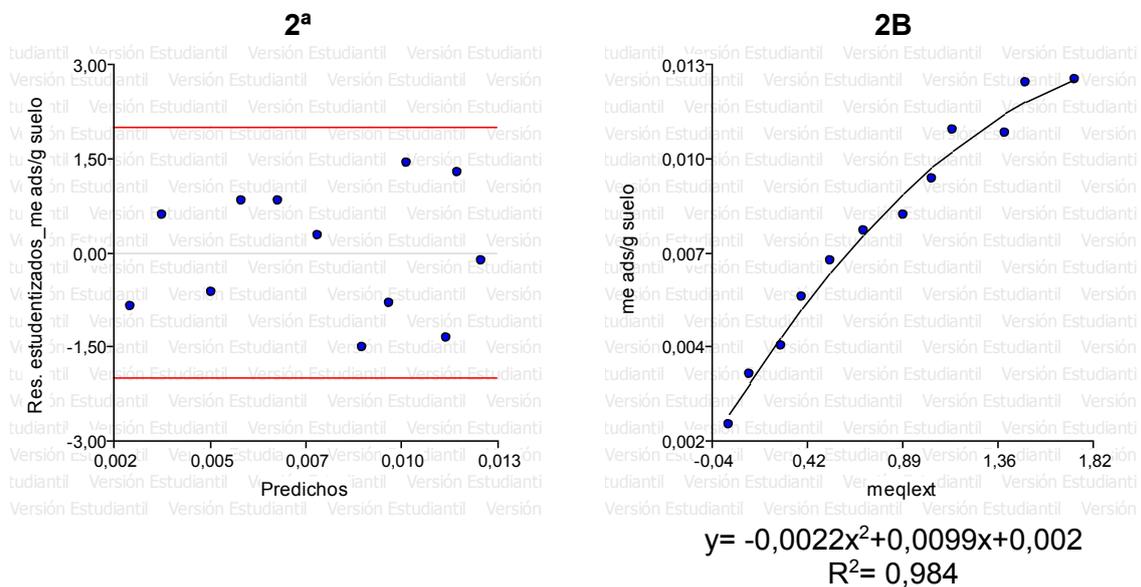
673 *Primer Segmento*674 *Bellocoq*

675 La regresión que mejor se ajustó a los datos obtenidos en este segmento fue un  
676 polinomio de grado dos con pendiente positiva y un parámetro cuadrático de valor  
677 negativo (**Figura 2B**). Los residuos observados se distribuyeron al azar (**Figura 2A**) y  
678 se considera que el modelo cumpliría con el supuesto de simplicidad, ya que es una  
679 regresión lineal polinómica de bajo grado. Los datos estadísticos analizados por el  
680 programa arrojan una alta significancia del modelo ( $p$ -valor $<0,0001$ ), un alto ajuste  
681 ( $R^2=0,984$ ;  $ECMP=3,9E-07$ ) y valores de AIC y BIC de muy bajos valores (-144,3861 y  
682 -142,4465 respectivamente), los cuales son favorables en la calidad relativa del modelo.  
683

684  
685  
686  
687

### Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
me ads/g suelo	12	0,9840	0,9804	3,9E-07	-144,3861	-142,4465



**Figura 2.** Análisis de regresión lineal de curva de adsorción de un de polinomio de grado dos para el primer segmento del suelo de Bellocq. **A:** Residuos estudentizados de los miliequivalentes adsorbidos por gramo de suelo en relación a los valores predichos de meqads/g correspondientes al primer segmento de la curva de adsorción de calcio. **B:** Miliequivalentes por litro de solución externa en relación a los miliequivalentes adsorbidos por gramos de suelo, junto a la función que representa el gráfico y su nivel de ajuste, del primer segmento de la curva de adsorción de calcio de Bellocq.

688

689 Los parámetros de la función arrojaron valores de -0,0022 para el término  
690 cuadrático (p-valor=0,0036), 0,0099 para el término lineal (p-valor<0,0001) y de 0,002  
691 para el término independiente (p-valor =0,0004) como se puede observar en el **ANEXO**.

692 La ordenada al origen de la función es una necesidad matemática, donde no se  
693 realizó el ensayo para ese tratamiento (agregado de agua destilada). Más aún, el valor  
694 positivo en este caso indica que, en el supuesto agregado de una concentración nula de  
695 calcio, habría adsorción en suelo, situación totalmente imposible. Aun así, es posible  
696 interpretar que a mayores valores de Ca en la ordenada de origen y en valores cercanos,

697 corresponderían a mayor adsorción de Ca ante el agregado de bajas concentraciones  
698 de Ca, y se podría asociar con menores concentraciones de Ca iniciales en la solución  
699 interna del suelo. Por otro lado, considerando el eje de las abscisas se puede mencionar  
700 que el valor de la raíz, es decir donde la función corta al eje y por ende el eje de las  
701 ordenadas se iguala en cero, podría corresponderse con la concentración de calcio  
702 inicial, ya que se correspondería con la concentración de calcio agregada que no  
703 produciría adsorción ni desorción debido a que se encontraría en equilibrio. Con respecto  
704 a ello, en el caso de Bellocq, también sugiere la escasa concentración de calcio inicial  
705 ya que ese comportamiento surgiría en condiciones de agregado de calcio negativas,  
706 imposible en la realidad.

707 La magnitud de los parámetros que se relacionan a la pendiente (grado uno) y  
708 el término cuadrático (grado dos), con valores de 0,0099 y de -0,0022, respectivamente,  
709 indicarían la tasa de adsorción en la ecuación. Este proceso, en general, explica que a  
710 mayor agregado de Ca aumenta su concentración en la solución externa, con  
711 incrementos decrecientes en la tasa de adsorción, evidenciado por ser un valor negativo  
712 en el término cuadrático. Este proceso se asocia, posiblemente, a la compleja  
713 interacción entre los nutrientes y los coloides, regidas por la cantidad y naturaleza de  
714 los coloides presentes (Zhang & Zhao, 1997; Jaramillo, 2002), la carga y la concentración  
715 de los iones implicados y su radio iónico hidratado (Jaramillo, 2002; Navarro Blaya &  
716 Navarro García, 2003)

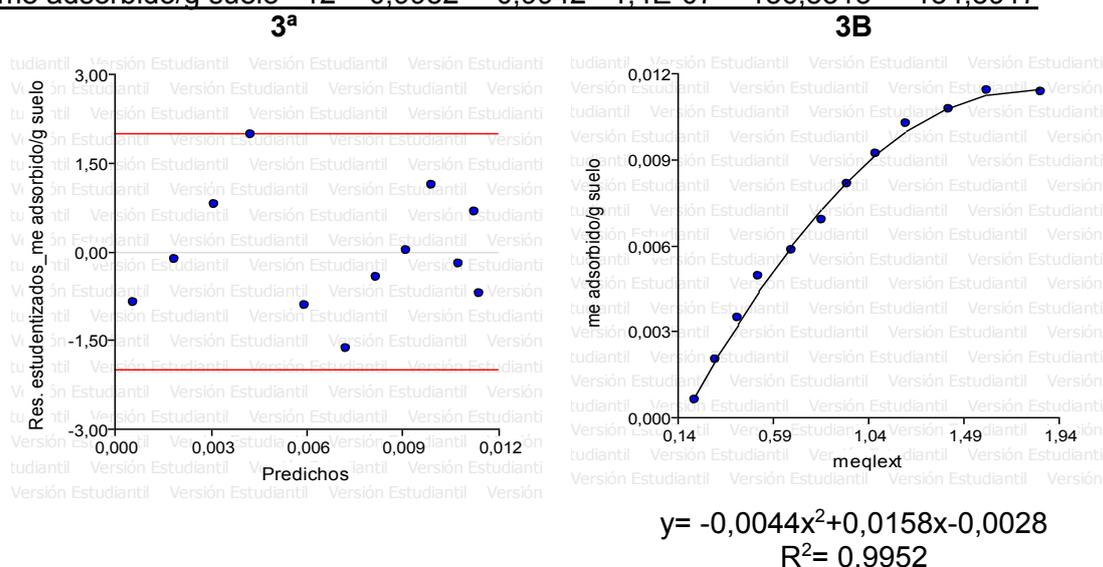
717 Es necesario destacar por adelantado, a pesar que se incursionará en ello más  
718 adelante, que este suelo presentó una tasa inferior a los otros dos suelos en el primer  
719 segmento de la curva de adsorción, indicando que la pendiente de la función no solo es  
720 más baja, sino que también el decrecimiento de la tasa es más progresivo. Éste  
721 comportamiento puede ser atribuido al menor porcentaje de coloides que presenta y por  
722 lo tanto la menor complejidad de las interacciones ocurridas, tanto de materia orgánica  
723 evidenciado a través del valor de CO (1,82%) como sobre todo de arcilla (6,72%).

724 *Inchausti*

725 La regresión que mejor se ajustó a los datos obtenidos en este segmento fue un  
 726 polinomio de grado dos con pendiente positiva y un parámetro cuadrático de valor  
 727 negativo (**Figura 3B**). Los residuos no se encuentran tan dispersos como sería  
 728 necesario (**Figura 3A**), pero de todos modos los datos estadísticos arrojan una alta  
 729 significancia del modelo (p-valor <0,0001), un alto grado de ajuste ( $R^2=0,9952$ ;  
 730  $ECMP=1,4E-07$ ) y muy bajos valores de AIC y BIC (-156,5313 y -154,5917,  
 731 respectivamente), el cual cumpliría a su vez con el supuesto de simplicidad por ser un  
 732 grado polinómico bajo.

### 733 **Análisis de regresión lineal**

734 Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
735 me adsorbido/g suelo	12	0,9952	0,9942	1,4E-07	-156,5313	-154,5917



**Figura 3.** Análisis de regresión lineal de curva de adsorción de un de polinomio de grado dos para el primer segmento del suelo de Inchausti **A:** Residuos estudentizados de los miliequivalentes adsorbidos por gramo de suelo en relación a los valores predichos del primer segmento de la curva de adsorción de calcio de Inchausti. **B:** Miliequivalentes por litro de solución externa en relación a los miliequivalentes adsorbidos por gramo de suelo, junto a la función que aparece en el gráfico y su nivel de ajuste.

736 Los parámetros del arrojaron valores de -0,0044 para el término cuadrático (p-  
737 valor <0,0001), 0,0158 para el término lineal (p-valor <0,0001) y de 0,0028 para el  
738 término independiente (p-valor <0,0001) como se puede observar en el **ANEXO**.

739 La ordenada al origen de la función es meramente una necesidad matemática,  
740 como se explicó anteriormente. Aun así, el valor negativo conduce a la interpretación de  
741 que en el equilibrio final del proceso hubo mayor cantidad de Ca soluble que el  
742 agregado, es decir, hubo desorción de Ca desde la solución interna a la solución  
743 externa, y correspondería con la variable en el momento que no se encuentra Ca en  
744 solución. Más aún, se podría asociar que a menores valores de Ca en la ordenada de  
745 origen, es decir mayores valores negativos, es esperable que se corresponda con  
746 mayores concentraciones de Ca en la fracción intercambiable del suelo, siendo la  
747 “reserva” de calcio en suelo generando una mayor capacidad “buffer” para reponer el  
748 calcio desde la solución interna a la solución externa. Con respecto al eje de las abscisas,  
749 el valor de la raíz en este caso es positivo, pudiendo calcular su valor en 0,1869 meq/l  
750 en solución externa. El menor valor encontrado con respecto al valor en suelo real se  
751 explica por la metodología utilizada, siendo la relación suelo/agua igual a 1:10 y por  
752 ende diluye la concentración de calcio soluble, además de generar interacciones entre  
753 los iones y coloides presentes en suelo.

754 La magnitud de los parámetros que se relacionan a la pendiente (grado uno) y  
755 el término cuadrático (grado dos), con valores de 0,0099 y de -0,0022, respectivamente,  
756 indicarían la tasa de cambio en la ecuación. Con respecto a ella, si bien el valor que  
757 multiplica el término lineal es mayor que en Bellocq, siendo 0,0158 y por consiguiente  
758 presentando una mayor pendiente, el valor que multiplica a la variable cuadrática  
759 también presenta una relación decreciente con un valor de -0,0044, indicando una  
760 menor tasa adsorción que Bellocq explicada por mayor presencia de coloides en el perfil  
761 que incrementan la complejidad de las interacciones generando una curva con un

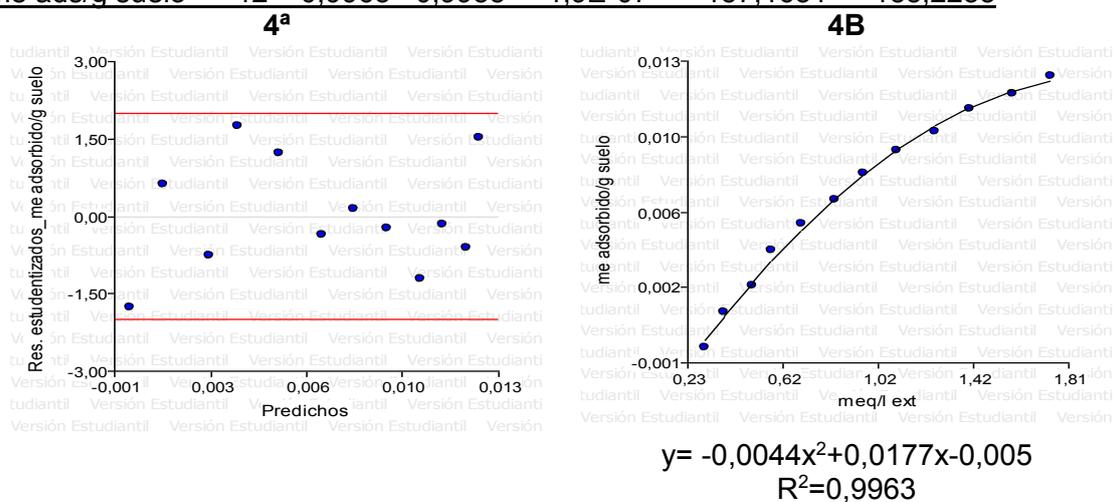
762 decrecimiento más marcado, sobre todo de arcilla (10,72%), ya que el valor de CO es  
763 muy similar al anterior (1,76%).

#### 764 *Belgrano*

765 En este caso, al igual que en los anteriores, la regresión que mejor se ajustó a  
766 los datos obtenidos fue la polinómica de grado dos, como se observa en la **Figura 4B**.  
767 La función cumpliría el supuesto de simplicidad del modelo por ser un polinomio de  
768 grado bajo. Los residuos se encuentran bien dispersos (**Figura 4A**), y los datos  
769 estadísticos demuestran una gran significancia de la función (p-valor <0,0001), un grado  
770 de ajuste muy elevado ( $R^2=0,9963$ ) y valores de criterios de calidad relativa del modelo  
771 muy bajos, los cuales justifican la elección del mismo (AIC: -157,1631 y BIC: -155,2235).

#### 772 **Análisis de regresión lineal**

773 Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
774 me ads/g suelo	12	0,9963	0,9955	1,9E-07	-157,1631	-155,2235



**Figura 4.** Análisis de regresión lineal de curva de adsorción de un de polinomio de grado dos para el primer segmento del suelo de Belgrano **A:** Residuos estudentizados de los miliequivalentes adsorbidos por gramo de suelo en relación a los valores predichos del primer segmento de la curva de adsorción de Belgrano. **B:** Miliequivalentes por litro de solución externa en relación a los miliequivalentes adsorbidos por gramo de suelo, seguido de la función representada en el gráfico y a su grado de ajuste.

775 Los parámetros del arrojaron valores de -0,0044 para el término cuadrático (p-  
776 valor <0,0001), 0,0177 para el término lineal (p-valor <0,0001) y de -0,005 para el  
777 término independiente (p-valor <0,0001) como se puede observar en el **ANEXO**.

778 La ecuación arrojada es muy similar a la de Inchausti, coincidiendo hasta en la  
779 magnitud negativa del término independiente. Este último, aunque de baja magnitud (-  
780 0,005) indicaría un proceso de desorción a baja concentración de Ca en solución  
781 externa. La tasa de adsorción, siguiendo la comparación, presentó un valor levemente  
782 superior en la pendiente (0,0177 vs 0,0158) e igual en el término cuadrático (-0,0044).  
783 La coincidencia podría ser explicada por similitud en los coloides del suelo,  
784 fundamentalmente la arcilla (8,72% vs 10,72%) por sobre el CO (3,23% vs 1,76%).

#### 785 *Freundlich – Langmuir*

786 La ecuación de Langmuir se ajustó en este segmento de datos solamente en el  
787 suelo de Bellocq (**ANEXO**), en donde presentó un CMError de 5,2E-07, considerado un  
788 valor muy bajo que indica un gran ajuste del modelo, además de un valor de significancia  
789 muy alto en sus parámetros (p-valor=0,0009 y p-valor<0,0001) y también valores de AIC  
790 Y BIC muy bajos, indicando una alta calidad relativa del modelo (-135,88 y -134,42  
791 respectivamente). Por otro lado, la ecuación de Freundlich también se ajustó a Bellocq  
792 (**ANEXO**), incluso con mejores datos estadísticos que Langmuir, en donde presentó un  
793 valor de significancia muy alto (ambos parámetros con p-valor <0,0001), valores muy  
794 bajos de los criterios de calidad relativa del modelo (AIC: -145,93 y BIC: -144,47) y un  
795 CMError muy bajo (2,2E-07), y también se ajusta a Inchausti, el cual presento también  
796 buenos valores estadísticos tanto en el modelo como en la significancia de los  
797 parámetros (CMError: 1,1E-06; AIC: -126,93; BIC: -125,47; p-valor <0,0001). A pesar de  
798 esto, las regresiones lineales presentaron iguales o mejores valores en los coeficientes  
799 de AIC y BIC, potenciando la mayor simplicidad de los modelos, tanto para el uso  
800 agronómico como también para la explicación de los procesos complejos que

801 intervienen en el suelo. Por tales motivos, se descartan los resultados obtenidos a partir  
 802 de dichas evaluaciones y se recomiendan los modelos lineales en este trabajo.

803

### 804 Segundo Segmento

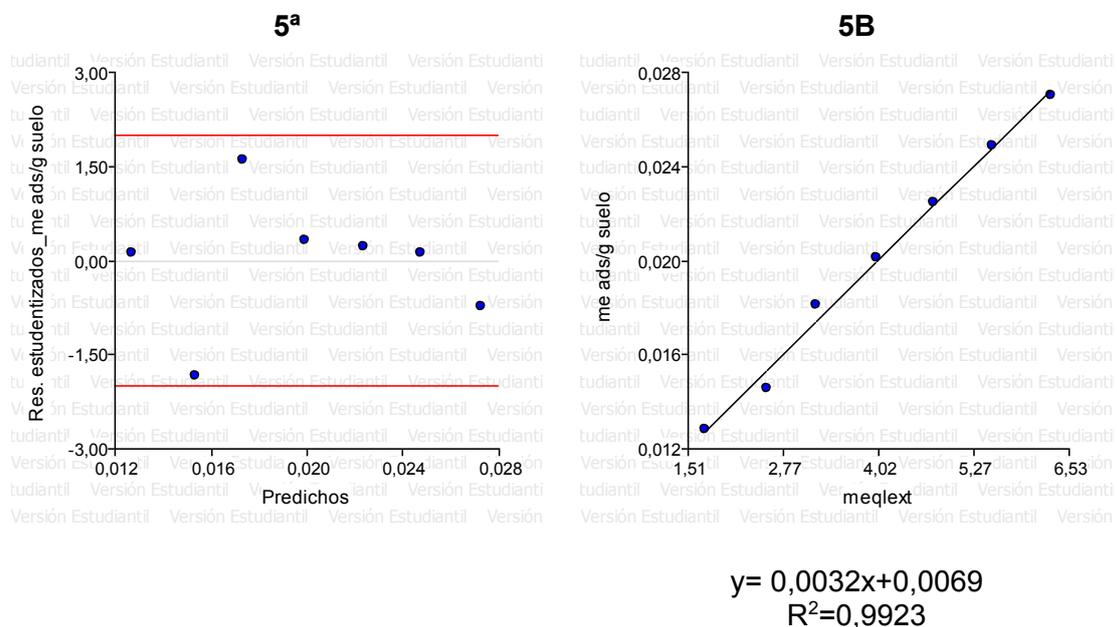
#### 805 Bellocq

806 La regresión que mejor se ajusta a este segmento es lineal, una recta de  
 807 pendiente positiva, como se puede observar en la **Figura 5B**, debido a que presenta los  
 808 mejores valores estadísticos (p-valor <0,0001,  $R^2$ : 0,9923, AIC: -82,68 y BIC: -82,84) y  
 809 además es el modelo más simple de los que se ajustan a los datos obtenidos. Los  
 810 residuos no se distribuyen al azar a lo largo de toda la recta (**Figura 5A**), pero de todos  
 811 modos, ningún valor se encuentra fuera de los límites admitidos en el gráfico.

#### 812 Análisis de regresión lineal

813 Variable	N	$R^2$	$R^2$ Aj	ECMP	AIC	BIC
814 me ads/g suelo	7	0,9923	0,9908	4,7E-07	-82,68	-82,84

815



**Figura 5.** Análisis de regresión lineal de curva de adsorción de una regresión simple para el segundo segmento del suelo de Bellocq A: Residuos estudentizados de los miliequivalentes adsorbidos por gramo de suelo en relación a los valores predichos del

segundo segmento correspondiente a la curva de adsorción de Bellocq. B: miliequivalentes por litro de solución externa en relación a los miliequivalentes adsorbidos por gramo de suelo del segundo segmento de Bellocq, sobre la función representada en el gráfico y el nivel de ajuste alcanzado por la misma.

816

817 Los parámetros de la función arrojaron valores de 0,0032 para el término lineal  
818 ( $p$ -valor $<0,0001$ ) y de 0,069 para el término independiente ( $p$ -valor $=0,0001$ ) como se  
819 puede observar en el **ANEXO**.

820 La ordenada al origen de la función, representada por un valor de 0,0069, es el  
821 valor más elevado de los tres suelos para este segundo segmento de la curva de  
822 adsorción, representando una mayor adsorción de los coloides de Bellocq a bajas  
823 concentraciones. Este proceso puede estar relacionado con la menor concentración de  
824 Ca inicial medida en la solución externa, interpretándose así que, ante un pequeño  
825 agregado de Ca, el equilibrio favorece el proceso de adsorción. Además, las pendientes  
826 encontradas asociadas a la tasa de adsorción, a pesar que son positivas e indican  
827 procesos de adsorción, son cercanas a la neutralidad (0,0032), asociándose a la baja  
828 adsorción generada por las elevadas concentraciones de Ca donde se realiza el ensayo.  
829 Aún así,

830

#### *Inchausti*

831 Se observa que los valores de la curva de adsorción para este segmento se  
832 ajustan a una regresión lineal representada por una recta de pendiente positiva,  
833 graficada en la **Figura 6B**. La función elegida es muy similar a la encontrada para  
834 Bellocq, sobre todo en el valor de su pendiente. Sus residuos no están bien dispersos  
835 (**Figura 6A**), pero esto se puede atribuir en parte a la escasa cantidad de valores que  
836 acrecientan las diferencias con respecto a la media de la recta. De todos modos se  
837 selecciona el modelo porque cumpliría con el supuesto de simplicidad por ser una

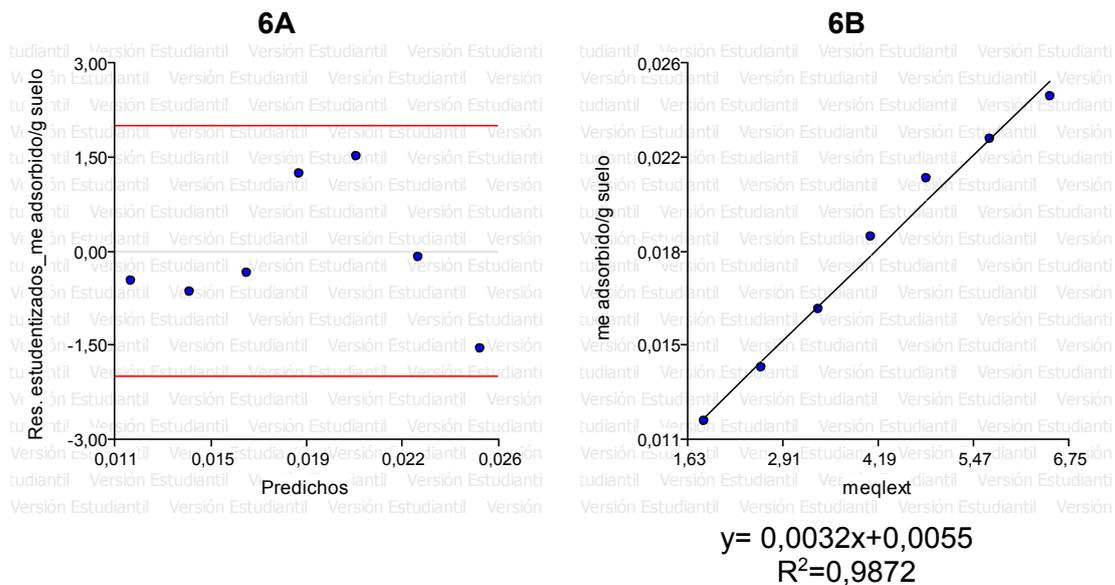
838 función simple, que a términos agronómicos resulta muy práctica. Además presentas  
 839 valores estadísticos de significancia ( $p$ -valor  $<0,0001$ ) y de ajuste ( $R^2=0,9872$ ) muy  
 840 elevados, y buenos valores de calidad relativa del modelo (AIC:  $-79,91$  y BIC:  $-80,07$ ).

841

#### 842 **Análisis de regresión lineal**

843 Variable	N	$R^2$	$R^2$ Aj	ECMP	AIC	BIC
844 me adsorbido/g suelo	7	0,9872	0,9846	8,0E-07	79,91	-80,07

845



**Figura 6.** Análisis de regresión lineal de curva de adsorción de una regresión simple para el segundo segmento del suelo de Inchausti A: Residuos estudentizados de los miliequivalentes adsorbidos por gramo de suelo en relación a los valores predichos del segundo segmento de la curva de adsorción correspondiente a Inchausti. B: Miliequivalentes por litro de solución externa en relación a los miliequivalentes adsorbidos por gramo de suelo correspondientes al segundo segmento de la curva de adsorción de Inchausti, junto a la función representada en el gráfico y su nivel de ajuste.

846

847

848 Los parámetros de la función arrojaron valores de 0,0032 para el término lineal  
849 ( $p$ -valor $<0,0001$ ) y de 0,0055 para el término independiente ( $p$ -valor=9,04) como se  
850 puede observar en el **ANEXO**. A pesar de que el término independiente no resulto  
851 significativo con respecto a cero, el modelo resulta significativo y el término  
852 independiente debe ser considerado.

853 La ordenada al origen, a pesar se una necesidad matemática y de encontrarse  
854 en situaciones de elevada concentración de calcio, es menor que para Bellocq (0,055  
855 vs 0,069) pero su tasa de adsorción es la misma, presentando el mismo valor numérico  
856 de 0,0032, pudiendo estar relacionado a que hay menor interacción entre nutrientes en  
857 altas concentraciones de Ca como se mencionara anteriormente. Cabe destacar que no  
858 se suelen encontrar mayores concentraciones que 5 meq/l ext en los suelos de la zona  
859 templada naturalmente como puede observarse en los datos expuestos en el **ANEXO** y  
860 por este motivo la gráfica tiende a ajustarse a modelos más simples (lineales).

#### 861 *Belgrano*

862 El segundo segmento de Belgrano, al igual que en los otros dos suelos, se  
863 representó mediante una regresión lineal, siendo específicamente una recta de  
864 pendiente positiva como se observa en la **Figura 7B**. Sus residuos no se distribuyen al  
865 azar de manera óptima (**Figura 7A**), pero aún así los mismos se encuentran dentro de  
866 los límites admitidos por el gráfico. Se optó en este caso por esta función, debido a que  
867 cumpliría con el supuesto de simplicidad, por ser una función sencilla de explicar y que  
868 se adecúa a la practicidad agronómica requerida.

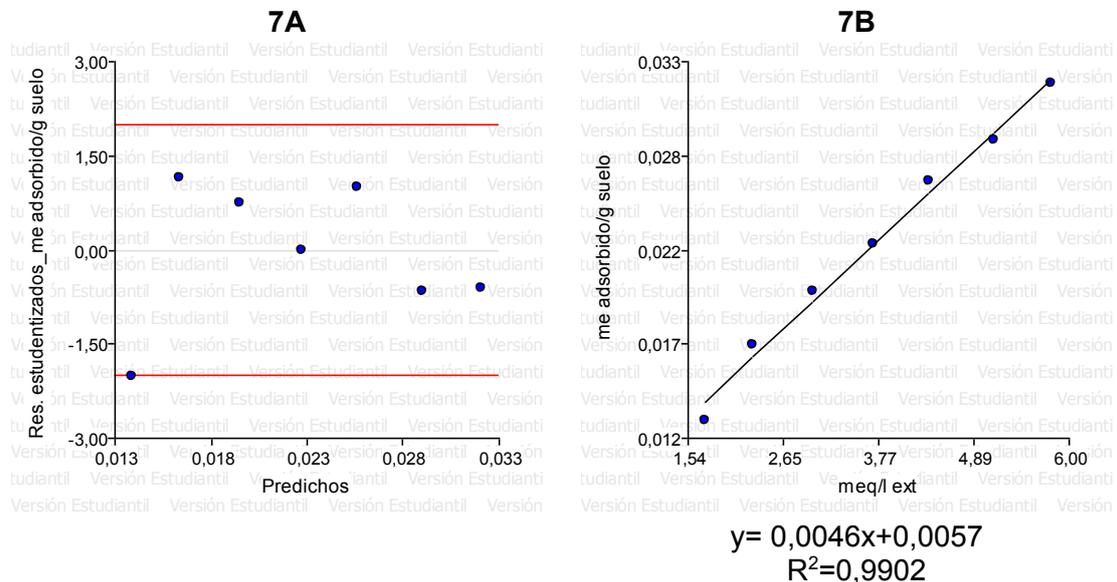
869

870

871 **Análisis de regresión lineal**

872 Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
873 me ads/g suelo	7	0,9902	0,9882	1,4E-06	-77,39	-77,55

874



**Figura 7.** Análisis de regresión lineal de curva de adsorción de una regresión simple para el segundo segmento del suelo de Belgrano **A:** Residuos estudentizados de los miliequivalentes adsorbidos por gramo de suelo en relación a los valores predichos para el segundo segmento de la curva de adsorción de Belgrano. **B:** Miliequivalentes por litro de solución externa en relación a los miliequivalentes adsorbidos por gramo de suelo en el segundo segmento de la curva de adsorción de Belgrano, seguido por la función graficada y su nivel de ajuste.

875

876 Los parámetros de la función arrojaron valores de 0,0046 para el término lineal  
 877 (p-valor<0,0001) y de 0,0057 para el término independiente (p-valor= 7,09) como se  
 878 puede observar en el **ANEXO**. A pesar de que el término independiente no resulto  
 879 significativo con respecto a cero, como en el caso de Inchausti, el modelo resulta  
 880 significativo y el término independiente debe ser considerado.

881 La ordenada al origen de este suelo es semejante a la que arroja Inchausti, pero  
 882 la tasa de adsorción es más elevada que los dos suelos anteriores, pudiendo estar

883 determinado por el mayor porcentaje de CO, que a mayores concentraciones de Ca en  
884 solución externa puede pesar más las relaciones con este coloide en particular.

#### 885 *Freundlich – Langmuir*

886 Las regresiones no lineales en ciertos suelos analizados se ajustaron a los datos  
887 de este segmento, como en los casos de Inchausti y Belgrano (**ANEXO**). Langmuir se  
888 ajustó mediante los mismos valores estadísticos, siendo significativos en los dos  
889 parámetros para ambos suelos (p-valor  $<0,0001$  y  $0,0007$ ) y, también en ambos casos,  
890 valores de ajuste elevados (CMError:  $2,6E-07$ , AIC:  $-82,54$  y BIC:  $-82,7$  para Inchausti y  
891 CMError:  $2,9E-07$ , AIC:  $-81,94$  y BIC:  $-82,1$  en Belgrano). Freundlich también se ajustó a  
892 los mismos suelos para el segundo segmento, con valores de significancia y de ajuste  
893 muy similares a Langmuir. (p-valor  $<0,0001$  para ambos parámetros de ambos suelos,  
894 CMError:  $2,2E-07$  en Inchausti y  $3E-07$  en Belgrano, AIC:  $-83,78$  y BIC:  $-83,94$  en  
895 Inchausti y valores de AIC:  $-81,7$  y BIC:  $-81,86$  para Belgrano). De todos modos, no se  
896 optó por ninguno de los mismos ya que las regresiones lineales presentan modelos más  
897 simples, e incluso mejores datos estadísticos en la mayoría de los casos. Desde el punto  
898 de vista agronómico, en términos prácticos, se adecuan mejor las regresiones lineales  
899 a los supuestos que requiere cumplir el trabajo de investigación.

900 Cabe destacar que los tres suelos, en términos generales, se comportaron de  
901 manera similar según los segmentos analizados de su curva de adsorción. Esto resulta  
902 de gran utilidad debido a que demuestra el equilibrio existente entre la concentración de  
903 Ca en miliequivalentes en la solución interna y la concentración del mismo catión en la  
904 solución externa. Esta relación directa es explicada por el proceso que interviene en el  
905 pasaje de nutrientes desde el factor capacidad a intensidad denominado renovación.  
906 Los cationes, como en el caso del Ca, pueden estar retenidos mediante un fenómeno  
907 físico de superficie (adsorción) a los coloides del suelo formando parte de la solución  
908 interna del suelo (fracción intercambiable), en donde dicha adsorción depende tanto de

909 las propiedades de los coloides (Zhang & Zhao, 1997 y Jaramillo, 2002) como de los  
910 iones presentes (Jaramillo, 2002 y Navarro Blaya & Navarro García, 2003). Este puede  
911 ser uno de los motivos por los cuales las tres muestras arrojan modelos semejantes ya  
912 que al pertenecer a una zona geográfica con similares materiales originarios del suelo,  
913 es decir, con similitudes en las propiedades que rigen la adsorción de los nutrientes y  
914 que a su vez no interfieren con el proceso de renovación, el equilibrio establecido entre  
915 ambas fases, interna y externa, demuestra un comportamiento similar. Esta propiedad  
916 puede relacionarse con lo que expresó Fuentes (1971) en referencia al poder  
917 amortiguador de la variación de la concentración de los nutrientes en la fase líquida del  
918 suelo presente en el sistema edáfico, mediante el cual el complejo coloidal absorbe o  
919 desorbe cantidades equivalentes de Ca de la solución externa o de la solución interna;  
920 fenómeno también mencionado y valorizado por otros autores a la hora de explicar el  
921 funcionamiento y comportamiento de la solución externa (Barber, 1984; Van Rees et al.,  
922 1990; Comerford, 1999; Tinker & Nye, 2000). Conocer esta propiedad puede ser de  
923 utilidad para conocer la disponibilidad de los nutrientes como sugiere Van Rees et al.  
924 (1990), tal como se intentó lograr mediante este trabajo.

925         A pesar de que aún se utiliza como método de diagnóstico la determinación de  
926 la concentración de cationes en la solución interna, siendo útil solo desde una  
927 perspectiva general de la fertilidad del suelo (Huggett, 1975; Ponge, 2005), la  
928 investigación realizada y expuesta en este trabajo intenta cambiar dicho paradigma. Se  
929 entiende que dicha fase sólida almacena nutrientes y podría permitir estimar la  
930 capacidad que posee el suelo para suministrar los nutrientes a las plantas, pero no  
931 indica en absoluto la disponibilidad de los mismos en la solución del suelo, de la cual las  
932 plantas los absorben, así como los cambios inducidos por ellas y por el microbioma  
933 edáfico (Marschner, 2012). Similarmente, autores como Bolt (2013, citado en Narváez  
934 Ortiz, 2015) consideran que la solución interna es variable y por consiguiente no se  
935 podría especificar los niveles adecuados para el crecimiento de las plantas,

936 representando, por lo tanto, solo un indicador de la capacidad del suelo de proveer  
937 nutrientes hacia la solución externa desde donde se nutren las especies vegetales  
938 (Mengel & Kirkby, 2001).

939 Los resultados de este trabajo estuvieron en concordancia con lo mencionado  
940 por James et al. (2013), quien afirmó que para ampliar la investigación sobre el  
941 comportamiento dinámico de la solución del suelo, es conveniente utilizar nuevas  
942 herramientas para su modelado, como el modelo lineal y el polinómico, haciendo posible  
943 pronosticar variables de respuesta cuantitativas y cualitativas a partir de variables  
944 cuantitativas y cualitativas predictivas; además de permitir construir modelos predictivos,  
945 seleccionando las variables con mayor influencia en la respuesta, de manera de ser lo  
946 más simples y significativas posible.

947 Al igual que en este trabajo de investigación, en donde se encontraron  
948 regresiones lineales para concentración de Ca en suelo, algunos autores como Genú &  
949 Demattê (2011) han encontrado modelos predictivos para algunas propiedades de los  
950 suelos, como el pH, Mg, K, P, Al, H, suma de bases, saturación de aluminio y también  
951 para Ca, utilizando datos espectrales, los cuales derivaron de la energía reflejada por  
952 un cuerpo como resultado de la interacción con los constituyentes del cuerpo. Se logró  
953 obtener modelos con diferentes grados polinomiales, donde en el caso de la  
954 concentración de K, Ca y Na el modelo adecuado fue el cuadrático, al igual que en el  
955 segundo segmento de los tres suelos analizados en este trabajo.

956 A pesar que las ecuaciones de Langmuir y Freundlich son algunas de las  
957 funciones utilizadas para describir isothermas de adsorción, es decir, funciones que  
958 relacionan la cantidad de un ión adsorbido con la concentración de los mismos en la  
959 solución (Tan, 1993; McBride, 2000; Foo & Hameed, 2010; Long et al., 2016), no se  
960 lograron ajustar en cantidades significativas con respecto a las regresiones lineales y  
961 polinómicas. Por el contrario, las regresiones lineales tuvieron mayores coeficientes de

962 ajuste, prefiriendo optar por ellas debido a su sencillez y aplicación con fines  
963 agronómicos.

964

#### 965 **Función de dosificación**

966 Al igual que en la curva de adsorción, en la función de dosificación se identificó  
967 que en los tres suelos se presentan dos segmentos que se comportaron de manera  
968 diferente. El primer segmento corresponde a los tratamientos de 0,25 a 3 miliequivalentes  
969 agregados de calcio por litro (meqagr/l), a partir de los cuales se obtuvieron los datos de  
970 los miliequivalentes adsorbidos por gramo de suelo (meqadsg) en relación a los  
971 miliequivalentes por litro presentes en la solución externa (meq/l ext), mientras que el  
972 segundo segmento se extendió desde los valores derivados de los tratamientos  
973 ubicados entre los extremos de 3 a 9 meqagr/l.

#### 974 *Primer Segmento*

#### 975 *Belloco*

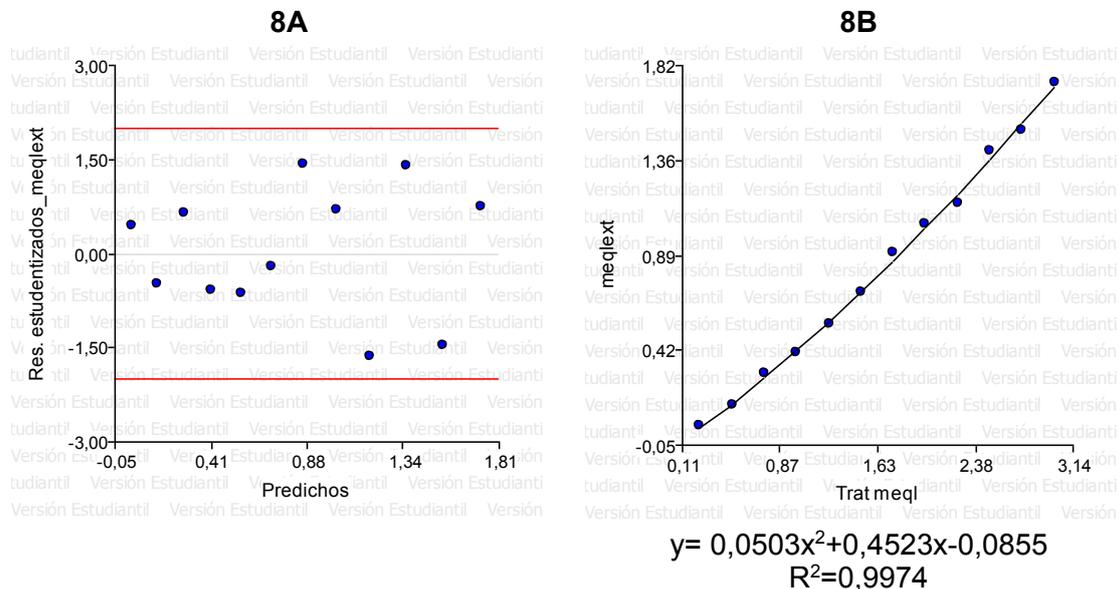
976 Se puede observar en la **Figura 8B** que la regresión que mejor se ajustó a los  
977 valores obtenidos fue una lineal polinómica de grado dos. Los residuos están bien  
978 distribuidos, de manera azarosa, indicando que los errores con respecto a la media  
979 están bien repartidos (**Figura 8A**). Esta función es muy simple de explicar por lo cual  
980 cumpliría con el supuesto de simplicidad perseguido por el trabajo. Los valores de  
981 significancia del modelo (p-valor= 0,0051) y de ajuste ( $R^2= 0,9974$ ) son muy elevados,  
982 y a su vez, la “solución de compromiso”, denominado trade-off, entre la bondad de ajuste  
983 del modelo y su complejidad arroja valores negativos, que indican una aceptable calidad  
984 relativa del modelo (AIC: -44,55 y BIC: -42,51).

985

986  
987  
988  
989

### Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
meqlext	12	0,9974	0,9968	1,6E-03	-44,55	-42,61



**Figura 8.** Análisis de regresión lineal de la función de dosificación de un de polinomio de grado dos para el primer segmento del suelo de Bellocq **A:** Residuos estudentizados de los miliequivalentes por litro de solución externa versus los valores predichos para el primer segmento de la dosificación de Bellocq. **B:** Tratamientos (miliequivalentes agregados de calcio por litro) en relación a los miliequivalentes por litro de solución externa del primer segmento correspondiente a Bellocq, junto a la función que está representada en el gráfico y su nivel de ajuste.

990

991 Los parámetros de la función arrojaron valores de 0,0503 para el término  
992 cuadrático (p-valor=0,0051), 0,4523 para el término lineal (p-valor<0,0001) y de -0,0855  
993 para el término independiente (p-valor=0,0268) como se puede observar en el **ANEXO**.

994 La ordenada al origen de este suelo tiene un valor negativo de -0,0855, indicando  
995 que ante el agregado de bajas o nulas cantidades de Ca se encontrarían  
996 concentraciones de Ca negativas y por ende es una necesidad matemática ya que es  
997 irreal. En este caso podría realizarse un análisis de la concentración de equilibrio donde  
998 coincida la concentración de calcio agregada con la finalmente medida luego del

999 equilibrio. Matemáticamente habría dos valores, de los cuales, en este caso, el primer  
1000 valor es negativo, no siendo posible en la realidad.

1001           En este caso, se puede mencionar que dicho valor sería 11,04 meq/l. Es evidente  
1002 que el valor es irreal y solo podría utilizarse con fines comparativos debido su elevada  
1003 magnitud con respecto al encontrado en suelo.

1004           La tasa de cambio de este suelo combina el valor más elevado de la pendiente  
1005 (0,4523) con el valor más bajo que afecta a la variable cuadrática (0,0503) por lo tanto  
1006 la gráfica demuestra un crecimiento cercano al lineal, debido posiblemente a la menor  
1007 concentración de coloides que interfieren en relaciones de baja complejidad con los  
1008 cationes.

1009                           *Inchausti*

1010           Se puede observar que la mejor regresión encontrada para este suelo en este  
1011 segmento fue la polinómica de grado dos (**Figura 9B**), un bajo grado que indica que se  
1012 cumpliría el supuesto de simplicidad buscado a fines agronómicos. Los residuos  
1013 arrojados no se distribuyen óptimamente, incluso el ultimo valor correspondiente al  
1014 tratamiento de 3 meq agr/ l excede los límites admitidos por el gráfico. (**Figura 9A**). Aún  
1015 así se optó por esta función debido a su simplicidad y los altos valores de significancia  
1016 (p-valor <0,0001) y ajuste ( $R^2=0,9982$ ) arrojados por la misma, siendo la única regresión  
1017 que lanzó valores aceptables, luego de realizar un ANOVA con una significancia  
1018 superior al 95% (p-valor <0,05). Además, el análisis de sus datos de AIC y BIC, justifican  
1019 aún más esta elección, por arrojar valores bajos que indican buena calidad relativa del  
1020 modelo (-50,43 y -48,49 respectivamente).

1021

1022 **Análisis de regresión lineal**

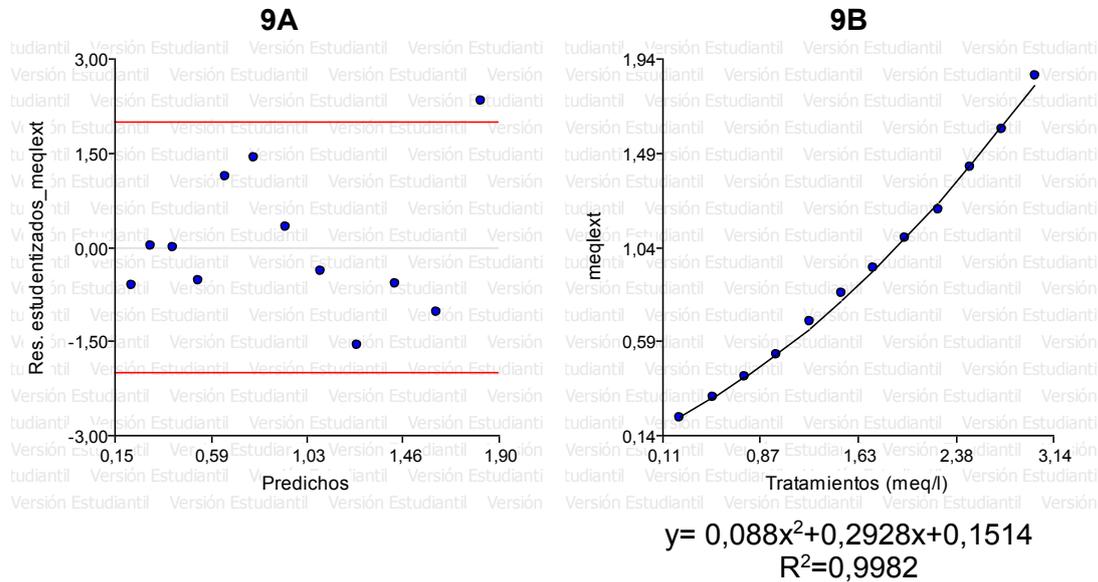
1023

1024

1025

1026

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
meqlext	12	0,9982	0,9978	1,5E-03	-50,43	-48,49



**Figura 9.** Análisis de regresión lineal de la función de dosificación de un de polinomio de grado dos para el primer segmento del suelo de Inchausti **A:** Residuos estudentizados de los miliequivalentes por litro de solución externa en relación a los valores predichos para el primer segmento de la dosificación de Inchausti. **B:** Tratamientos (miliequivalentes agregados de calcio por litro) versus miliequivalentes por litro de solución externa para el primer segmento de la dosificación de Inchausti, sobre la función graficada y su nivel de ajuste.

1027

1028

1029

1030

1031

1032

1033

1034

Los parámetros de la función arrojaron valores de 0,088 para el término cuadrático (p-valor<0,0001), 0,2928 para el término lineal (p-valor<0,0001) y de 0,1514 para el término independiente (p-valor=0,0002) como se puede observar en el **ANEXO**.

Este suelo presenta un término independiente positivo (0,1514), es decir que a bajas concentraciones agregadas de Ca en el equilibrio se produce una leve desorción de cationes de la solución interna favorecido el aumento de su concentración en la solución externa. En este caso, la raíz en el eje de las abscisas, asociada al equilibrio, se

1035 encontraría en 7,81 meq/l, menor concentración que en el primer caso pero, como se  
1036 mencionó, no son valores tan directo debido a los errores e las interacciones entre iones  
1037 generadas por la relación suelo/agua elevada. Por otro lado, la tasa de cambio indicó  
1038 un comportamiento diferente a Bellocq, por presentar el menor valor de pendiente  
1039 (0,2928 vs 0,4523) y el mayor valor que multiplica al término cuadrático (0,088 vs  
1040 0,0503) comportándose entonces de manera más abrupta en los cambios en el gráfico  
1041 según los tratamientos realizados. Lo anterior puede ser explicado por el mayor  
1042 porcentaje de coloides en el suelo que incrementan la complejidad del sistema y por lo  
1043 tanto las interacciones ocurridas en el mismo.

1044

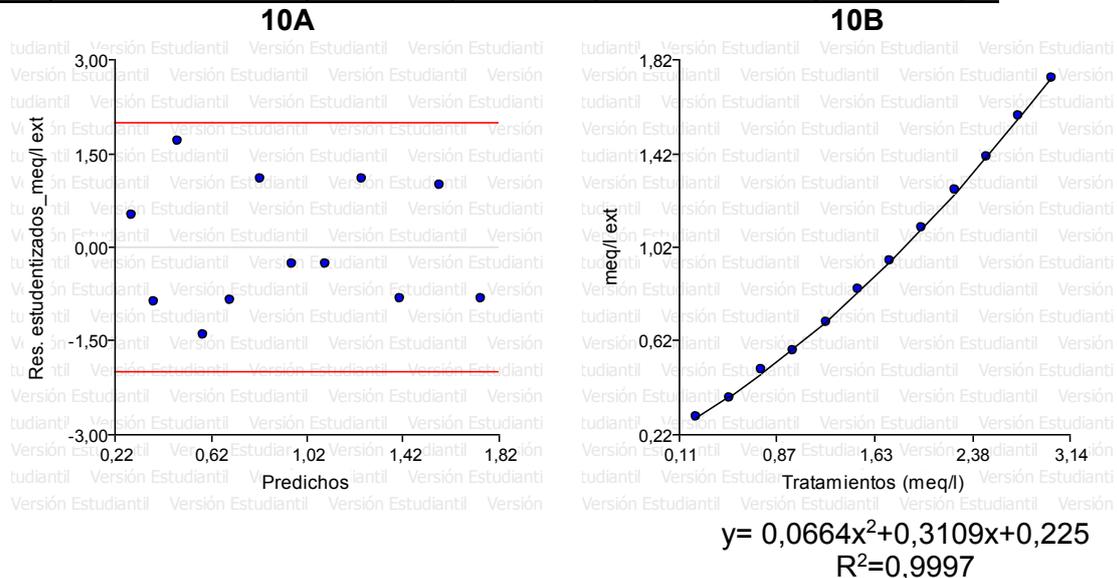
1045 *Belgrano*

1046 Se puede observar en la **Figura 10B** que la regresión que mejor se ajusta a los  
1047 datos obtenidos para este segmento analizado es un polinomio de grado dos, el cual al  
1048 ser de bajo grado cumpliría con el supuesto de simplicidad buscado. Los residuos están  
1049 bien distribuidos (**Figura 10A**), favoreciendo la selección del modelo. Los valores de  
1050 significancia y ajuste arrojados por el modelo son muy elevados (p-valor <0,0001 y  
1051  $R^2=0,9997$ , respectivamente), y los valores de AIC y BIC son bajos (-73,31 y -71,37),  
1052 indicando todo ello una correcta elección del modelo.

1053

1054 **Análisis de regresión lineal**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
meq/l ext	12	0,9997	0,9996	1,5E-04	-73,31	-71,37



**Figura 10.** Análisis de regresión lineal de la función de dosificación de un de polinomio de grado dos para el primer segmento del suelo de Belgrano **A:** Residuos estudentizados de los miliequivalentes por litro de solución externa versus los valores predichos para el primer segmento de la dosificación de Belgrano. **B:** Tratamientos (miliequivalentes agregados de calcio por litro) en relación a los miliequivalentes por litro de solución externa correspondientes al primer segmento de la dosificación de Belgrano, seguido por la función representada y su nivel de ajuste.

1057

1058 Los parámetros de la función arrojaron valores de 0,0664 para el término  
 1059 cuadrático (p-valor<0,0001), 0,3109 para el término lineal (p-valor<0,0001) y de 0,225  
 1060 para el término independiente (p-valor<0,0001) como se puede observar en el **ANEXO**.

1061

1062 La ordenada al origen también presenta un valor positivo de 0,215 indicando un  
 1063 proceso de recuperación de calcio ante el nulo agregado de calcio, evidenciando la  
 1064 desorción de calcio. En cuanto a la tasa de cambio, demuestra valores promedios y por  
 1065 consiguiente un comportamiento de la función intermedio entre los expuestos en los dos  
 1066 suelos anteriores para este segmento, como son 0,3109 de pendiente y 0,0664 como  
 1066 valor multiplicador de la variable cuadrática.

1067 Segundo Segmento

1068 Bellocq

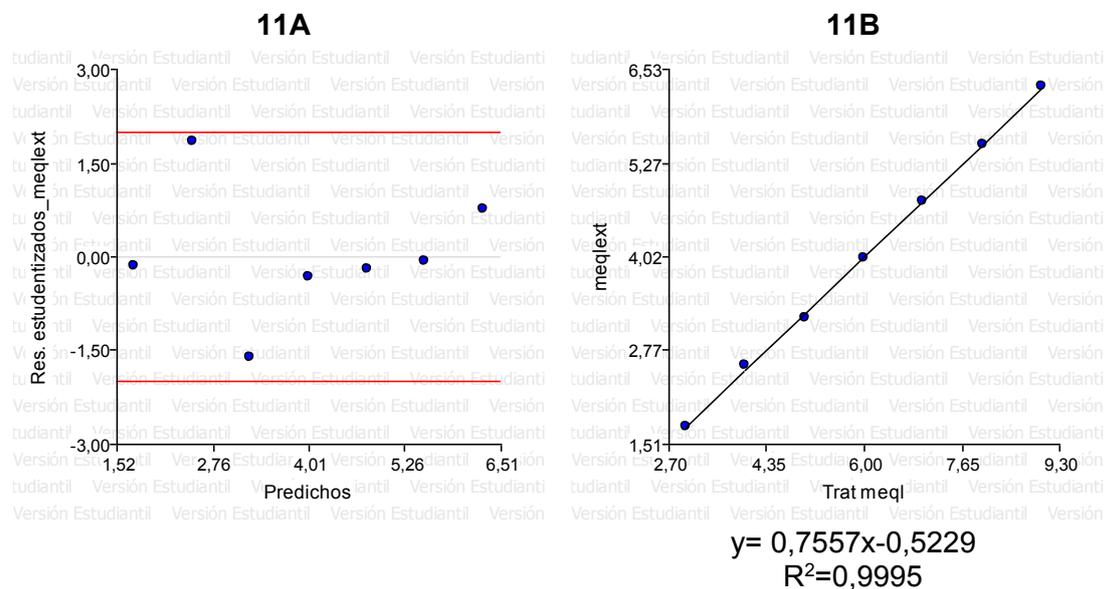
1069 Se puede observar que la función que mejor se ajuste a los valores  
 1070 correspondientes a este segmento es una regresión lineal, representada por una recta  
 1071 de pendiente positiva (**Figura 11B**), la cual cumpliría con el supuesto de simplicidad  
 1072 perseguido. Los residuos no se encuentran bien distribuidos (**Figura 11A**), pero todos  
 1073 los valores se encuentran dentro de los límites admitidos por el gráfico. El nivel de  
 1074 significancia alcanzado por el modelo es muy elevado ( $p$ -valor  $<0,0001$ ), al igual que su  
 1075 nivel de ajuste ( $R^2=0,9995$ ). Finalmente, la calidad relativa del modelo es buena,  
 1076 justificada por sus valores de AIC y BIC, aunque los mismos no son tan bajos como es  
 1077 deseable ( $-22,13$  y  $-22,29$ ).

1078

1079 **Análisis de regresión lineal**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
meqlext	7	0,9995	0,9994	2,7E-03	-22,13	-22,29

1082



**Figura 11.** Análisis de regresión lineal de curva de dosificación de una regresión simple para el segundo segmento del suelo de Belgrano **A:** Residuos estudentizados de los miliequivalentes por litro de solución externa en relación a los valores predichos

para el segundo segmento de la dosificación de Bellocq. **B:** Tratamientos (miliequivalentes agregados de calcio por litro) versus miliequivalentes por litro de solución externa correspondientes al segundo segmento de la dosificación de Bellocq, junto a su función y su nivel de ajuste.

1083  
1084           Los parámetros de la función arrojaron valores de 0,7557 para el término lineal  
1085 (p-valor<0,0001) y de -0,5229 para el término independiente (p-valor=0,0001) como se  
1086 puede observar en el **ANEXO**.

1087           En este suelo la variable independiente representa con un valor de -0,5229, el  
1088 más bajo de los tres suelos analizados para este segmento. El valor negativo es una  
1089 necesidad matemática debido a que no es posible encontrar concentraciones de Ca  
1090 negativas como ya se mencionó. En adición, las elevadas concentraciones donde se  
1091 realizó no permitiría interpretar certeramente ese resultado. La tasa de cambio,  
1092 expresada como la recuperación del Ca agregado, se ajustó con un comportamiento  
1093 lineal asociado a la reducción de las interacciones con los coloides. Más aún, las  
1094 pendientes encontradas fueron menores a la unidad, evidenciando que no se recupera  
1095 la totalidad del Ca agregado. La reducción en la disponibilidad de Ca, puede asociarse,  
1096 también, a otros procesos generados en suelo como pudiera ser la precipitación con  
1097 otros aniones. En este caso, indica que, en elevadas concentraciones quedaría en  
1098 solución externa la 0,7557 parte o, dicho de otra manera, el 75,57 %.

1099                           *Inchausti*

1100           Se observó que la función que mejor se ajustó es una regresión lineal  
1101 representada por una recta de pendiente positiva muy similar a la encontrada para  
1102 Bellocq, como se observa en la **Figura 12B**. Los residuos no se presentaron distribuidos  
1103 de manera óptima, pero aún así, ninguno de los valores sobrepasó los límites permitidos  
1104 (**Figura 12A**). Los valores de significancia y de ajuste resultaron ser muy elevados (p-

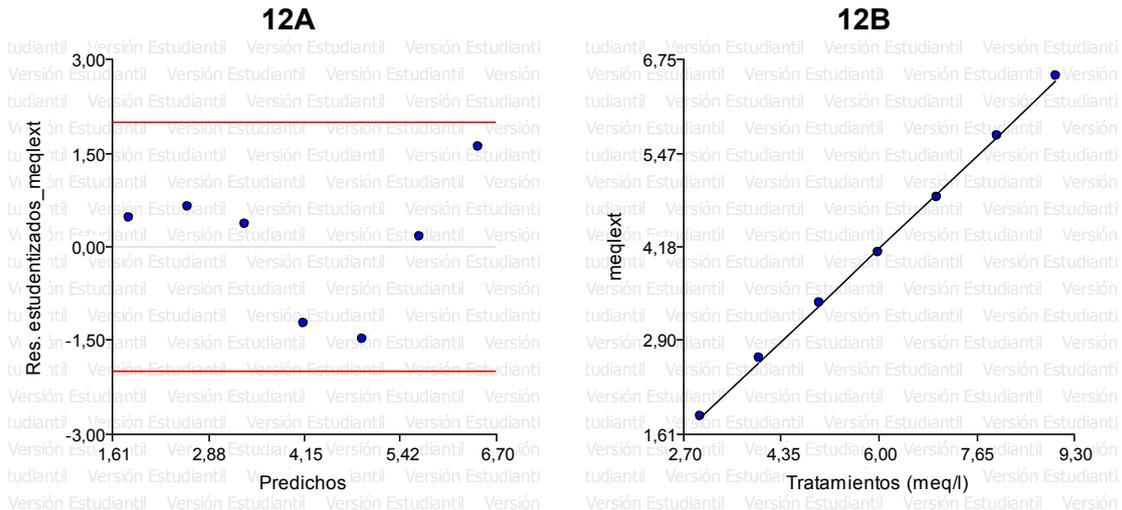
1105 valor  $<0,0001$  y  $R^2=0,9993$  respectivamente) justificando la elección del modelo, y los  
 1106 de AIC y BIC negativos, pero no muy bajos (-19,09 y -19,26).

1107

### 1108 **Análisis de regresión lineal**

1109 Variable	N	$R^2$	$R^2$ Aj	ECMP	AIC	BIC
1110 meqlext	7	0,9993	0,9992	4,7E-03	-19,09	-19,26

1111



$$y = 0,7593x - 0,4157$$

$$R^2 = 0,9993$$

**Figura 12.** Análisis de regresión lineal de curva de dosificación de una regresión simple para el segundo segmento del suelo de Inchausti **A:** Residuos estudentizados de los miliequivalentes por litro de solución externa en relación a los valores predichos para el segundo segmento de la dosificación correspondiente a Inchausti. **B:** Tratamientos (miliequivalentes agregados de calcio por litro) versus los miliequivalentes por litro de solución externa del segundo segmento de la dosificación de Inchausti, junto a la función representada en el gráfico y su nivel de ajuste.

1112

1113 Los parámetros de la función arrojaron valores de 0,7593 para el término lineal  
 1114 (p-valor $<0,0001$ ) y de -0,4157 para el término independiente (p-valor=0,0004) como se  
 1115 puede observar en el **ANEXO**.

1116 La variable independiente es negativa, como se mencionara por necesidad  
1117 matemáticas, pero menor que para Inchausti con un valor de -0,4157.. Su tasa de  
1118 recuperación es muy similar a la de Bellocq, pudiendo explicarse a través de sus  
1119 similitudes en cuanto a porcentajes de CO y teniendo en cuenta que a las  
1120 concentraciones utilizadas en los tratamientos analizados en este segmento son tan  
1121 altas que modifican las interacciones entre los nutrientes presentes y se generan otros  
1122 procesos en suelo.

### 1123 *Belgrano*

1124 En este caso, al igual que en los dos anteriores, la regresión que mejor se ajusto  
1125 fue una lineal, representada por una línea recta de pendiente positiva (**Figura 13B**), por  
1126 lo que se cumpliría el supuesto de simplicidad requerido. Los residuos arrojados por el  
1127 gráfico (**Figura 13A**) se observaron distribuidos de manera poco heterogénea, no siendo  
1128 esto una característica favorable para validar el modelo, aunque ningún valor excede  
1129 los límites admitidos. Los valores de significancia y ajuste del modelo son muy altos (p-  
1130 valor <0,0001 y  $R^2=0,999$ ), argumentos sólidos para optar por esta función, aunque al  
1131 igual que en los casos anteriores, los criterios utilizados para evaluar la calidad relativa  
1132 del modelo no fueron muy bajos (AIC: -18,21 y BIC: -18,37).

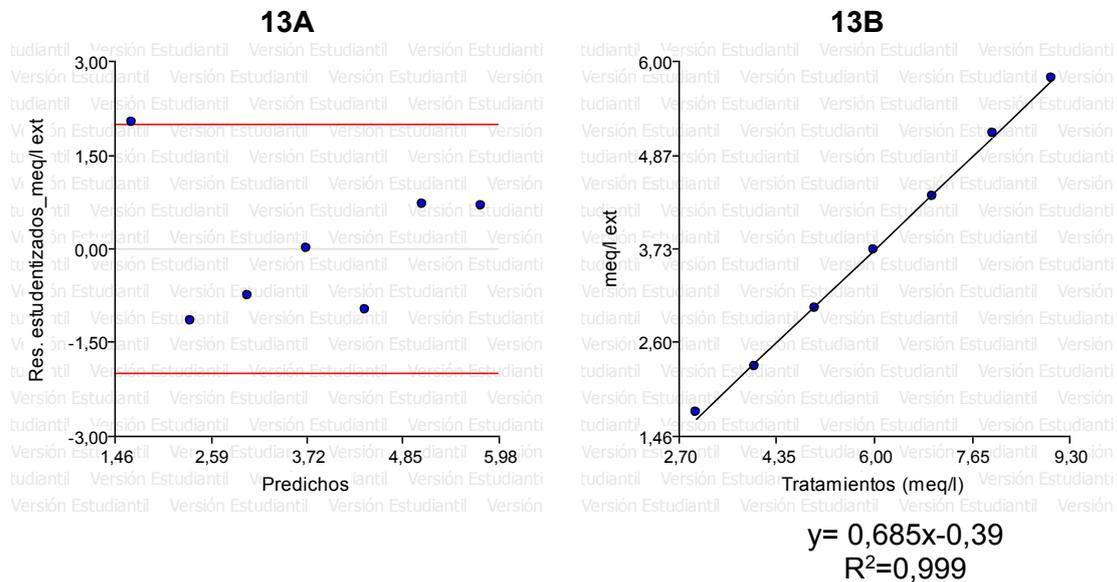
1133

1134

1135  
1136  
1137  
1138

### Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
meq/l ext	7	0,9990	0,9988	0,01	-18,21	-18,37



**Figura 13.** Análisis de regresión lineal de curva de dosificación de una regresión simple para el segundo segmento del suelo de Belgrano **A:** Residuos estudentizados de los miliequivalentes por litro de solución externa versus los valores predichos para el segundo segmento de la dosificación correspondiente a Belgrano. **B:** Tratamientos (miliequivalentes de calcio agregados por litro) en relación a los miliequivalentes por litro de solución externa del segundo segmento de la dosificación de Belgrano, sobre su función y el nivel de ajuste alcanzado.

1139

1140 Los parámetros de la función arrojaron valores de 0,685 para el término lineal (p-  
1141 valor < 0,0001) y de -0,39 para el término independiente (p-valor = 0,0014) como se puede  
1142 observar en el **ANEXO**.

1143 Finalmente a ordenada al origen de este suelo es semejante a la de Inchausti,  
1144 con un valor de -0,39, y su tasa de cambio con un valor de 0,685, significativamente  
1145 menor que los anteriormente analizados para este segmento, da una idea de que el  
1146 mayor porcentaje de CO influye de manera directa en la complejización de las  
1147 interacciones presentes, disminuyendo de esta manera la pendiente de la recta, y por

1148 ende disminuye la cantidad de Ca que queda disponible en solución externa a partir de  
1149 la agregada en los tratamientos.

1150 Al analizar los datos de la dosificación arrojados por el software estadístico,  
1151 también se observó que los comportamientos de los suelos resultaron muy similares. Se  
1152 decidió realizar este tipo de estudio, porque permite observar los tenores del catión  
1153 presentes en la solución externa, lo cual es muy importante ya que cuando la regulación  
1154 de la absorción no puede ejercida por la planta, el suelo tiene que poder ofertarlos en  
1155 cantidades adecuadas para satisfacer la demanda nutricional como evidenciaron Arrigo  
1156 & Conti (1985) en suelos de la Región Pampeana, ya que se absorben mayoritariamente  
1157 por flujo masal, sin tener la planta posibilidad de regularlos.

1158 La determinación de Ca en la solución externa no se realiza en laboratorios con  
1159 fines diagnóstico, ya que no existen curvas que ajusten dichos valores con el  
1160 comportamiento de las especies vegetales, por lo cual, este trabajo intenta generar  
1161 información relacionada a lo expuesto anteriormente, de manera de poder estudiar la  
1162 disponibilidad de nutrientes in situ, debido a que sería de gran utilidad generar curvas  
1163 de concentraciones de Ca en la fase líquida como datos iniciales sobre la fertilidad  
1164 química de los mismos, que permitan iniciar estudios de suficiencia/deficiencia de  
1165 nutrientes en relaciones directas entre la concentración del Ca y de donde es adsorbido  
1166 por los cultivos, como estudiaron Aued & Malchiodi (2018) quienes trabajaron sobre la  
1167 concentración de nutrientes necesarios de Ca en solución que permitan desarrollos  
1168 óptimos.

1169 Contrario a lo expuesto por Blaya & Navarro García (2003), quienes  
1170 mencionaron que desde el análisis y estudio de la fase sólida es muy complejo predecir  
1171 la concentración de nutrientes en la solución externa debido a la complejidad de la  
1172 interacción entre ellas y a la variabilidad de los métodos de análisis, sobre todo en  
1173 cuanto al potencial extractor utilizado en las diferentes técnicas de laboratorio, se pudo  
1174 encontrar modelos predictivos de concentración de Ca para los tres suelos analizados.

1175 Las coincidencias de los resultados encontrados se podrían explicar por la similitud entre  
1176 los suelos analizados, tanto desde el punto de vista geográfico, de relieve y físico-  
1177 químico, como también su exposición al mismo contexto productivo, es decir, con  
1178 historiales productivos semejantes. A pesar que Snakin (2001) menciona que se podrían  
1179 generar variaciones debido a diferencias en los componentes bióticos y abióticos, no se  
1180 observaron grandes diferencias en los resultados encontrados. Lo antedicho se podría  
1181 asociar a similitudes en la microflora de los suelos o bien a su baja incidencia en estos  
1182 estudios.

1183 Toda la información analizada hasta el momento, sumada a la expuesta en los  
1184 resultados de este trabajo, podría ser pertinente en la toma de decisiones sobre las  
1185 dosis de fertilizantes a utilizar para la práctica agrícola de fertilización con nutrientes  
1186 básicos, favoreciendo la eficiencia en la utilización de los recursos como menciona Bolt  
1187 (2013, citado en Narvárez Ortiz, 2015) y como demostraron Fontanetto et al. (2011) y  
1188 Narvárez Ortiz (2015) quienes trabajaron con fertilizantes básicos sólidos. Lo antedicho,  
1189 fomentaría la respuesta y reposición de nutrientes básicos en zonas donde no se realiza  
1190 rutinariamente en sistemas productivos extensivos de Argentina.

1191 Este trabajo se suma a todos aquellos realizados con la finalidad de investigar  
1192 para desarrollar diagnósticos calibrados de nutrientes básicos, entre ellos Ca, partiendo  
1193 de la base de que la información es muy reducida para las condiciones de cultivos  
1194 extensivos y suelos de Argentina, particularmente del área templada central de donde  
1195 pertenecen los tres suelos analizados (Ciarlo et al, 2018).

1196 Contar con esta información sería muy útil para optimizar el uso de los recursos  
1197 naturales escasos y promover un sistema de producción agropecuario con bases en la  
1198 conservación del suelo, permitiendo manejar la problemática de acidificación y su  
1199 tratamiento mediante la fertilización, con bases científicas, intentando evitar la  
1200 implementación de las prescripciones generadas por las propias empresas  
1201 comercializadores de dichos insumos, las cuales suelen carecer de bases teóricas. El

1202 estudio de la composición de la solución externa del suelo, como el llevado a cabo en  
1203 este trabajo, resulta adecuado para no caer en el reduccionismo de los sistemas, y poder  
1204 estudiar el resultado de los efectos directos de las interacciones del sistema edáfico  
1205 como un todo, condición mencionada por Bolt (2013, Narváez Ortiz, 2015).

1206

1207

## 1208 **CONCLUSIÓN**

1209           Se generó una función de regresión predictiva de la concentración de calcio en  
1210 solución externa a partir de algunos parámetros edáficos, utilizando como variables  
1211 regresoras a la conductividad eléctrica y a la saturación de Ca intercambiable en la  
1212 sumatoria de bases totales del suelo, pero con un alcance agronómico limitado debido  
1213 a su grado de ajuste.

1214           Se ajustó una curva de adsorción y una función de dosificación para el catión  
1215 calcio para cada uno de los suelos analizados, generadas a partir de una ecuación  
1216 polinómica de grado dos y una regresión lineal recta en diferentes concentraciones de  
1217 ambos tipos de funciones.

1218

1219 **BIBLIOGRAFÍA**

- 1220 Anda, M., Suryani, E. & Subardja, D. 2015. Strategy to reduce fertilizer application in  
1221 volcanic paddy soils: Nutrient reserves approach from parent materials. Soil and  
1222 Tillage Research, 150, 10-20.
- 1223 Anjos Reis, R., P.C. RezendeFontes, J.C. Lima Neves, & N. Terra Santos. 1999. Total  
1224 soil electrical conductivity and critical soil K<sup>+</sup> to Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> ratio for potato  
1225 crops. Soil Agric. 56(4): 993-997.
- 1226 Arias, E., Sadeghian, S., Mejía, B. & Morales, C.S. 2009. Lixiviación del nitrógeno en  
1227 algunos suelos de la zona cafetera y su relación con la textura.
- 1228 Arrigo, N., & Conti, M. 1985. Importancia de los mecanismos de intercepción radical,  
1229 flujo masal y difusión de Ca, Mg, K y Na en plantas de maíz en suelos pampeanos.  
1230 Revista de la Facultad de Agronomía, 6 (3), 183-188.
- 1231 Aued, Manuel & N., Malchiodi. 2018. Efecto de la concentración y relación de calcio y  
1232 magnesio en solución nutritiva para cultivos forrajeros de importancia en la Región  
1233 Pampeana argentina
- 1234 Baker, D. & M. Amacher. 1981. The development and interpretation of a diagnostic soil-  
1235 testing program. Pennsylvania State University Agricultural Experiment Station  
1236 Bulletin 826. State College, PA. Pennsylvania: Pennsylvania State University.
- 1237 Barber, S. A. 1984. Soil nutrient bioavailability. John Wiley. New York
- 1238 Bohn, H., McNeal, B., & OConnor, G. 1993. Química del Suelo. México: Limusa.
- 1239 Bolt, G. H., de Boodt, M. F., Hayes, M. H., McBride, M. B., y de Strooper, E. B. 2013.  
1240 Interactions at the Soil Colloid: Soil Solution Interface (Vol. 190). Springer Science  
1241 & Business Media. Netherlands. 604 pp.
- 1242 Borie, B.F., F.A. Gallardo, M.L.G. Mora & J.C. García. 1999. Sensibilidad y tolerancia a  
1243 la acidez de los cultivos en condiciones de campo. Frontera Agrícola 5 (1-2): 19-  
1244 28.

- 1245 Büll, L.T., R.L. Villas Bôas & J. Nakagawa. 1998. Variações no balanço catiônico do solo  
1246 inducidas pela adubação potássica e efeitos na cultura do alhofoveralizado. *Sci.*  
1247 *Agric.* 55(3): 456-464.
- 1248 Ciarlo, E., D. Cosentino, M. García & F. González. 2018. Analisis de participacion de  
1249 laboratorios de suelos en el programa PROINSA. Acta de conferencias, mesas  
1250 panel, trabajos completos, comunicaciones y resúmenes. XXVI Congreso  
1251 Argentino de la Ciencia del Suelo: 45-49.
- 1252 Comerford, N. 1999. Mecanismos de captación de nutrimentos en ecosistemas  
1253 forestales: de cómo interpretar la fertilidad en el contexto de la conservación de  
1254 recursos genéticos. pp. 127-135. In: Orellana, R., A. Escamilla y A. Larqué (eds.).  
1255 *Ecofisiología vegetal y conservación de recursos genéticos*. Centro de  
1256 Investigación Científica de Yucatán. Mérida, Yucatán, México
- 1257 Conti, M.; Maccarini, G.; González, M. 1983. Método rápido de corrección de suelos  
1258 ácidos. *Ciencia del Suelo*. 1: 15-20
- 1259 Coveney, P. V., y Fowler, P. W. 2005. Modelling biological complexity: a physical  
1260 scientist's perspective. *Journal of the Royal Society Interface*. 2(4): 267-280.
- 1261 Di Rienzo, JA., F Casanoves, MG Balzarini, L Gonzalez, M Tablada, CW Robledo. 2015.  
1262 InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba,  
1263 Argentina. URL: <http://www.infostat.com.ar>. Último acceso: noviembre de 2018.
- 1264 Demanet, R.F., B.M. Schnettler & M.L.G. Mora. 1999. Efecto del encalado y su relación  
1265 con los nutrientes sobre la producción de pasturas en suelos ácidos. *Frontera*  
1266 *Agrícola* 5 (12): 95-110.
- 1267 Emamgolizadeh, S., Bateni, S.M., Shahsavani, D., As-hrafi, T. & Ghorbani, H. 2015.  
1268 Estimation of soil cation exchange capacity using Genetic Expression  
1269 Programming (GEP) and Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS)

- 1270 Fassbender, H., & Bornemisza, E. 1987. Química de suelos con énfasis en América  
1271 Latina (2da ed.). San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación  
1272 para la Agricultura (IICA). , San José, Costa Rica. 420 p.
- 1273 Fontanetto, H., Gambaudo, S., Keller, O., Albrecht, J., Weder, E., Sillón, M., y otros.  
1274 2011. Fertilización cálcica en soja en la zona central de Santa Fe. Información  
1275 Técnica en Cultivos de Verano. Campaña 2011. Publicación Miscelánea N° 121 ,  
1276 94-99.
- 1277 Foo, K., & Hameed, B. 2010. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems.  
1278 Chemical Engineering Journal, 156 (1), 2-10.
- 1279 Fuentes, F. R. 1971. Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico en  
1280 algunos suelos ácidos de origen volcánico. Tesis de grado de maestro en ciencias.  
1281 Instituto Interamericano de ciencias agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. pp  
1282 18
- 1283 Genú, A. M., & Demattê, J. A. M. 2011. Prediction of soil chemical attributes using optical  
1284 remote sensing. Acta Scientiarum
- 1285 Graham, E. 1959. An explanation of theory and methods of soil testing. Missouri Agric.  
1286 Ext. Stn. Bull. 734.
- 1287 Grace, J.B. 2006. Structural Equation Modeling and Natural Systems. Cambridge  
1288 University Press, Cambridge
- 1289 Grace, J.B., Bollen, K. A. 2008. Representing general theoretical concepts in  
1290 structural equation models: the role of composite variables. Environ. Ecol.  
1291 Stat.
- 1292 Huggett, R. J. 1975. Soil landscape systems: a model of soil genesis. Geoderma, 13(1):  
1293 1-22.
- 1294 James, G., Witten, D., Hastie, T., y Tibshirani, R. 2013. An introduction to statistical  
1295 learning (Vol. 6). Springer. New York. USA.

- 1296 Jaramillo, D. 2002. Las propiedades químicas del suelo. En D. Jaramillo (Ed.),  
1297 Introducción a la ciencia del suelo (págs. 319-342). Medellín : Universidad Nacional  
1298 de Colombia.
- 1299 Jenny, H. (1941). Factors of soil formation: A system of quantitative pedology. McGraw-  
1300 Hill. New York, London. 281 pp.
- 1301 Kinniburgh, David G. (1986). General Purpose Adsorption Isotherms. Hydrogeology  
1302 Research Group, British Geological Survey, Wallingford, Oxon OX1 0 855, U.K.
- 1303 Kuchenbuch, R. and Jungk, A. (1984). Wirkung der Kaliumdüngung auf die  
1304 Kaliumverfügbarkeit in der Rhizosphäre von Raps. Z. Journal of Plant Nutrition  
1305 and Soil Science, 147(3), 435-448.
- 1306 Li, F., Shan, X., Zhang, T., & Zhang, S. (1998). Evaluation of plant availability of rare  
1307 earth elements in soils by chemical fractionation and multiple regression analysis.  
1308 Environmental Pollution, 102(2), 269-277
- 1309 Lince S., L. ;Rodríguez V., N. y Sadeghian K., S. (2015). Disponibilidad de Ca, Mg y K  
1310 en función de las propiedades del suelo, Zona Cafetera Central de Colombia.
- 1311 Loide, V. 2004. About the effect of the contents and ratios of soil's available calcium,  
1312 potassium and magnesium in liming of acid soils. Agron. Res. 2(1): 71-82.
- 1313 Long, G., Lizhi, X., Xiaowen, S., & Xiaoling, Z. (2016). Modeling adsorption with lattice  
1314 Boltzmann equation. Nature (6), 1-9.
- 1315 Marschner, P. 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Third Edition.  
1316 ELSEVIER. Londres, Inglaterra. 651 p
- 1317 McBride, M. (2000). Chemisorption and Precipitation Reactions. En M. Sumner (Ed.),  
1318 Handbook of Soil Science (págs. 265-302). Florida, United States of America: CRC  
1319 Press.
- 1320 Melo, V.D.F. & Alleoni, L.R.F. (2009). Química e mineralogia do solo. Parte I
- 1321 Mengel, K. y Kirkby, E. A. (2001). Principles of Plant Nutrition (5th Edition). Springer.  
1322 Dordrecht, The Netherlands. 807 p.

- 1323 Muñoz Hernández, R.J. & R.I. Silveira. (1998). Efeitos da saturação por bases, relações  
1324 Ca:Mg no solo e níveis de fósforo sobre a produção de material seco e nutrição  
1325 mineral do milho (*Zea mays* L.). *Sci. Agric.* 55(1): 79-85.
- 1326 Narváez Ortiz, William A. 2015. Desarrollo de Modelos Matemáticos para el Estudio de  
1327 la Concentración de Elementos en la Solución del Suelo.
- 1328 Navarro-Blaya, S. y Navarro-García, G. (2003). *Química Agrícola*. 2 edición.  
1329 Mundiprensa. Barcelona, España. 479 pp
- 1330 Oliveira, E.L. & M.S. Parra. 2003. Resposta do feijoeiro a relaçõesvariáveis entre cálcio  
1331 e magnesio na capacidade de troca de cátions de latossolos. *Rev. Bras. Ciênc.*  
1332 *Solo* 27(5): 859-866.
- 1333 Pankhurst, C., Kirkby, C., Hawke, B., & Harch, B. 2002. Impact of a change in tillage and  
1334 crop residue management practice on soil chemical and microbiological properties  
1335 in a cereal-producing red duplex soil in NSW, Australia. *Biology and Fertility of*  
1336 *Soils*, 35(3), 189-196.
- 1337 Peña, D. 2002 .Análisis de datos multivariantes. Vol. 24. Madrid: McGraw-Hill, España.
- 1338 Ponge, J. F. 2005. Emergent properties from organisms to ecosystems: towards a  
1339 realistic approach. *Biological Reviews*, 80(3), 403-411.
- 1340 Porras-Alfaro, A. y Bayman, P. 2011. Hidden fungi, emergent properties: endophytes  
1341 and microbiomes. *Annualreview of phytopathology*. 49: 291-315.
- 1342 Sadeghian K., Siavosh. 2012. Efecto de los cambios en las relaciones de calcio,  
1343 magnesio y potasio intercambiables en suelos de la zona cafetera colombiana  
1344 sobre la nutrición de café (*Coffe arabica* L.) en la etapa de almácigo.
- 1345 Rowell, D. 1994. *Ciencia del suelo: métodos y aplicaciones*. Harlow, Essex: Nueva York:  
1346 Longman Scientific & Technical.
- 1347 Snakin, V. V., Prisyazhnaya, A. A., y Kovács-Láng, E. (2001). *Soil Liquid Phase*  
1348 *Composition*. El Sevier Science B. V. Amsterdam, The Netherlands. 319 pp.
- 1349 Sparks, D.L. 2003. *Environmental soil chemistry*. San Diego. Academic Press 352 p.

- 1350 Sposito, G. 1989. The chemistry of soils. New York: Oxford University Press.
- 1351 Tan, K. 1993. Principles of Soil Chemistry (Second ed.). Athens, Georgia: Marcel Dekker  
1352 Inc.
- 1353 Tinker, P.B y P.H. Nye. 2000. Solute movement in the rhizosphere. Oxford University  
1354 Press. New York.
- 1355 Van Rees, K.C.J., Comerford, N.B. yMcFee, W.W. 1990. Modeling potassium uptake by  
1356 slash pine seedlings from low-potassium-supplying soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 54:  
1357 1413-1421.
- 1358 Van der Meer, F. 1999. Can we map swelling clays with remote sensing? Int. J. Appl.  
1359 Earth Observ. Geoinfor. 1(1), 27-35.
- 1360 Zhang, X., & Zhao, A. 1997. Surface charge. En T. Yu (Ed.), Chemistry of Variable  
1361 Charge Soils. New York: Oxford University Press Inc: 17-63  
1362  
1363

1364 **ANEXO**1365 **Análisis de Suelos**  
1366

Nº Lab	Lugar	CaCE	pH	CO	Pbk	Nt	CIC	CaCIC	MgCIC	NaCIC
134	Lincoln	2,20	6,20	1,90	4,6	0,190	20,9	8,60	1,70	0,20
136	Villegas	1,60	6,30	1,20	58,3	0,120	13,6	5,90	1,00	0,20
138	Los Hornos	2,00	6,20	1,90	1,8	0,201	23,3	9,40	1,80	0,20
228	Bavio	2,00	5,70	2,90	96,9	0,323	26,4	10,60	0,60	0,20
309	Arana	2,80	6,10	2,70	6,5	0,272	22,7	10,20	1,40	0,20
310	Arana	1,00	5,90	1,50	66,5	0,154	22,3	9,00	1,40	0,20
434	Chascomús	1,20	6,10	2,30	27,8	0,217	22,3	8,60	1,80	0,30
739	Castelli	2,40	5,58	2,92	15,0	0,300	17,4	10,30	2,00	0,10
766	Belgrano	1,20	5,41	1,79	6,9	0,180	15,0	5,00	2,30	0,16
772	Belgrano	1,52	5,12	2,33	13,1	0,220	18,4	6,80	1,20	0,10
773	Belgrano	1,60	5,32	2,47	17,3	0,250	18,5	9,90	1,30	0,10
834	Saliqueló	1,10	6,47	0,80	9,0	0,812	10,0	4,20	1,20	0,10
867	Vieytes	1,40	5,90	3,10	25,0	0,331	25,7	8,30	2,10	0,40
869	Vieytes	2,00	6,20	2,70	44,5	0,295	24,7	8,10	2,40	0,50
1190	Belloccq	1,96	5,98	1,82	13,0	0,180	13,6	6,50	2,00	0,10
1214	Inchausti	1,50	6,06	1,76	11,2	0,175	13,8	6,90	1,40	0,20
1239	Belgrano	2,10	5,70	3,23	7,1	0,331	20,5	10,40	2,50	0,20
1249	9 de Julio	2,00	6,20	1,52	3,5	0,142	13,7	8,40	1,40	0,12
1251	9 de Julio	2,24	6,26	1,41	4,2	0,155	13,7	7,30	1,60	0,12
1326	Pipinas	1,20	5,92	2,77	6,4	0,259	19,0	9,00	3,50	0,85
1328	Pipinas	1,50	6,10	3,27	7,1	0,237	17,1	7,80	5,20	0,64
1367	Magdalena	1,60	6,10	3,35	4,1	0,317	23,0	12,20	2,60	0,20
1536	Roque Perez	1,00	5,66	1,92	4,9	0,191	16,4	8,00	2,00	0,10
1784	Belgrano	1,20	6,01	3,08	12,6	0,310	18,1	9,50	2,30	0,10

1367

1368

Nº Lab	Lugar	KCIC	S/CIC	CaCIC/S	CaCIC/CIC	CE	Arena	Limo	Arcilla
134	Lincoln	1,80	0,59	0,70	41,15	0,60	43,50	33,00	23,40
136	Villegas	1,30	0,62	0,70	43,38	0,30	56,80	24,80	18,40
138	Los Hornos	1,70	0,56	0,72	40,34	0,40	21,40	50,60	28,10
228	Bavio	1,20	0,48	0,84	40,15	0,31	19,50	53,10	27,50
309	Arana	1,60	0,59	0,76	44,93	0,50	19,00	54,60	26,40
310	Arana	2,80	0,91	0,44	40,36	0,30	14,30	48,00	37,70
434	Chascomús	1,80	0,56	0,69	38,57	0,40	23,60	50,20	26,20
739	Castelli	1,20	0,78	0,76	59,09	0,70	31,28	62,00	6,72

766	Belgrano	0,91	0,56	0,60	33,33	0,24	29,28	60,00	10,72
772	Belgrano	1,24	0,51	0,73	36,99	0,31	29,28	60,00	10,72
773	Belgrano	1,54	0,69	0,77	53,55	0,42	29,28	60,00	10,72
834	Saliqueló	1,70	0,72	0,58	42,00	0,35	76,10	14,60	9,30
867	Vieytes	2,70	0,53	0,61	32,30	0,50	15,70	58,70	25,60
869	Vieytes	1,90	0,52	0,63	32,79	0,50	18,00	52,90	29,10
1190	Bellocoq	1,60	0,75	0,64	47,79	0,25	41,28	52,00	6,72
1214	Inchausti	1,20	0,70	0,71	50,00	0,36	65,28	24,00	10,72
1239	Belgrano	1,40	0,71	0,72	50,73	0,46	39,28	52,00	8,72
1249	9 de Julio	1,13	0,80	0,76	61,17	0,44	57,28	36,00	6,72
1251	9 de Julio	1,29	0,75	0,71	53,16	0,43	57,28	34,00	8,72
1326	Pipinas	1,02	0,76	0,63	47,33	0,45	17,28	62,00	20,72
1328	Pipinas	1,07	0,86	0,53	45,58	0,45	21,28	62,00	16,72
1367	Magdalena	1,20	0,70	0,75	52,98	0,29	23,28	66,00	10,72
1536	Roque Perez	1,10	0,68	0,71	48,86	0,24	53,28	36,00	10,72
1784	Belgrano	1,60	0,75	0,70	52,59	0,30	41,28	54,00	4,72

1369

1370

**Predicción de Ca soluble**

1371

1372

**Análisis de regresión lineal**

1373

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
CaCE	24	0,55	0,51	0,14	21,05	25,76

1374

1375

1376

**Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

1377

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	-0,93	0,58	-2,13	0,28	-1,59	0,1266		
CE	2,17	0,62	0,89	3,46	3,51	0,0021	13,83	1,02
Ca/S	2,55	0,82	0,85	4,26	3,12	0,0052	11,32	1,02

1378

1379

1380

1381

1382

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

1383

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2,97	2	1,49	12,89	0,0002
CE	1,85	1	1,85	16,08	0,0006
Ca/S	1,12	1	1,12	9,71	0,0052
Error	2,42	21	0,12		
Total	5,39	23			

1384

1385

1386

1387

1388

1389

1390

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

1391

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2,97	2	1,49	12,89	0,0002
CE	1,42	1	1,42	12,34	0,0021
Ca/S	1,12	1	1,12	9,71	0,0052
Error	2,42	21	0,12		
Total	5,39	23			

1392

1393

1394

1395

1396

1397

1398

1399

**Curva de Adsorción**

1400

*Primer Segmento*

1401

1402

1403

*Bellocq*

1404

1405

**Análisis de regresión lineal**

1406

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
me ads/g suelo	12	0,9840	0,9804	3,9E-07	-144,3861	-142,4465

1408

1409

**Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

1410

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	0,0020	0,0004	0,0012	0,0028	5,4899	0,0004		
meqlext	0,0099	0,0010	0,0076	0,0122	9,8404	<0,0001	97,8325	14,5544
meqlext^2	-0,0022	0,0006	-0,0035	0,0009	-3,8976	0,0036	16,1909	14,5544

1414

1415

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

1416

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,0001	2	0,0001	276,5250	<0,0001
meqlext	0,0001	1	0,0001	537,8591	<0,0001
meqlext^2	3,6E-06	1	3,6E-06	15,1909	0,0036
Error	2,1E-06	9	2,4E-07		
Total	0,0001	11			

1422

1423

*Inchausti*

1424

1425

**Análisis de regresión lineal**

1426

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
me adsorbido/g suelo	12	0,9952	0,9942	1,4E-07	-156,5313	-154,5917

1428

1429

**Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

1430

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	-0,0028	0,0003	-0,0035	-0,0020	-8,5476	<0,0001		
meqlext	0,0158	0,0007	0,0141	0,0175	21,2039	<0,0001	450,6069	19,4461
meqlext^2	-0,0044	0,0004	-0,0052	-0,0035	-12,0938	<0,0001	147,2599	19,4461

1434

1435

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

1436

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,0002	2	0,0001	936,8689	<0,0001
meqlext	0,0001	1	0,0001	1727,4779	<0,0001
meqlext^2	1,3E-05	1	1,3E-05	146,2599	<0,0001
Error	7,8E-07	9	8,7E-08		
Total	0,0002	11			

1442

Belgrano

**Análisis de regresión lineal**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
me adsorbido/g suelo	12	0,9963	0,9955	1,9E-07	-157,1631	-155,2235

**Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	Cp	Mallows	VIF
const	-0,0050	0,0004	-0,0060	-0,0041	-12,3192	<0,0001			
meq/l ext	0,0177	0,0009	0,0156	0,0198	18,9829	<0,0001	361,349	26,3956	
meq/l ext <sup>2</sup>	-0,0044	0,0005	-0,0055	-0,0034	-9,7123	<0,0001	95,328	26,3956	

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,0002	2	0,0001	1227,3433	<0,0001
meq/l ext	0,0002	1	0,0002	2360,3587	<0,0001
meq/l ext <sup>2</sup>	7,8E-06	1	7,8E-06	94,3280	<0,0001
Error	7,4E-07	9	8,2E-08		
Total	0,0002	11			

Langmuir

Bellocq

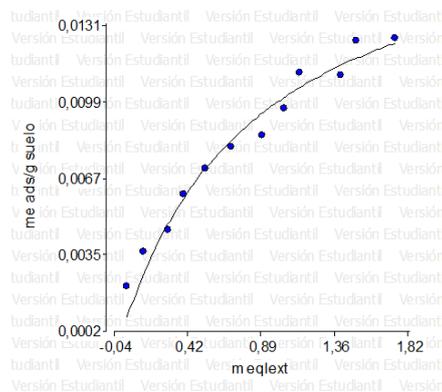
**Análisis de regresión no lineal**

Variable	N	CMError	Sigma	AIC	BIC	Interacción
me ads/g suelo	12	5,2E-07	7,2E-04	-135,88	-134,42	9

Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor
A	-1E30	1E30	1,0E-03	0,02	2,6E-03	8,23	<0,0001
B	-1E30	1E30	1,0E-03	1,15	0,25	4,64	0,0009

**Matriz de correlación de las estimaciones**

	A	B
A	1,00	0,98
B	0,98	1,00



1478  
1479

Freundlich

Bellocq

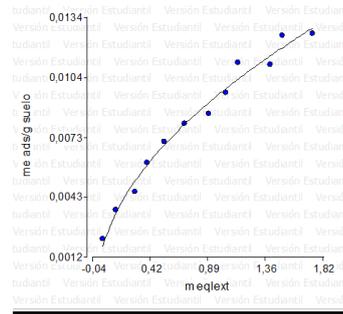
**Análisis de regresión no lineal**

Variable	N	CMError	Sigma	AIC	BIC	Interacción
me ads/g suelo	12	2,2E-07	4,7E-04	-145,93	-144,47	5

Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor
K	-1E30	1E30	1,0E-03	0,01	1,5E-04	63,47	<0,0001
N	-1E30	1E30	1,0E-03	0,53	0,03	17,96	<0,0001

**Matriz de correlación de las estimaciones**

	K	N
K	1,00	-0,11
N	-0,11	1,00



Inchausti

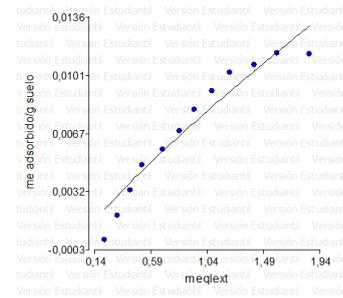
**Análisis de regresión no lineal**

Variable	N	CMError	Sigma	AIC	BIC	Interacción
me ads/g suelo	12	1,1E-06	1,0E-03	-126,93	-125,47	7

Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor
K	-1E30	1E30	1,0E-03	0,01	3,4E-04	23,02	<0,0001
N	-1E30	1E30	1,0E-03	0,84	0,09	9,02	<0,0001

**Matriz de correlación de las estimaciones**

	K	N
K	1,00	-0,47
N	-0,47	1,00



1493  
1494  
1495  
1496  
1497  
1498  
1499  
1500  
1501  
1502  
1503  
1504  
  
1505  
1506

## Segundo Segmento

## Bellocq

## Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
me ads/g suelo	7	0,9923	0,9908	4,7E-07	-82,68	-82,84

## Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	0,069	5,4E-04	0,01	0,01	12,75	0,0001		
meqlex	3,2E-03	1,3E-04	2,9E-03	3,6E-03	25,41	<0,0001	645,43	1,00

## Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1,7E-04	1	1,7E-04	645,43	<0,0001
meqlex	1,7E-04	1	1,7E-04	645,43	<0,0001
Error	1,3E-06	5	2,6E-07		
Total	1,7E-04	6			

## Inchausti

## Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
me adsorbido/g suelo	7	0,9872	0,9846	8,0E-07	-79,91	-80,07

## Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	0,0055	6,7E-04		4,4E-03	0,01	9,04	0,0003	
meqlex	3,2E-03	1,5E-04	2,6E-03	3,4E-03	19,61	<0,0001	384,38	1,00

## Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1,5E-04	1	1,5E-04	384,38	<0,0001
meqlex	1,5E-04	1	1,5E-04	384,38	<0,0001
Error	1,9E-06	5	3,8E-07		
Total	1,5E-04	6			

## Belgrano

## Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
me adsorbido/g suelo	7	0,9902	0,9882	1,4E-06	-77,39	-77,55

## Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	0,0057	8,1E-04		3,7E-03	0,01	7,09	0,0009	
meq/l ext	4,6E-03	2,0E-04	4,1E-03	0,01	22,43	<0,0001	503,13	1,00

## Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2,8E-04	1	2,8E-04	503,13	<0,0001

1559	meq/l ext	2,8E-04	1	2,8E-04	503,13	<0,0001
1560	Error	2,7E-06	5	5,5E-07		
1561	Total	2,8E-04	6			

1563 *Langmuir*

1564  
1565 *Inchausti*

1566 **Análisis de regresión no lineal**

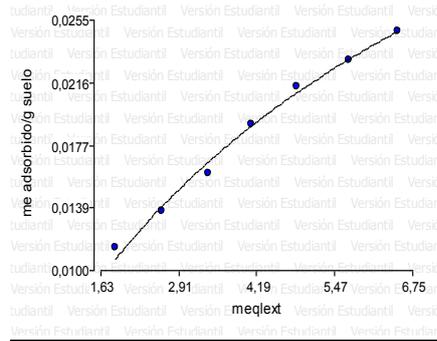
Variable	N	CMError	Sigma	AIC	BIC	Iteración
me ads/g suelo	7	2,6E-07	5,1E-04	-82,54	-82,70	4

Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor
A	-1E30	1E30	1,0E-03	0,01	3,9E-04	18,41	<0,0001
B	-1E30	1E30	1,0E-03	0,14	0,02	7,34	0,0007

1575 **Matriz de correlación de las estimaciones**

1576

	A	B
A	1,00	0,98
B	0,98	1,00



1578

1579

1580 *Belgrano*

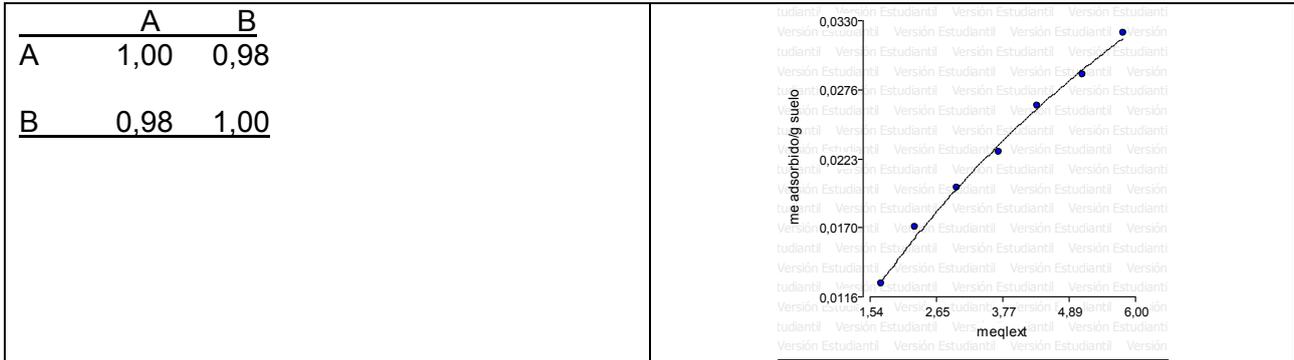
1581 **Análisis de regresión no lineal**

Variable	N	CMError	Sigma	AIC	BIC	Iteración
me adsorbido/g suelo	7	2,9E-07	5,4E-04	-81,94	-82,10	4

Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor
A	-1E30	1E30	1,0E-03	0,01	3,7E-04	23,54	<0,0001
B	-1E30	1E30	1,0E-03	0,10	0,01	7,46	0,0007

1582

1591 **Matriz de correlación de las estimaciones**  
1592



1593  
1594 *Freundlich*

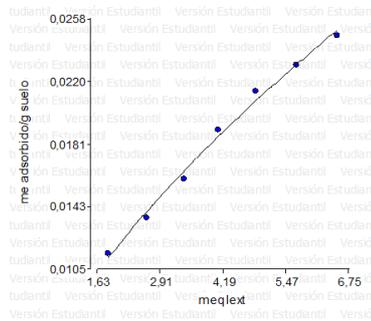
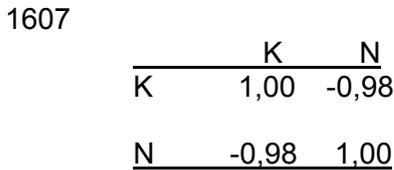
1595  
1596 *Inchausti*

1597 **Análisis de regresión no lineal**

Variable	N	CMError	Sigma	AIC	BIC	Iteración
me adsorbido/g suelo	7	2,2E-07	4,7E-04	-83,78	-83,94	4

Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor
K	-1E30	1E30	1,0E-03	0,01	3,2E-04	23,29	<0,0001
N	-1E30	1E30	1,0E-03	0,65	0,03	23,64	<0,0001

1605 **Matriz de correlación de las estimaciones**



1608  
1609 *Belgrano*

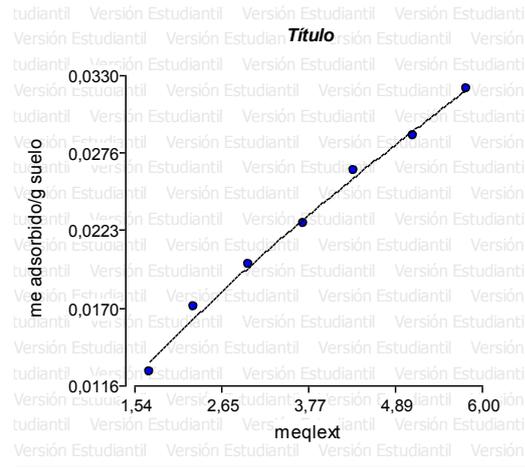
1610 **Análisis de regresión no lineal**

Variable	N	CMError	Sigma	AIC	BIC	Iteración
me adsorbido/g suelo	7	3,0E-07	5,4E-04	-81,70	-81,86	6

Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor
K	-1E30	1E30	1,0E-03	0,01	3,5E-04	25,72	<0,0001
N	-1E30	1E30	1,0E-03	0,73	0,03	27,57	<0,0001

1619 **Matriz de correlación de las estimaciones**  
1620

	K	N
K	1,00	-0,97
N	-0,97	1,00



1621

1622

1623

**Dosificación**

1624

*Primer Segmento*

1626

1627

*Bellocc*

1628

1629

**Análisis de regresión lineal**

1630

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
meql <sub>ext</sub>	12	0,9974	0,9968	1,6E-03	-44,55	-42,61

1632

1633

1634

**Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

1635

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	-0,0855	0,03	-0,16	-0,01	-2,64	0,0268		
Trat meql	0,4523	0,05	0,35	0,56	9,89	<0,0001	98,75	19,11
Trat meql <sup>2</sup>	0,0503	0,01	0,02	0,08	3,67	0,0051	14,50	19,11

1639

1640

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

1641

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3,40	2	1,70	1738,47	<0,0001
Trat meql	3,39	1	3,39	3463,43	<0,0001
Trat meql <sup>2</sup>	0,01	1	0,01	13,50	0,0051
Error	0,01	9	9,8E-04		
Total	3,41	11			

1647

1648

*Inchausti*

1649

1650

**Análisis de regresión lineal**

1651

1652

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
meql <sub>ext</sub>	12	0,9982	0,9978	1,5E-03	-50,43	-48,49

1654

1655

**Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

1656

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	0,1514	0,03	0,09	0,21	5,98	0,0002		
Trat (meql/l)	0,2928	0,04	0,21	0,37	8,18	<0,0001	67,89	19,11
Trat (meql/l) <sup>2</sup>	0,088	0,01	0,06	0,11	8,21	<0,0001	68,35	19,11

1659

1660 **Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

1661

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
1662 Modelo	3,03	2	1,52	2530,83	<0,0001
1663 Trat (meq/l)	2,99	1	2,99	4994,31	<0,0001
1664 Trat (meq/l) <sup>2</sup>	0,04	1	0,04	67,35	<0,0001
1665 Error	0,01	9	6,0E-04		
1666 Total	3,04	11			

1667

1668 *Belgrano*

1669

1670 **Análisis de regresión lineal**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
1672 meq/l ext	12	0,9997	0,9996	1,5E-04	-73,31	-71,37

1673

1674 **Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
1676 const	0,225	0,01	0,19	0,24	22,04	<0,0001		
1677 Trat (meq/l)	0,3109	0,01	0,28	0,34	22,53	<0,0001	508,59	19,11
1678 Trat (meq/l) <sup>2</sup>	0,0664	4,1E-03	0,06	0,08	16,07	<0,0001	259,22	19,11

1679

1680 **Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
1682 Modelo	2,50	2	1,25	14050,24	<0,0001
1683 Trat (meq/l)	2,48	1	2,48	27842,25	<0,0001
1684 Trat (meq/l) <sup>2</sup>	0,02	1	0,02	258,22	<0,0001
1685 Error	8,0E-04	9	8,9E-05		
1686 Total	2,50	11			

1687

1688 *Segundo Segmento*

1689

1690 *Bellocoq*1691 **Análisis de regresión lineal**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
1692 meqlext	7	0,9995	0,9994	2,7E-03	-22,13	-22,29

1693

1694 **Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
1696 const	-0,5229	0,05	-0,64	-0,40	-11,39	0,0001		
1697 Trat meql	0,7557	0,01	0,74	0,77	104,15	<0,0001	10846,55	1,00

1698

1699 **Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
1701 Modelo	15,99	1	15,99	10846,55	<0,0001
1702 Trat meql	15,99	1	15,99	10846,55	<0,0001
1703 Error	0,01	5	1,5E-03		
1704 Total	16,00	6			

1705

1706 *Inchausti*

1707

1708 **Análisis de regresión lineal**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
1709 meqlext	7	0,9993	0,9992	4,7E-03	-19,09	-19,26

1710

1711

1712

1713 **Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

1714	Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
1715	const	-0,4157	0,06	-0,61	-0,32	-8,17	0,0004		
1716	Trat (meq/l)	0,7593	0,01	0,75	0,79	85,44	<0,0001	7299,52	1,00

1717

1718 **Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

1719	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
1720	Modelo	16,60	1	16,60	7299,52	<0,0001
1721	Trat (meq/l)	16,60	1	16,60	7299,52	<0,0001
1722	Error	0,01	5	2,3E-03		
1723	Total	16,61	6			

1724

1725 *Belgrano*

1726

1727 **Análisis de regresión lineal**

1728	Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
1729	meq/l ext	7	0,9990	0,9988	0,01	-18,21	-18,37

1730

1731 **Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

1732	Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
1733	const	-0,39	0,06	-0,55	-0,23	-6,42	0,0014		
1734	Trat (meq/l)	0,685	0,01	0,66	0,71	71,36	<0,0001	5092,36	1,00

1735

1736 **Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

1737	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
1738	Modelo	13,14	1	13,14	5092,36	<0,0001
1739	Trat (meq/l)	13,14	1	13,14	5092,36	<0,0001
1740	Error	0,01	5	2,6E-03		
1741	Total	13,15	6			