

Valores críticos de fósforo para trigo, soja y maíz en Molisoles del norte de la región pampeana argentina*

Florencia A. Sucunza¹, Flavio H. Gutiérrez Boem¹, Fernando O. García², Miguel Boxler³ y Gerardo Rubio^{1, #}

- Los niveles críticos de fósforo (P) extractable en el suelo representan el valor por debajo del cual la probabilidad de respuesta a la fertilización es alta.
- En este estudio se determinaron y compararon los valores críticos de P extractable para soja, trigo y maíz en ensayos de largo plazo de la región pampeana norte.
- Los niveles críticos de P-Bray no difirieron entre soja y maíz, pero trigo mostró un valor significativamente mayor.
- La implicancia práctica de estos resultados para los Molisoles pampeanos es mantener el P-Bray del suelo a valores aproximadamente o ligeramente superiores a 19 mg kg⁻¹ para rotaciones que incluyan estos tres cultivos.

Introducción

Para alcanzar rendimientos óptimos de un cultivo, la disponibilidad de fósforo (P) en el suelo debe estar por encima del nivel crítico, definido como el valor de P extractable en el suelo por encima del cual la probabilidad de respuesta al fertilizante es baja. Si el valor del análisis de P en el suelo está por debajo del nivel crítico, se supone que el P es limitante para el rendimiento del cultivo y se esperan respuestas positivas a la fertilización. Los valores críticos de P varían según el método de análisis de suelo, la profundidad de muestreo, el cultivo, y el modelo estadístico empleado (Gutiérrez Boem et al., 2011; Jordan Meille et al., 2012). En la región pampeana argentina, el P-Bray-1 es el método mayormente utilizado (Rubio et al., 2008; Sainz Rozas et al., 2012).

Los niveles críticos de P generalmente se obtienen de experimentos a campo que relacionan los análisis de P del suelo con los rendimientos relativos (RR), definidos como el rendimiento del cultivo en el tratamiento control como porcentaje del rendimiento del cultivo en el tratamiento fertilizado. En los sistemas de rotación de cultivos, es particularmente relevante conocer el nivel crítico de P de los diferentes cultivos para identificar el nivel de P conveniente que se utilizará como objetivo para toda la rotación (por lo general, el más alto). En general se acepta que los niveles críticos varían entre los cultivos. Esta suposición proviene principalmente de conjuntos de datos que involucran diferentes áreas y suelos. Sin embargo, el hecho de que los niveles críticos se vean afectados por las propiedades del suelo y otros factores ambientales y de manejo (Bray, 1954; Bell et al., 2013) sugiere que las comparaciones entre cultivos pueden ser evaluadas mejor a través de ensayos realizados en

los mismos sitios experimentales y bajo las mismas condiciones de manejo. Sin embargo, hasta el momento se han publicado solo unos pocos estudios que cumplen estas condiciones (ejemplo, Dodd y Mallarino, 2005; Poulton et al., 2013).

Se ha informado que la soja es menos sensible a la fertilización con P que el maíz y el trigo (Colomb et al., 2007; Mallarino et al., 2013). Estos tres cultivos son los principales cultivos de grano de la región pampeana (Domínguez y Rubio, 2019). En los últimos años, los sistemas agrícolas han experimentado profundos cambios entre los que se destacan la consolidación de la soja como cultivo predominante, y la adopción generalizada de la siembra directa (Wingeyer et al., 2015; Andrade et al., 2017). Dados estos cambios, existe la necesidad de verificar o ajustar los niveles de P críticos del suelo actualmente aceptados (Echeverría et al., 2014; García y Reussi Calvo, 2014; Gutiérrez Boem y Salvaggiotti, 2014). Una larga historia de exportaciones de P sin reposición causó una disminución generalizada de P en la mayoría de los suelos agrícolas en Argentina (Sainz Rozas et al., 2012). El país no posee reservas de P significativas y debe importar casi todos los fertilizantes fosfatados. Por lo tanto, la deficiencia de P es una amenaza importante para la productividad agrícola y es necesario optimizar la eficiencia en el uso de P por los cultivos.

El objetivo de este estudio fue determinar y comparar, en condiciones similares de campo, los valores críticos de P para soja, trigo y maíz. Para este fin, realizamos un estudio de 2000-01 a 2013-14 en cinco sitios experimentales ubicados en la región pampeana norte que incluían rotaciones de soja/maíz/trigo.

* Versión adaptada de: Sucunza, F. A., F.H. Gutiérrez Boem, F.O. García, M. Boxler & G. Rubio. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *European Journal of Agronomy*, 96:87-95

¹ INBA (CONICET UBA) y Cátedra de Fertilidad de Suelos y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Buenos Aires. Av. San Martín 4453C1417DSE Buenos Aires, Argentina

² IPNI Latino América Cono Sur

³ Consultor privado

Autor de contacto. Correo electrónico: rubio@agro.uba.ar

Tabla 1. Información de los sitios experimentales, series de suelo, rotación y propiedades del suelo (0-20 cm) al comienzo del periodo experimental (septiembre 2000).

Sitio experimental	Balducchi	San Alfredo	La Hansa	Lambaré	La Blanca
Tipo de suelo	Hapludol típico	Argiudol típico	Argiudol típico	Argiudol típico	Hapludol típico
Serie de suelo	Santa Isabel	Hughes	Bustanza	Los Cardos	La Bélgica
P-Bray (mg kg ⁻¹)	10.8	11.6	17.7	67.7	16.2
C orgánico (g kg ⁻¹)	13.5	19.8	12.2	18.7	13.3
pH	5.9	6.0	5.5	5.6	6.6
Textura	franco limosa	franco limosa	franco limosa	franco limosa	franco limosa
Arcilla (%)	11.8	18.0	18.0	20.5	15.5
Limo (%)	53.1	62.0	78.9	76.5	56.4
Arena (%)	35.1	20.0	3.1	3.0	28.1
Rotación	Maíz-Trigo/Soja		Maíz-Soja-Trigo/Soja II		

Materiales y métodos

Este trabajo se realizó en la Red de Nutrición de la Región CREA (Consortio Regional de Experimentación Agrícola) Sur de Santa Fe. Esta es una red de ensayos a largo plazo en lotes de productores cuyos detalles figuran en Ciampitti et al. (2011) y se presentan en la **Tabla 1**. En el presente estudio, evaluamos el periodo entre las campañas agrícolas 2000-01 y 2013-14 (**Figura 1**).

En este trabajo se compararon dos tratamientos de los seis incluidos en los sitios de ensayo desde 2000: a) -P: sin fertilización P y b) +P: con fertilización anual de P. La dosis de P se decide cada año, de acuerdo con el rendimiento esperado, a través de la estimación de la remoción de P por los cultivos más un 5-10%. Las extracciones esperadas de P se estiman multiplicando el rendimiento esperado del cultivo por la concentración de P del grano. En promedio, la dosis anual de P fue de 37 kg P ha⁻¹. La fuente de P fue fosfato monoamónico (11-22-0) aplicado en bandas incorporadas al momento de la siembra. Ambos tratamientos recibieron fertilización

con nitrógeno (N) y azufre (S) adicional. Otros nutrientes generalmente no limitan los rendimientos en estos suelos. Todos los tratamientos se manejan bajo sistema de siembra directa desde la implantación de los ensayos.

Se tomaron muestras de suelo (0-20 cm) cada año antes de sembrar trigo, maíz o soja de primera. Se tomaron muestras compuestas de 20 piques (2 cm de diámetro) en cada parcela. El P fue extraído según Bray-1, y el P en el extracto se determinó colorimétricamente.

El rendimiento relativo (RR) se calculó como el cociente entre los rendimientos (promedio de las tres repeticiones) de los cultivos obtenidos en los tratamientos -P y +P. Los rendimientos de los cultivos se registraron anualmente para toda la secuencia de años y se relacionaron con los valores de P-Bray medido el mismo año en el tratamiento -P. Para la selección de los mejores modelos de ajuste, se compararon diferentes funciones (lineal, exponencial, logarítmica, cuadrática) utilizando el coeficiente de determinación como criterio de discriminación. Para los tres cultivos, finalmente se seleccionó el modelo de Mitscherlich con el máximo RR fijado como 100%. Una observación del conjunto de datos del cultivo de trigo se identificó como un valor atípico (outlier) y no se consideró en el análisis.

El nivel de P-Bray correspondiente al 90% RR se consideró el nivel crítico de P para cada cultivo. Las funciones ajustadas a cada cultivo se compararon mediante un test de F (Mead et al. 1993).

Resultados y discusión

Rendimiento de los cultivos

Los rendimientos de los cultivos no fertilizados oscilaron entre 7.3-15.9, 3.1-6, 1.7-5.2 y 1.5-5.1 t ha⁻¹ para maíz, soja de primera, soja de segunda y trigo, respectivamente. Los rendimientos de los cultivos fertilizados oscilaron entre 8.5-16, 3.8-6, 1.7-5.3 y 1.7-5.8 t ha⁻¹ para los cuatro cultivos, respectivamente. El trigo fue el que más respondió a P, mientras que las respuestas a P de

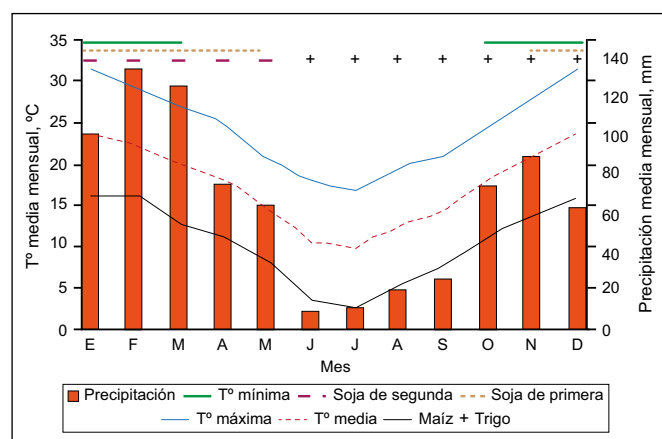


Figura 1. Precipitaciones mensuales (barras) y promedio mensual de temperaturas máxima y mínima (líneas) durante el periodo estudiado. Los periodos de crecimiento de los cultivos, son indicados con intervalos horizontales.

maíz y soja fueron relativamente semejantes. Como se esperaba, el sitio con el P-Bray inicial más bajo (Balducchi) tuvo las respuestas más altas a P, mientras que el sitio con el valor inicial más alto (Lambaré) tuvo las más bajas. La respuesta media anual para el maíz fue de 1.6 t ha⁻¹ en La Hansa, no hubo respuesta en Lambaré, 1.2 t ha⁻¹ en La Blanca, 1.0 t ha⁻¹ en San Alfredo y 2.0 t ha⁻¹ en Balducchi. Para el trigo, las respuestas fueron 0.3, 0.2, 0.7, 1.3 y 1.4 t ha⁻¹, respectivamente. Para la soja de segunda 0.16, 0.05, 0.2, 0.5 y 0.6 t ha⁻¹, respectivamente. Finalmente, la soja de primera tuvo respuestas de 0.3 t ha⁻¹ en La Hansa, de 0.015 t ha⁻¹ para Lambaré y de 0.6 t ha⁻¹ en La Blanca.

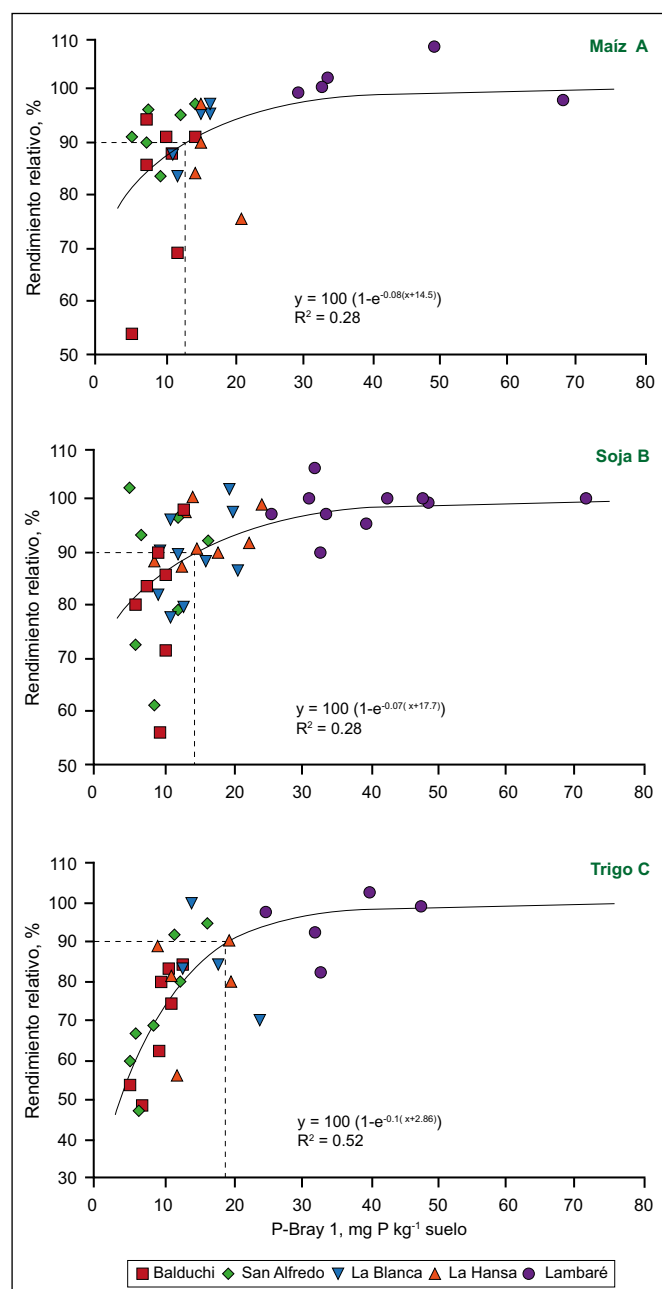


Figura 2. Relación entre P-Bray (0-20 cm) y rendimiento relativo de maíz, soja y trigo para los 5 sitios del norte de la región pampeana, a través de los 14 años del periodo experimental. El número de observaciones fue 27, 43 y 29 para maíz, soja y trigo, respectivamente. Los rendimientos relativos fueron calculados como el rendimiento del tratamiento control expresado como porcentaje del rendimiento del tratamiento fertilizado.

Niveles críticos de P

Este experimento de fertilización fosforada sobre suelos Molisoles pampeanos permitió la identificación y comparación de los valores críticos de P para los cultivos de soja, maíz y trigo bajo condiciones de crecimiento similares, incluyendo los mismos sitios experimentales y prácticas de manejo (**Figura 2**). En todos los casos, el mejor ajuste entre RR y el P-Bray se obtuvo con funciones de tipo Mitscherlich, que mostraron disminuciones curvilíneas de rendimiento relativo con valores de P-Bray decrecientes. Utilizando este modelo, el trigo mostró un R² más alto (0.52) que la soja y el maíz (0.28 en ambos casos), lo que significa que la nutrición fosforada fue menos relevante al explicar las variaciones en los rendimientos en estos dos últimos cultivos.

Aunque la soja de primera produjo, en promedio, un 20% más que la soja de segunda, el nivel crítico de P no difirió entre ellas, alcanzando un valor común de 14.3 mg kg⁻¹ de P-Bray para un RR del 90%. Esto es coherente con la suposición general de que, para los nutrientes poco móviles como el P, los niveles críticos de cualquier cultivo específico no dependen del rendimiento del cultivo (Bray, 1954, Bell et al., 2013). El modelo ajustado para el maíz identificó un nivel crítico de 12.5 mg P-Bray kg⁻¹ (90% RR) y no difirió del modelo ajustado para el cultivo de soja. Al ajustar una función común para soja y maíz, el nivel crítico es de 13.6 mg P-Bray kg⁻¹. La función obtenida para el cultivo de trigo indicó un valor crítico de 19 mg kg⁻¹ de P-Bray para un RR del 90%, que fue significativamente diferente del de la soja y el maíz.

La comparación entre los valores críticos de P para los diferentes cultivos informados en la literatura es compleja debido a los diferentes enfoques estadísticos, extractantes y métodos de muestreo del suelo utilizados, entre otros factores. Las correlaciones y factores de conversión entre diferentes extractantes y profundidades de muestreo están disponibles para suelos locales y otros (Gutiérrez Boem et al., 2011; Jordan Meille et al., 2012). Sin embargo, no se recomiendan para conversiones generalizadas entre diferentes métodos de análisis de suelo debido a las intrincadas interacciones entre suelos y extractantes químicos (Jordan Meille et al., 2012). Desde un punto de vista práctico, las diferencias relativas entre los niveles críticos de P serían un enfoque apropiado para comparar cultivos, incluso cuando se usan diferentes extractantes de P en el suelo o profundidades de muestreo. Colomb et al. (2007) encontraron un orden decreciente de umbrales críticos siguiendo el ranking trigo > soja > maíz (usando funciones tipo Mitscherlich y P-Olsen como análisis de suelo). Tang et al. (2009) también observaron que el maíz tenía un nivel crítico de P-Olsen menor que el trigo (-6%) y Dodd y Mallarino (2005) observaron que el nivel crítico para la soja era menor que el maíz, utilizando P-Bray como análisis de suelo. Nuestro ranking fue trigo > maíz = soja, siendo el nivel crítico de la función combinada para soja y maíz un 28% menor que el del trigo. Esta clasificación coincide aproximadamente con la interpretación actual

del análisis de suelo en el medio oeste de los EE.UU., donde el valor crítico para soja y maíz es un 24% menor que para trigo (Mallarino et al., 2013).

Valores de P-Bray luego de 14 años de tratamientos de fertilización

En los tratamientos -P y al final de los 14 años evaluados, Balducchi, La Blanca y San Alfredo estuvieron por debajo del nivel crítico P para los tres cultivos: 5.6, 9.2 y 6.4 mg P kg⁻¹, respectivamente. La Hansa alcanzó valores de P-Bray de 14 mg P kg⁻¹, cerca del nivel crítico de P encontrado para la soja y el maíz, pero por debajo del trigo. Lambaré se mantuvo en valores de P-Bray superiores a los niveles críticos de P para los tres cultivos (24.7 mg P kg⁻¹). En los tratamientos +P, al final de los 14 años evaluados, los cinco sitios alcanzaron valores de P-Bray superiores a los niveles críticos. Estos resultados indican que, después de 14 años de estudio, todos los tratamientos fertilizados superaron el valor crítico del cultivo con mayores requerimientos (**Figura 2**). En los sistemas con rotación de cultivos, una estrategia de manejo adecuada es mantener el P-Bray en niveles equivalentes a los niveles críticos de P más altos de los cultivos incluidos en la rotación. En consecuencia, la implicancia de nuestros resultados para los productores es mantener el suelo en aproximadamente o ligeramente por encima de 19 mg kg⁻¹ de P-Bray, que es el nivel crítico de P del cultivo con mayor valor crítico. Este nivel objetivo, beneficia al productor porque los rendimientos no se ven limitados por la falta de P disponible y el fertilizante no es aplicado en exceso. No exceder este valor también beneficia al medio ambiente al reducir el riesgo de pérdidas perjudiciales de P (Sharpley et al., 2013).

Conclusiones

Nuestro estudio, en base a experimentos de campo a largo plazo, indicó que los niveles críticos de P-Bray no diferían entre soja y maíz, pero trigo mostró un valor significativamente mayor (13.6 mg kg⁻¹ y 19 mg kg⁻¹, respectivamente). La implicancia práctica de estos resultados para los Molisoles pampeanos es mantener el P-Bray del suelo a valores aproximadamente o ligeramente superiores a 19 mg kg⁻¹ para rotaciones que incluyen estos tres cultivos.

Agradecimientos

El CONICET, la Universidad de Buenos Aires y ANPCYT proporcionaron apoyo financiero. Agradecemos a los miembros de CREA Sur de Santa Fe por facilitarnos los ensayos para realizar este estudio. La Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe es un emprendimiento conjunto de CREA Sur de Santa Fe, IPNI y Nutrien Ag Solutions.

Bibliografía

Andrade, J.F., S.L. Poggio, M. Ermácora, y E.H. Satorre. 2017. Land use intensification in the Rolling Pampa, Argentina: Diversifying crop sequences to increase yields and resource use. *Europ. J. Agron.* 82, 1-10.

- Bell, R., D. Reuter, B. Scott, L. Sparrow, W. Strong, y W. Chen. 2013. Soil phosphorus-crop response calibration relationships and criteria for winter cereal crops grown in Australia. *Crop and Pasture Sci.* 64, 480-498.
- Bray, R.H. 1954. A nutrient mobility concept of soil plant relationships. *Soil Sci.* 78, 9-22.
- Ciampitti, I.A., F.O. García, L.I. Picone, y G. Rubio. 2011. Phosphorus budget and soil extractable dynamics in field crop rotations in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 131-142.
- Colomb, B., P. Debaeke, C. Jouany, J.M. Nolot. 2007. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France. *Eur. J. Agron.* 26, 154-165.
- Dodd, J.R., y A.P. Mallarino. 2005. Soil-Test Phosphorus and Crop Grain Yield Responses to Long-Term Phosphorus Fertilization for Corn-Soybean Rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 1118-1128.
- Dominguez, J., y G. Rubio. 2019. Agriculture. In: Rubio G, Lavado RS, Pereyra (eds). *The Soils of Argentina*. World Soils Book Series. Springer Int. Publ. (en prensa).
- Echeverría, H.E., H.R. Sainz Rozas, y P.A. Barbieri. 2014. Maíz y sorgo. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.) *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Ediciones INTA, pp. 435-478.
- García, F.O., y N.I. Reussi Calvo. 2014. Trigo. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.) *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Ediciones INTA, pp. 401-434.
- Gutiérrez Boem, F.H. y F. Salvagiotti. 2014. Soja. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.) *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Ediciones INTA, pp. 479-508.
- Gutiérrez Boem, F.H., Rubio, G., Barbero, D., 2011. Soil Phosphorus Extracted by Bray 1 and Mehlich 3 Soil Tests as Affected by the Soil/Solution Ratio in Mollisols. *Soil Sci. Plant Anal.* 42, 220-230.
- Jordan Meille, L., G.H. Rubæk, P.A. Ehler, V. Genot, G. Hofman, K. Goulding, J. Recknagel, G. Provolo, y P. Barraclough. 2012. An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. *Soil Use Manage.* 28, 419-435.
- Mallarino, A.P., J.E. Sawyer, y S.K. Barnhart, S.K. 2013. *A General Guide for Crop Nutrient and Limestone Recommendations* Iowa. Extension and Outreach Publications. Book 82.
- Mead, R., R.N. Curnow, y A.M. Hasted. 1993. *Statistical methods in agriculture and experimental biology*. Chapman and Hall, London.
- Poulton, P.R., A.E. Johnston, y R.P. White. 2013. Plant-available soil phosphorus. Part I: the response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam. *Soil Use Manage.* 29, 4-11.
- Rubio, G., F.H. Gutiérrez Boem, y M.J. Cabello. 2008. Estimating Available Soil Phosphorus Increases after Phosphorus Additions in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 1721-1727.
- Sainz Rozas, H.R., H.E. Echeverría, y H. Angelini. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región pampeana y extra pampeana argentina. *RIA.* 38, 33-39.
- Sharpley, A., H.P. Jarvie, A. Buda, L. May, B. Spears, y P. Kleinman. 2013. Phosphorus legacy: overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment. *J. Environ. Qual.* 42, 1308-1326.
- Tang, X., Y. Ma, X. Hao, X. Li, J. Li, S. Huang, y X. Yang. 2009. Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China. *Plant Soil.* 323, 143-151.
- Wingeyer, A.B., T.J.C. Amado, M. Pérez Bidegain, G.A. Studdert, C.H. Perdomo Varela, F.O. García, y D.L. Karlen. 2015. Soil Quality Impacts of Current South American Agricultural Practices. *Sustainability.* 7, 2213-2242. ♦