

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMIA Y VETERINARIA**



“Trabajo final presentado para optar al Grado de
Ingeniero Agrónomo”

**AJUSTE DE CURVA DE RENDIMIENTO EN SOJA (Glycine
max L.) CON DOSIS VARIABLE DE FOSFORO**

Alumno: Roma, Javier Andrés

D.N.I: 30313672

Directora: Cisneros, José Manuel

Co-director: Silva Rossi, Martin M.

Río Cuarto – Córdoba

Mayo 2012

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Título del Trabajo Final: *Ajuste de curva de rendimiento en soja (Glycine max (L.) Merr.) con dosis variable de fósforo.*

Autor: **Roma, Javier Andrés**

DNI: 30313672

Director: **Cisneros, José Manuel**

Co-director: **Silva Rossi, Martín M.**

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del Jurado Evaluador:

Fecha de Presentación: _____ / _____ / _____

Aprobado por Secretaría Académica: _____ / _____ / _____

Secretario Académico

DEDICATORIA

Quiero dedicar el presente trabajo a mis padres Edgardo y Maria Clara, por su constante ayuda en mi vida y mis estudios, por apostar a mi progreso como persona y como profesional, por darme la oportunidad de estudiar, de crecer y de progresar.

También a mis hermanos, Sebastián, Esteban, Leandro, Guadalupe y Edgardo, por darme el apoyo como familia y todo su afecto día a día.

AGRADECIMIENTOS

A mis abuelos Juan y Beba, Delfor y Elsa, que son un ejemplo para mi vida y mi profesión.

A Pamela, mi compañera inseparable.

A mis inseparables amigos Edgardo, Damian y Marcos, quienes son parte de mi vida y están en todo momento.

A mi director José Cisneros y co-director Martín Silva Rossi, por brindarme parte de su tiempo y su capacidad profesional y humana para la realización y corrección de mi trabajo.

A mi primo de corazón Alberto Malmantile, por su calidad humana.

A mi querida Facultad de Agronomía y Veterinaria de Río Cuarto, por darme la posibilidad de ser un profesional, por instruirme como persona y por permitirme aprender gracias a la calidad de profesores que la componen.

A la firma “La Alegría”, por su colaboración en el siguiente trabajo.

Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Venado Tuerto, quien me abrió las puertas ante mis constantes consultas y me permitió conocer más a fondo la zona donde se llevo a cabo el siguiente trabajo.

ÍNDICE DE TEXTO

I. RESUMEN.....	1
II. SUMMARY.....	2
III. INTRODUCCION.....	3
1. Manejo de la fertilización en una agricultura sustentable.....	5
2. Importancia y funciones del fósforo (P) en la planta.....	6
3. Fertilización fosfatada.....	8
4. Hipótesis.....	10
5. Objetivos.....	10
IV. MATERIALES Y METODOS.....	11
1. Área de estudio.....	11
2. Suelo.....	11
i. Descripción del perfil típico.....	12
3. Diseño experimental.....	13
4. Evaluaciones y determinaciones.....	14
i. En Planta.....	14
ii. Determinaciones en el suelo.....	14
5. Análisis estadístico.....	15
V. RESULTADOS.....	16
1. Caracterización climática.....	16
2. Caracterización de la disponibilidad de P del suelo.....	17
3. Determinaciones en planta.....	18
i. Densidad.....	18
4. Rendimiento del cultivo.....	19
5. Componentes de rendimiento.....	21
i. Peso de mil semillas y granos por metro cuadrado.....	21
6. Discusión de los resultados.....	22
VI. CONCLUSIONES.....	23
VII. BIBLIOGRAFIA.....	24
VIII. ANEXO.....	27

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1: Evolución de la superficie cultivada, y consumo de fertilizantes en el país los últimos 50 años. Promedio de decenios y quinquenios.....	5
CUADRO 2: Requerimientos nutricionales e índice de cosecha de nutrientes en soja.....	8
CUADRO 3: Propiedades físicas y químicas del perfil típico. Serie Santa Ana.....	13
CUADRO 4: Modelos de regresión y análisis estadístico.....	18
CUADRO 5: Promedio histórico de precipitaciones y lluvias campaña 2006-2007.....	27

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: Evolución de la producción de maíz, trigo, soja y girasol en la Argentina. Período 1987-2007. Fuente SAGPyA.....	5
FIGURA 2: Temperaturas máximas, mínimas y medias históricas.....	16
FIGURA 3: Precipitaciones medias y registradas en la campaña 2006-2007.....	16
FIGURA 4: Variación de la disponibilidad de fósforo en la línea de siembra en función de la dosis y estadio fenológico.....	17
FIGURA 5: Variación de la densidad en función de la dosis de fósforo.....	19
FIGURA 6: Densidad de plantas emergidas en función de la dosis de fosforo aplicada.....	19
FIGURA 7: Rendimiento de la soja en función de la dosis de fósforo aplicada.....	20
FIGURA 8: Rendimiento del cultivo en función de la disponibilidad de fósforo en R1.....	21
FIGURA 9: Peso de mil semillas y número de granos por metro cuadrado en función de la dosis de fósforo aplicada.....	22

I. RESUMEN

El fósforo (P) es uno de los macronutrientes más importantes para la producción de soja en la República Argentina, cultivo que ha incrementado exponencialmente su participación en la economía nacional. El P es un nutriente de una dinámica compleja por su interacción con la fase sólida del suelo, su relación con el pH y sus posibilidades de fijación a los coloides del suelo. El P es uno de los nutrientes limitantes de la producción de soja, a su vez es un nutriente que por los sucesivos años de agricultura continua y escasa reposición ha disminuido sus niveles en el suelo. La caracterización del nivel crítico de P en un suelo es un proceso complejo que requiere estudios de largo plazo, en diferentes condiciones ambientales. El objetivo del siguiente trabajo fue determinar la respuesta del cultivo de soja a diferentes dosis de fertilizante fosforado en un suelo representativo del sur de Santa Fe. El ensayo se realizó sobre un Hapludol franco en proximidades de Maggiolo. Se utilizó un diseño de bloques al azar con tres repeticiones por tratamiento, los cuales fueron con 9, 18, 31 y 44 Kg.de P/ha, equivalentes a 40, 80, 140 y 200 Kg. de fosfato monoamónico/ha (MAP/ha) y un tratamiento testigo sin fertilización. Durante el ciclo del cultivo se evaluó el P disponible en el suelo (Bray I) en R1 y R8, la densidad en la emergencia de plántulas, rendimiento para cada tratamiento y peso de mil granos. Los resultados obtenidos demuestran que en este año en particular no se observaron efectos fitotóxicos por las altas dosis de fertilizante, y los rendimientos no demostraron respuestas significativas al agregado de P. Se concluye que, para las condiciones estudiadas, el nivel crítico de P estaría alrededor de 12 ppm.

Palabras Claves: Soja – fósforo – fertilización – Hapludol– agricultura continua.

II. SUMMARY

Phosphorus (P) is one of the most important macronutrients for soybean production in the Argentine Republic. Soybean has increased exponentially its participation in the national economy in the last years. Phosphorus is a nutrient with a complex dynamics because their interaction with the soil solid phase, its relationship to soil pH and their possibility of soil colloids retention. Phosphorus is one of the nutrients limiting soybean production in systems production with successive years of continuous cropping, and low nutrient replacement has reduced its levels in the soil. The characterization of critical level of P in soil is a complex process that requires long-term studies in different environmental conditions. The aim of this study was to determine soybean response to different doses of P fertilizer in a soils representative of southern Santa Fe province. The trial was performed on a loam Hapludol soil, located near Maggiolo city. A randomized block design with three replicates per treatment was performed. The P dosis were with 9, 18, 31 and 44 kg P/ha, equivalent to 40, 80, 140 and 200 kg of monoammonium phosphate/ha (MAP/ha) and a control treatment without fertilization. During the crop cycle was evaluated: soil P test (Bray 1) in R1 and R8 phenologic states; percent of plant emergency; crop production, and weight of 1000 kernels. The results show that in this particular year there were no phytotoxic effects of high fertilizer dosis and yields no showed significant response to added P. We conclude that, for the conditions studied, the critical level of P would be about 12 ppm.

Keywords: Soybean - phosphorus - fertilizer - continuous agriculture - Hapludol.

III. INTRODUCCIÓN

La producción de soja ha crecido en nuestro país en forma ininterrumpida desde que comenzó su difusión comercial a fines de la década del '60. En el año 1970, la soja era aún un cultivo incipiente, con apenas 36.000 ha cosechadas y una producción de 59.000 Tn. A partir de ese año, comienza su expansión y llega en el año 2006 a producir más de 47 millones de toneladas. Este incremento en la producción se debió fundamentalmente a un aumento en la superficie destinada al cultivo que alcanza valores próximos a los 16 millones de ha, mientras que los aumentos en los rendimientos se mantuvieron entre 28 y 29 qq/ha promedio, para las campañas 2006 y 2007, respectivamente (SAGPyA, 2009).

La provincia de Santa Fe representa un treinta por ciento de la producción sojera total de la Argentina, superando para la cosecha 2003-2004 las 30.000.000 Tn, con rindes promedios de 30-35 qq/ha en sojas de primera y 25-30 qq en sojas de segunda (SAGPyA, 2006 a).

Se estima que en la campaña 2004 se sembraron unas 13.000.000 de hectáreas en la Argentina (SAGPyA, 2006 b) y solamente en el Departamento General López (provincia de Santa Fe), 1.022.797 hectáreas (Portal Santa Fe, 2006).

Los suelos agrícolas de la provincia de Santa Fe, presentaban en su origen una fertilidad química que se fue deteriorando con la intensificación del uso agrícola continuo, con genotipos de elevada productividad, y a la falta de una adecuada reposición de nutrientes.

Frente a la expansión del área sembrada en la región con cultivos estivales, y frente a los cambios tecnológicos y a los mayores niveles de rendimientos de los cultivos, resulta de utilidad actualizar la información experimental sobre la respuesta a P en los mismos.

Las respuestas en girasol y en soja con bajos contenidos de P son similares a las encontradas en trabajos anteriores realizados en la región del sudeste bonaerense (Valetti et al., 1995; Fariña y Darwich, 1993).

En girasol y soja, se han obtenido respuestas máximas variables entre 400 y 800 kg/ha, con contenidos de P inferiores a 9-10 ppm (Valetti et al., 1995; Fariña y Darwich, 1993, Melgar et al., 1995).

En Argentina, y principalmente dentro de la Región Pampeana, la producción agrícola se ha realizado durante casi un siglo aprovechando la fertilidad natural de sus tierras. En efecto, los suelos predominantes (Molisoles) son de una alta fertilidad, tanto por sus propiedades químicas y biológicas, como por sus características físicas, lo que favorece el establecimiento y el crecimiento de los cultivos.

Esta fertilidad es debida a un alto contenido original de materia orgánica, un pH levemente ácido, una textura superficial franca o franca arenosa y a un material madre (loess) rico tanto en bases (calcio, magnesio y sobre todo en potasio) como en otros nutrientes.

En los últimos 30 años, con la intensificación de la agricultura se ha producido un empobrecimiento progresivo de la fertilidad de los suelos, provocado principalmente por la pérdida de materia orgánica. Esto puede atribuirse a los sistemas de labranzas utilizados, a la creciente expansión de las oleaginosas (principalmente la soja), y a la falta de una adecuada reposición de los nutrientes extraídos del sistema.

Actualmente, la planificación de las actividades agropecuarias requiere un análisis del sistema de producción en su conjunto incluyendo al suelo como un componente del mismo en lugar de analizar cada cultivo o actividad productiva en forma aislada. Este enfoque tiene numerosas ventajas y beneficios, principalmente en cuanto al manejo de la fertilización. Este último aspecto debería tenerse en cuenta inclusive en los contratos de arrendamiento, para obtener un beneficio mayor de ambas partes y además lograr una mejor conservación de los recursos naturales.

Al analizar la evolución de la producción de granos y del consumo de fertilizantes en los últimos 50 años (Cuadro 1), se observa que, con un incremento de sólo 20 a 30% de la superficie agrícola, se ha triplicado la producción de granos. Esto implica que, con la tecnología incorporada a la agricultura se ha triplicado también la extracción anual de nutrientes. Si bien en los últimos 15 años el incremento del uso de fertilizantes ha sido considerable (400 a 500%) y el incremento en la producción de granos (120-130%), el balance de nutrientes (cantidad exportada por los granos o forraje menos la aportada por la fertilización) sigue siendo negativo. Así, aún hoy con un consumo anual de dos millones de toneladas de fertilizantes (700.000 a 800.000 toneladas de nutrientes) se está aplicando solo el 50% del P que se consume por los cultivos, un 25-30% de N y menos del 10% de S, siendo mínima o nula la utilización de otros nutrientes.

Cuadro 1. Evolución de la superficie cultivada, y consumo de fertilizantes en el país en los últimos 50 años.(Promedios de decenios y quinquenios.)

Periodo	Superficie cultivada (Millones de ha)	Producción de granos (Millones de ton)	Consumo de fertilizante (Millones de ton)	Consumo promedio (kg/ha cultivada)
1955-65	18	20	50	3
1966-75	19	25	150	8
1976-85	20	35	250	12
1986-90	19	30	300	16
1991-95	20	40	800	40
1996-00	22	55	1600	73
2001-03	24	70	1800	75

III.1. Manejo de la fertilización en una agricultura sustentable

Las redes de ensayos de fertilización de soja de primera (siembra de Octubre - noviembre) del Proyecto INTA Fertilizar han permitido confirmar niveles críticos de P extractable con Bray & Kurtz 1, entre 12-14 ppm por debajo de los cuales se encuentran respuestas rentables a la fertilización fosfatada (Echeverría et al., 2002).

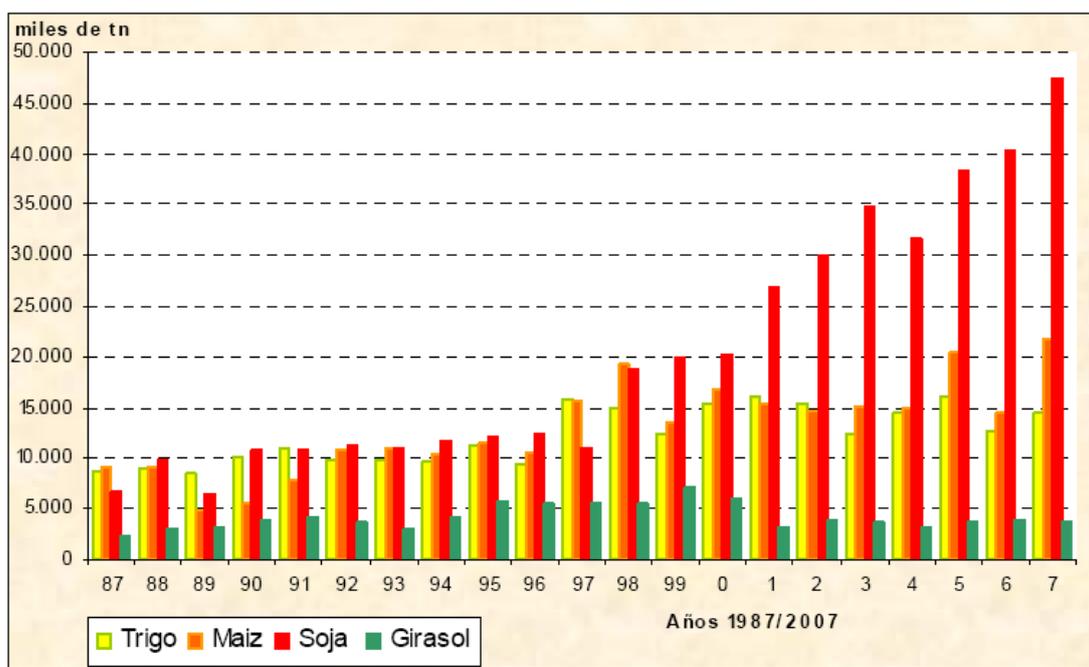


Figura 1. Evolución de la Producción de maíz, trigo, soja y girasol en la Argentina. Período 1987-2007. SAGPyA.

El fósforo, junto con el N (nitrógeno), es uno de los nutrientes que afecta en mayor medida la producción de los cultivos agrícolas en la región pampeana Argentina. La intensificación agrícola y la gran difusión de la soja y del doble cultivo (trigo-soja), acompañado de mayores rendimientos y por ende elevados niveles de extracción de nutrientes han provocado disminuciones en la disponibilidad de fósforo (Montoya et al. 1999; Vázquez, 2002). Esto ha sido evaluado por (Lavado, 1992), quien estimó que para una producción de granos durante el último siglo de 2 mil millones de toneladas, puede calcularse una extracción de fósforo de 250 a 300 kg ha⁻¹ para los 20 millones de hectáreas sembradas anualmente, ésta representa una pérdida importante para los contenidos de fósforo nativo en los suelos de la llanura pampeana, los que varía de 400-600 ppm a 800-1200 ppm.

A fin de contrarrestar esta situación, se promueven prácticas de fertilización, tendientes a la reposición del nutriente (Berardo, 2003; García, 2003).

El sector productivo debe tener en cuenta estos efectos al momento de tomar decisiones. Como país tenemos la responsabilidad de preservar y mejorar la sustentabilidad y la calidad de nuestros suelos. Una de las causas más fuertes por las cuales no se fertiliza ni se produce sustentablemente el cultivo de soja es por el alto porcentaje de campos arrendados y los altos valores en el precio de las rentas (INTA, 2003a).

Otros causantes por los cuales los balances siguen siendo negativos son los altos costos de la producción en campos arrendados, debido a la variación del precio de los granos y fertilizantes (INTA, 2003b). A su vez los contratos de arrendamiento son anuales. Estos motivos causan que el productor disminuya la inversión de la producción en aquellos productos que poseen residualidad (fertilizantes fosfatados) esto causa que se fertilice con subdosis para maximizar la eficiencia de utilización del fertilizante por el cultivo.

III.2. Importancia y funciones del Fósforo (P) en la planta

El P es uno de los 17 nutrientes considerados esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Marschner, 1995). Forma parte de enzimas, ácidos nucleicos y proteínas, y está involucrado en prácticamente todos los procesos de transferencia de energía.

Entre las principales funciones de P en las plantas se indican (Marschner, 1995):

1. Transferencia y almacenaje de energía: Los fosfatos son constituyentes del ATP y otros ésteres fosfatados que son intermediarios en vías metabólicas de síntesis y degradación.
2. El ATP y otros fosfatos son requeridos en la síntesis de azúcares, almidón y ácidos grasos y en la activación de enzimas.
3. Constituyente de ácidos nucleicos ADN y ARN, por lo tanto involucrado en la transferencia de características genéticas.

4. Constituyente de fosfolípidos de membranas celulares.
5. Transporte y absorción de nutrientes.

En general, las deficiencias de P afectan en mayor medida el crecimiento que la fotosíntesis (Mollier y Pellerin, 1999). Las plantas con deficiencias de P presentan menor expansión y área foliar y un menor número de hojas (Mollier y Pellerin, 1999).

La nodulación se ve también afectada en leguminosas cultivadas en suelos pobres en P debido a la alta demanda de P de los nódulos (Cassman *et al.*, 1980).

Los suelos bajo cultivo pierden P a través de la remoción en los productos de cosecha (granos, frutos, forrajes) y, eventualmente por erosión. Los primeros efectos se ven en las caídas del P orgánico, ya que la materia orgánica (MO) disminuye rápidamente cuando los suelos se cultivan: un 1% de pérdida de MO puede representar una pérdida de 80-120 kg/ha de P de la capa superficial (Tiessen *et al.*, 1984; Stevenson y Cole, 1999; Vázquez, 2002).

En el cuadro 2 se indican los requerimientos nutricionales promedio para producir una tonelada de grano de soja, el índice de cosecha de los distintos nutrientes y a modo de ejemplo, las necesidades totales y extracción en grano para un rendimiento de 4000 kg/ha. Los valores indicados en esta Tabla son promedios ya que se observan variaciones de acuerdo a la zona y sistema productivo.

Cuadro 2. Requerimientos nutricionales e índice de cosecha de nutrientes en soja¹.

Nutriente	Requerimiento	Índice cosecha	de Rendimiento de 4000 kg/ha	
	Kg/T grano		Necesidad kg/ha	Extracción kg/ha
Nitrógeno	80	0.75	320	240
Fósforo	8	0.84	32	27
Potasio	33	0.59	132	78
Calcio	16	0.19	64	12
Magnesio	9	0.30	36	11
Azufre	7	0.67	28	19
Boro*	25	0.31	100	31
Cloro*	237	0.47	948	446
Cobre*	25	0.53	100	053
Hierro*	300	0.25	1200	300
Manganeso*	150	0.33	600	198
Molibdeno*	5	0.85	20	17
Zinc*	60	0.70	240	168

* gramos por tonelada y gramos por hectárea.

En síntesis, la fertilización en soja se plantea a partir de la necesidad de mejorar los rendimientos y la rentabilidad del cultivo, y los balances de nutrientes en los suelos para mantener y/o mejorar su capacidad de producción.

III.3. Fertilización Fosfatada

La aplicación de P vía fertilizantes fosfatados o abonos, que excedan la cantidad extraída por los cultivos, resulta en un incremento de los niveles de P del suelo en el tiempo (Halvorson y Black, 1985; Berardo *et al.*, 1997). Esto genera un efecto residual, que se explica a partir de las bajas pérdidas de P del suelo, por lixiviación o escorrentía. El efecto residual en el nivel de P extractable depende de la dosis de P aplicado, de la remoción de P en productos de cosecha, y del tipo de suelo por los efectos de precipitación / adsorción, inmovilización en la materia orgánica y pérdidas por erosión (Barrow, 1980). El nivel de P extractable que se alcanza luego de la aplicación tiende a disminuir con el tiempo de acuerdo a las características de cada suelo, principalmente por la relaciones cantidad, intensidad y capacidad buffer de cada suelo (Berardo *et al.*, 1997).

El conocimiento de la residualidad de las aplicaciones de P permite realizar un manejo más eficiente de la fertilización, especialmente en las situaciones en las que las recomendaciones se proponen de acuerdo a la filosofía de construcción y mantenimiento del nivel de P del suelo, que implica llevar el nivel de P extractable a un umbral considerado adecuado para la producción de cultivos y, una vez alcanzado, mantenerlo (Allen y Mallarino, 2006; Mallarino y Prater, 2007).

La soja es un cultivo que responde a la fertilización fosforada, ya sea cuando el fertilizante es aplicado directamente al cultivo, o cuando es aplicado al cultivo antecesor (Darst, 1986). Kaspar et al. (1989) concluyen que la soja responde al agregado de fertilizante fosforado, siempre y cuando el cultivo no sufra un excesivo déficit hídrico, en cuyo caso se vería afectado la absorción de fósforo y el rendimiento de granos.

Para poder determinar la probabilidad de respuesta del cultivo a la aplicación de fósforo, es necesario determinar la curva de respuesta al agregado de nutriente, determinar la dosis para la máxima respuestas físicas y de acuerdo a los precios de la oleaginosa y el fertilizante, como así también establecer el umbral de disponibilidad a partir del cual se producen incrementos del rendimiento (nivel crítico). Diversos trabajos (Ferraris y Elizei, 2003) han permitido identificar umbrales críticos de respuesta a fósforo (P) en suelos de la región pampeana, con tenores de P Bray menores de 13-14 ppm.

De este modo, la recomendación de fertilización, se basa en el nivel de P Bray y el rendimiento esperado (Echeverría y García, 1998) Sin embargo, es necesario obtener mayor información acerca de cómo varía en el suelo la disponibilidad del nutriente con el tiempo de aplicación para determinar la disponibilidad del fósforo presente y la residualidad de las dosis aplicadas, las cuales puede ser aprovechada por el cultivo siguiente o implementar planes de recuperación de la fertilidad fosfatada en el suelo.

La importancia de este trabajo, se basa en evaluar la respuesta del cultivo de soja a la aplicación de diferentes dosis de fósforo y conocer como varía la disponibilidad con el tiempo de aplicación, lo cual va estimar las variaciones en la capacidad buffer del nutriente y por ende su disponibilidad.

III.4. Hipótesis

El rendimiento del cultivo de soja, en un Hapludol del sur de Santa Fe, se incrementa con la dosis de fósforo aplicada al suelo.

III.5. Objetivos

- Evaluar la respuesta del cultivo de soja con la aplicación de distintas dosis de fósforo.
- Evaluar la variación en la disponibilidad de fósforo con la dosis aplicada durante el ciclo del cultivo.
- Evaluar el efecto fitotóxico de la dosis aplicada.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

IV.1. Área de estudio

El ensayo se realizó en el establecimiento “La Armonía”, ubicado en el kilómetro 605 sobre Ruta Nacional N° 33, perteneciente a la localidad de Maggiolo, y a una distancia de 30km de la ciudad de Venado Tuerto. El establecimiento se encuentra en una asociación de suelos que incluye la serie Estancia Santa Ana y la serie El Abolengo, sobre sedimentos loésicos franco arenosos de origen medanoso en dirección NE-SO, al sur del departamento general López.

El experimento, se llevó a cabo sobre un sector de suelo perteneciente a la serie Santa Ana. Es un suelo de escaso desarrollo, presenta un horizonte superficial (A) de 25 cm, oscuro con textura franca, estructura en bloques, débil y con alrededor de 2,5 % de Materia Orgánica. Al estrato superficial sigue, en profundidad, uno transicional (AC) franco a franco arenoso. A los 60 cm de profundidad se alcanza el sustrato u horizonte C.

Estos suelos son de reacción ligeramente ácida y están levemente afectados por la erosión (Gorgas, et al. 1983).

Se realizó la caracterización climática de la zona de influencia, mediante la recopilación de información estadística de temperaturas máxima, mínima y media, y precipitaciones para una serie de 40 años, con datos aportados por la empresa Advanta Semillas y el Centro Agrotécnico Regional.

IV.2. Suelo

Serie Estancia Santa Ana. Hapludol éntico, franca gruesa, mixta, térmica (Gorgas, et al, 1983).

La Serie Santa Ana es un suelo liviano, profundo y algo excesivamente drenado, que se ha desarrollado en los sedimentos eólicos franco arenoso de origen medanoso que cruzan en forma de cordones, con dirección NE – SO, el sur del departamento General López. Esta serie ocupa las crestas y medias lomas del relieve ondulado y participa en algunos complejos ubicados en áreas planas.

La composición granulométrica del suelo es la siguiente: horizonte A: 23 % de arcilla, 29 % de limo y 48 % de arenas, horizonte AC: 20,2 % de arcilla, 25,1 % de limo y 54,7 % de arena, y horizonte C: 60% de arenas de las cuales el 50% corresponden a las muy finas.

Los suelos de esta serie, poseen reacción de pH ligeramente ácida y pueden estar levemente afectados por la erosión. Asimismo, este suelo puede encontrarse integrando series complejas en áreas de menor escurrimiento y se han descripto perfiles que presentan moteados

de hierro en el horizonte C, debido a que son afectados temporalmente por oscilaciones del nivel freático. Estos suelos corresponden a la fase moderadamente bien drenada de la Serie Santa Ana.

IV.2.i. Descripción del perfil típico.

El perfil que representa el concepto central de esta serie fue descrito a 13 Km al N – NW de la Estación del FGBM San Gregorio, en el departamento General López de la provincia de Santa Fe (Gorgas, et al, 1983).

A1 0 – 28 cm; pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2) en húmedo; franco; estructura en bloque subangulares medios moderados de grano simple; friable en húmedo; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; limite inferior claro y ondulado.

AC 28 – 61 cm; pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2) en húmedo; franco; estructura en bloques subangulares finos débiles; friable en húmedo; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; limite inferior gradual y ondulado.

C 61 – 130 cm +; pardo (7,5 YR 5/5) en húmedo; franco; estructura masiva; muy friable en húmedo.

En el cuadro 3, se observan las propiedades físicas y químicas del perfil típico de la Serie Santa Ana.

Cuadro 3. Propiedades físicas y químicas, del perfil típico Serie Santa Ana

Horizonte	A 1	AC	C
Profundidad de la muestra, cm	5-15	35-50	75-90
Materia Orgánica, %	2,81	0,36	
Carbono Orgánico, %	1,63	0,21	0,04
Nitrógeno total, %	0,187		
Relación C/N	9		
Arcilla %	23,9	20,2	14,3
Limo %,	26	25,1	22
Arena muy fina 1, 50-75 μ %	12,5	13,3	12
Arena muy fina 2, 75-100 μ %	32	35,5	44
Arena fina, 100-250 μ , %	5,5	5,9	7,7
Arena media, 250-500 μ , %	0,1		
Equivalente de humedad, %	20,3	16,8	13,3
pH en pasta	6,2	6,4	6,9
pH en agua, 1:2,5	6,7	7,2	7,5
Ca ⁺⁺ cmol _c /Kg.	10,5	7,7	7,3
Mg ⁺⁺ cmol _c /Kg.	2,3	3,4	3,5
Na ⁺ cmol _c /Kg.	0,5	0,3	0,3
K ⁺ cmol _c /Kg.	3,5	2,5	1,1
H ⁺ cmol _c /Kg.	6,9	3,9	2,4
Suma de bases, cmol _c /kg	16,8	13,9	12,2
C.I.C. cmol _c /Kg.	18,4	14,4	11,8
Saturación con bases, % (S/T)	91	95	100

IV.3. Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques al azar con tres repeticiones por tratamiento.

Los tratamientos de fertilización fueron los siguientes:

Tratamiento 1: 0 Kg. P/ha, equivalente a 0 Kg. de MAP

Tratamiento 2: 9 Kg. P/ha equivalente a 40 Kg. de MAP

Tratamiento 3: 18 Kg. P/ha equivalente a 80 Kg. de MAP

Tratamiento 4: 31 Kg. P/ha equivalente a 140 Kg. de MAP

Tratamiento 5: 44 Kg. P/ha equivalente a 200 Kg. de MAP

El fertilizante, se aplicó en la línea de siembra, con fosfato monoamónico (MAP) como fuente fosfatada (0-51-0).

Variedad de soja: NA 4613.

Fecha de siembra: 28/10/2006

Distancia entre hileras: 52 cm

IV.4. Evaluaciones y determinaciones

IV.4.i. En planta

Se realizaron las siguientes mediciones:

1) Densidad de plantas emergidas en V1. En cada parcela se contabilizó el número de plantas en 1,923 m lineales de surco, lo cual equivale a 1 m², el conteo se realizó por triplicado y se expuso el valor medio.

2) Rendimiento del cultivo: en cada parcela se cosecharon tres submuestras de 1m², determinándose el peso por unidad de superficie promedio de cada parcela.

3) Peso de 1000 semillas, se contabilizó en 8 repeticiones de 100 semillas, se determinó el promedio y el coeficiente de variación (ISTA, 2006).

IV.4.ii. Determinaciones en el suelo

En los estadios fenológicos del cultivo R1, R4 y R8, se extrajeron en la línea de aplicación del fertilizante muestras de suelo compuestas de los primeros 20 cm de profundidad. Cada muestra compuesta se conformó de 25 muestras simples.

Las muestras de suelo se secaron al aire y a la sombra a una temperatura inferior a 35° C, para evitar alteraciones físico químicas (Tan, 1996), se tamizaron con tamiz de 2 mm para su posterior análisis. Todos los análisis se realizaron por duplicado y el valor que se presenta es el promedio de las dos repeticiones.

Cantidad de fósforo disponible en suelo en los distintos estadios del cultivo se extrajo con Bray P₁ (Bray & Kurtz, 1945). Para las determinaciones de fósforo, se utilizó el método del paramolibdato de amonio (Murphy & Riley 1962, modificado por Watanabe & Olsen 1965; citados por Olsen & Sommer, 1982).

En pre siembra del cultivo, se determinó el pH del suelo con electrodo de vidrio en una suspensión agua-suelo 1:1 (v/v). La materia orgánica del suelo se determinó por el procedimiento de Walkley y Black (Nelson *et al.*, 1982).

IV.5. Análisis estadístico

Las pruebas de normalidad, homogeneidad de variancia, se realizaron con el test LSD Fisher con el programa Infostat (Di Rienzo. et al., 2005a). Las correlaciones lineares entre variables se establecieron mediante coeficientes de Pearson. La respuesta del suelo y del cultivo a la aplicación de fósforo se analizó con modelos de regresión lineal, con el programa Infostat (Di Rienzo. et al., 2005b), y mediante ANOVA para las diferencias entre medias, considerando un nivel de significación del 5 %.

V. RESULTADOS

V.1. Caracterización Climática

Se realizó una caracterización climática del establecimiento, tomando los valores históricos desde el año 1966 al año 2006, registrándose temperaturas máximas, mínimas, medias y, precipitaciones promedio y la registrada en la presente campaña.

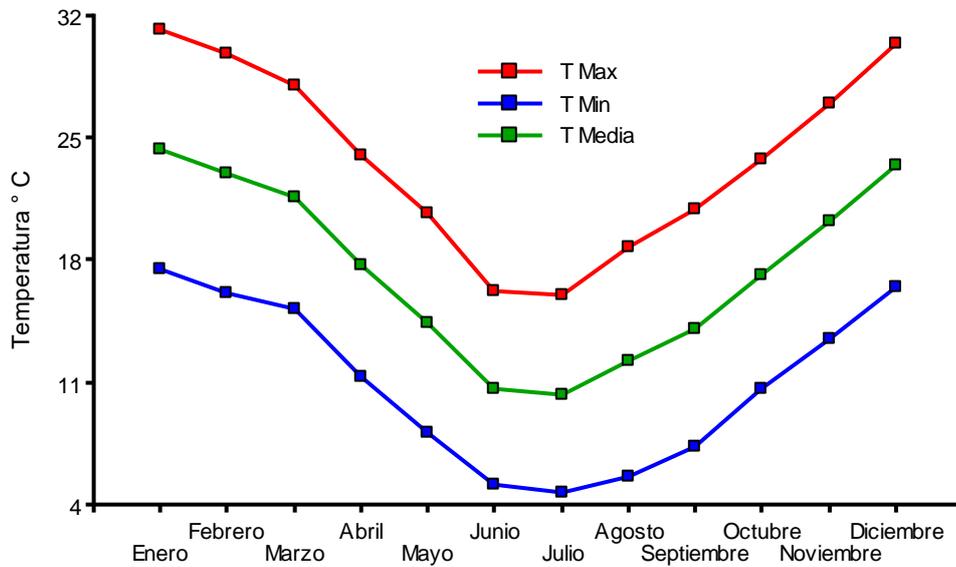


Figura 2. Temperaturas máxima, mínima y media histórica.

Los registros de temperatura no manifiestan limitaciones térmicas para el crecimiento y desarrollo de la soja.

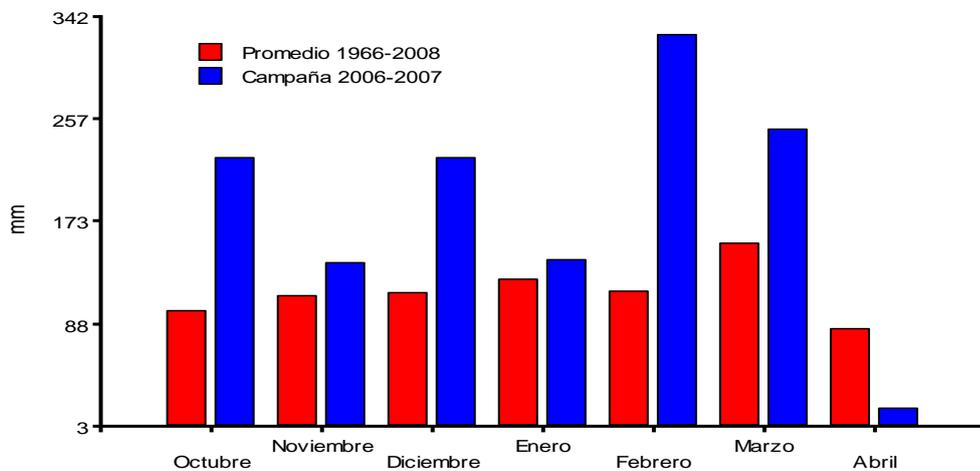


Figura 3. Precipitaciones medias y registradas en la campaña 2006-2007.

Durante todo el ciclo del cultivo las precipitaciones sobrepasaron ampliamente la media histórica (Figura 3). El registro mensual se indica en el Anexo.

V.2. Caracterización de la disponibilidad de P del suelo

El suelo donde se realizó el ensayo es un Hapludol perteneciente a la serie Santa Ana, el cual se caracteriza por ser un suelo muy bien drenado. En este sitio se realizó un análisis previo al ensayo, en el cual se determinó en una muestra compuesta: pH (1:1)= 5,84, lo cual indica una reacción ligeramente ácida en el horizonte A, Materia Orgánica = 3,05% y de fósforo extractable con el método Bray & Kurtz 1 =11,6 ppm con la misma extractiva. Este tenor de P disponible, representa una condición de probabilidad de respuesta económicamente rentable a la fertilización fosforada (Echeverría et al., 2002; Ferraris y Elizei, 2003).

En tres momentos del ciclo del cultivo se evaluó la variación en los tenores de fósforo extractable Bray & Kurtz1, en cada una de las dosis y en la línea de aplicación del fertilizante hasta una profundidad de 20 cm.

El primer muestreo se realizó en R1, momento en que la soja alcanzó su máximo requerimiento de este nutriente, los cuales se repitieron en R4 y R8, para evaluar la variación de disponibilidad con el tiempo de aplicación y determinar residualidad del nutriente en el suelo.

En la figura 4 se observa la variación de la disponibilidad de fósforo para cada una de las dosis y estadio fenológico, los cuales se ajustaron a un modelo de regresión lineal.

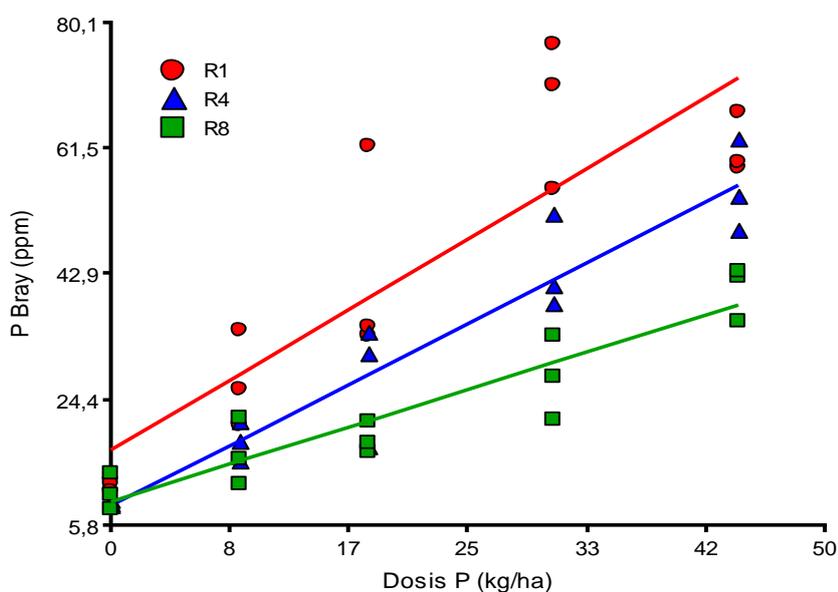


Figura 4. Variación de la disponibilidad de fósforo en la línea de siembra en función de la dosis y estadio fenológico.

En el cuadro 4 se observan, los modelos de regresión para cada uno de los estados fenológicos y el análisis estadístico.

Cuadro 4. Modelos de regresión y análisis estadístico

Estadio	Modelo	R ²	p
R1	$P(\text{ppm}) = 16,8 + 1,25 * P \text{ (kg/ha)}$	0,76	<0,0001
R4	$P(\text{ppm}) = 8,6 + 1,08 * P \text{ (kg/ha)}$	0,92	<0,0001
R8	$P(\text{ppm}) = 9,32 + 0,66 * P \text{ (kg/ha)}$	0,87	<0,0001

Para los tres estadios fenológicos las pendientes de las variaciones de disponibilidad en función de la dosis, son altamente significativas. En los estadios R4 y R8 se observa un mejor ajuste que en R1, por lo cual los modelos planteados se pueden utilizar para predecir la disponibilidad del fósforo en el suelo luego de la aplicación de una dosis de fertilizante.

En la figura 4 se observa que la disponibilidad del producto aplicado disminuye con el tiempo de aplicación, lo cual se observa en la disminución de las pendientes entre R1 y R8.

La inversa de esta pendiente estima la capacidad buffer de fósforo del suelo (Silva Rossi; 2004), por lo cual durante el ciclo del cultivo se requiere entre 0,8 y 1,5 kg P ha⁻¹, para incrementar la disponibilidad del nutriente en una unidad, entre R1 y R8. Estos valores indican una alta disponibilidad del fósforo en el suelo cuando el cultivo alcanzó su máximo requerimiento en R1. Las altas variaciones en los tenores de P en suelo con el incremento de las dosis aplicadas, indica la baja resistencia del suelo a que se produzcan cambios en la concentración del nutriente, lo cual está indicando una baja capacidad buffer y una alta disponibilidad del fósforo agregado (Cuadro 4), como así también las variaciones que se producen en las mismas con el tiempo transcurrido desde la aplicación. Esto mismo se observó en distintos suelos de la región central pampeana (Bachmeier; 2001, Silva Rossi, et al; 2008).

V.3. Determinaciones en planta

V.3.i. Densidad

En el estadio V1 se determinó la densidad de plantas por m² en cada uno de los tratamientos con el objetivo de evaluar si se produjo algún efecto de fitotoxicidad por la dosis de fertilizante, el cual puede afectar el rendimiento.

En la figura 5 se observa la variación de la densidad en función de la dosis de fósforo aplicado. Si bien los resultados muestran una tendencia a disminuir la densidad, los valores muestran una muy alta dispersión.

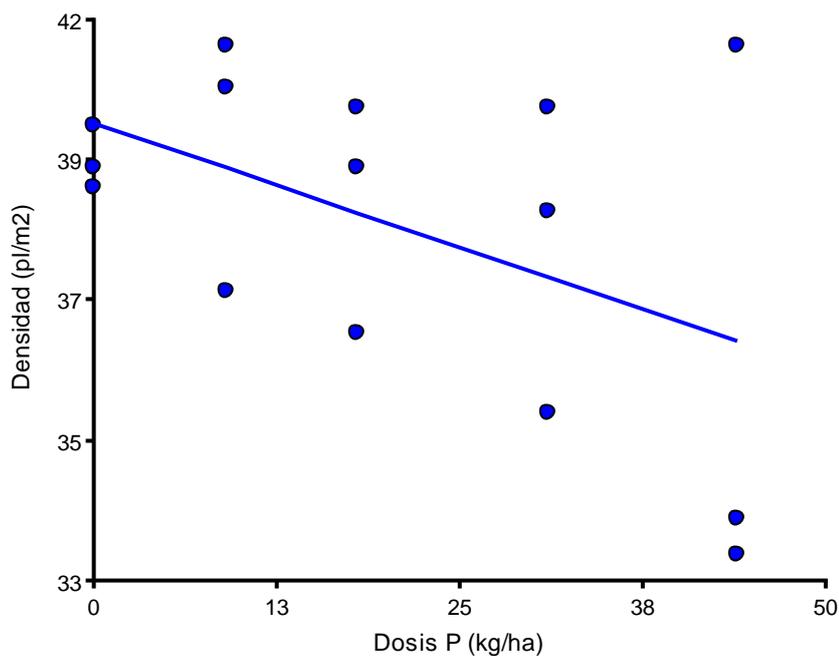


Figura 5. Variación de la densidad en función de la dosis de fósforo.

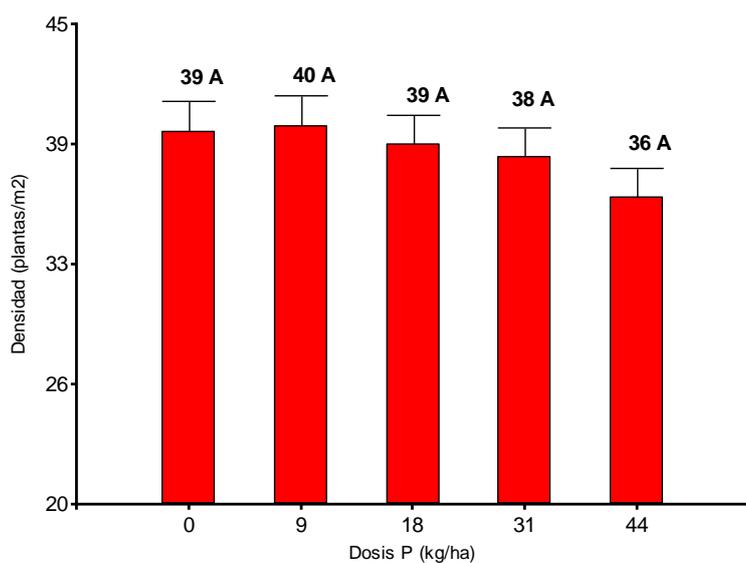


Figura 6. Densidad de plantas emergidas en función de la dosis de fosforo aplicada. Letras distintas indican diferencias significativas para valores de $p < 0.05$ Test LSD Fisher.

A los resultados obtenidos, se realizó el test LSD de Fisher para determinar diferencias entre medias, el cual no fue significativo ($p > 0,05$) se ajustaron a un modelo de regresión lineal, el cual no posee un buen ajuste ($R^2 = 0,24$) y la pendiente no es significativa ($p > 0,05$). El bajo coeficiente de ajuste indica que con estos resultados experimentales no se puede concluir acerca del efecto fitotóxico de la aplicación de distintas dosis de fertilizante. Asimismo

en ANOVA (figura 6) para esta variable no mostró diferencias significativas entre la dosis de P aplicada y la densidad de siembra de soja.

V.4. Rendimiento del cultivo

Luego de madurez fisiológica se realizó la cosecha del ensayo, estos resultados se correlacionaron con las dosis de fertilizante aplicadas como se observa en la figura 6.

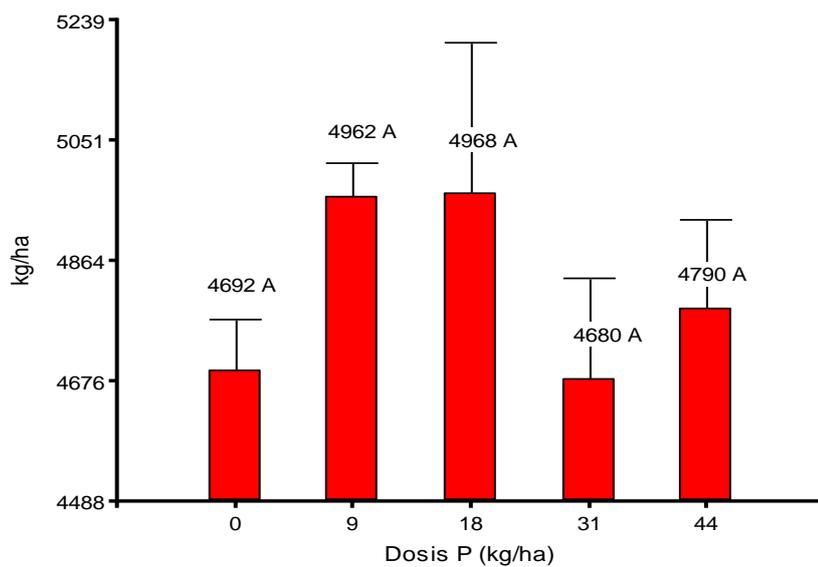


Figura 7. Rendimiento de soja en función de la dosis de fósforo aplicada. Letras distintas indican diferencias significativas para test LSD Fisher ($p < 0,05$).

El análisis de varianza no muestra diferencias significativas de rendimiento sobre los diferentes tratamientos, por lo cual se puede afirmar que en las condiciones evaluadas no se observó respuesta de rendimiento al incremento de la dosis de fertilización. Esto mismo se observa cuando se relacionan los rendimientos con los tenores de fósforo disponible en R1. (Figura III.6)

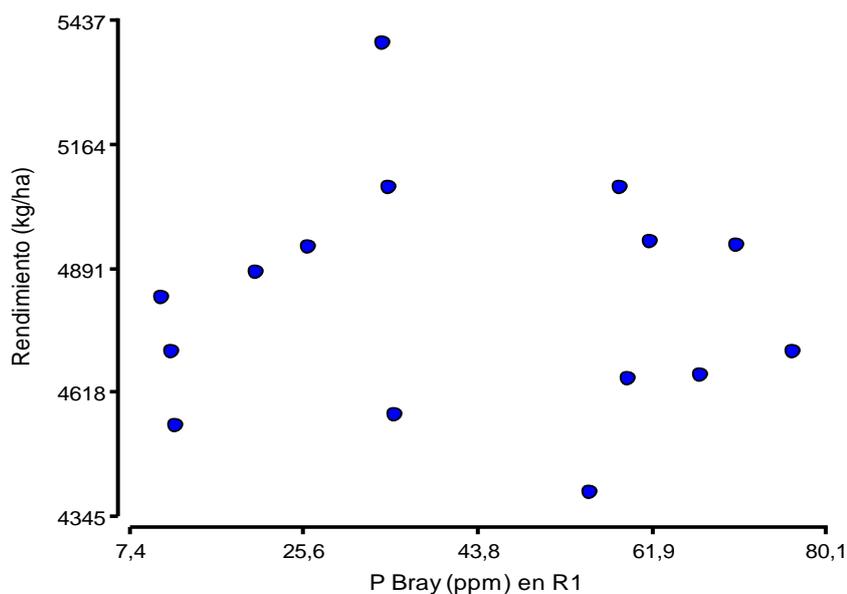


Figura 8. Rendimiento del cultivo en función de la disponibilidad de fósforo en R1.

Estos resultados indicarían que el umbral de respuesta para las condiciones evaluadas se encuentra por debajo de 12 ppm de fósforo disponible, esto coincide con lo observado por Dodd, et al. (2005) en una amplia variedad de suelos de Iowa y en suelos del sur de Santa Fe, García, et al. (2007). Recientes resultados de una amplia red de ensayos en el Sur de Santa Fe plantean que los niveles críticos de P para soja están en el orden de 14 ppm (García et al., 2010).

V.5. Componentes de rendimiento

V.5.i. Peso de mil semillas y granos por metro cuadrado

A cada uno de los tratamientos se determinó el peso de mil semillas y junto al dato de rendimiento se estimó el número de granos por m², componente de rendimiento más importante en el cultivo de soja. Estos resultados se observan en la figura 8.

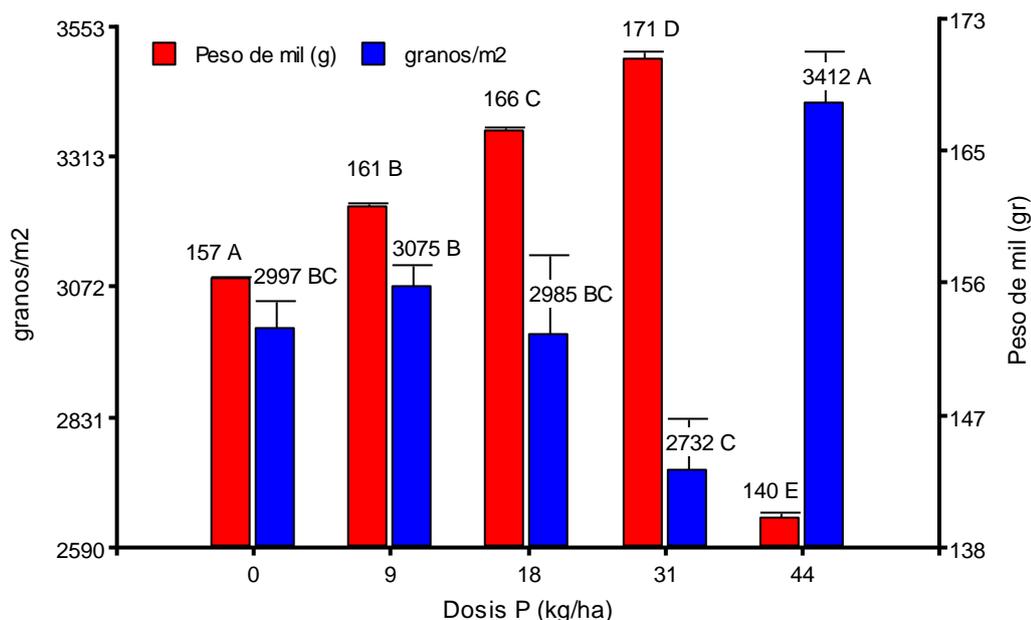


Figura 9. *Peso de mil semillas y número de granos por metro cuadrado en función de la dosis de fósforo aplicada. Letras distintas indican diferencias significativas para test LSD Fisher ($p < 0,05$).*

La fertilización incremento el peso de los granos (hasta 31 kg P/ha) con las dosis mayores la relación fue negativa.

El número de granos solo se incremento con las dosis más altas. Estas variaciones se compensan con la variación del peso de los granos para mantener sin diferencia el rendimiento (figura 6), tal como lo demuestra Ferraris y Couretot (2004) en su trabajo sobre fertilización fosforada en soja.

V.6. Discusión de los resultados

Durante la campaña en la que se realizaron estos ensayos el régimen de precipitaciones fue totalmente atípico, superando la media histórica en 526 mm para los mese de Octubre a Abril, registrando un total de 1324 mm durante el ciclo del cultivo.

La textura de este suelo le confiere una muy buena condición de drenaje por lo cual las altas precipitaciones no afectaron en forma negativa el desarrollo del cultivo, lo cual se comprueba con los rendimientos obtenidos en todos los tratamientos. Esta alta disponibilidad de agua puede ser una de las razones por la cual no se observo un efecto fitotóxico en las semillas aun con dosis altas aplicadas en la línea. Los rendimientos de soja obtenidos en el presente trabajo se correlacionan a los presentados en las redes de ensayos de nutrición de cultivos AAPRESID (Bianchini, et al; 2007).

A pesar de los relativamente bajos tenores de fósforo por Bray 1 (11,6 ppm de P) este posee una alta disponibilidad lo cual se observó por la baja capacidad buffer estimada a través de la inversa de las pendientes de las curvas que evalúan la disponibilidad en función de la dosis de fósforo aplicado para 3 estadios fenológicos del cultivo, tal como lo indica Ferraris, et al. (2004), en suelos de la localidad de Wheelwright, provincia de Santa Fe. Esta disponibilidad disminuye en forma significativa en madurez fisiológica, manteniendo un 60% de la dosis inicialmente aplicada para el cultivo siguiente.

La falta de respuesta del cultivo a la fertilización fosforada por lo tanto puede atribuirse a que el nivel crítico de fósforo en estos suelos sería inferior a los 11,6 ppm, valor menor a los citados por Ferraris y Elizei (2003), lo cual confirmaría que, para las condiciones estudiadas, el suelo presentó una disponibilidad de fósforo no limitante para el rendimiento de soja.

VI. CONCLUSIONES

- Para las condiciones experimentales estudiadas no se observaron efectos fitotóxicos del fertilizante sobre las semillas, aun en las altas dosis, debido a que no hubo diferencias significativas en la emergencia.

- Los resultados indicarían que el suelo estudiado posee una capacidad buffer relativamente baja, debido a que se requieren bajas dosis para elevar los tenores de P Bray en 1 ppm en el corto plazo (entre 0,8 y 1,5 kg de P/ppm).

- Para las condiciones estudiadas, el nivel crítico del cultivo a la fertilización fosfatada se encontraría cercano o por debajo de 12 ppm de P, ya que las dosis de fertilización aplicadas no mostraron respuestas significativas en el rendimiento del cultivo.

- Por esta razón, los resultados obtenidos no permiten validar la hipótesis planteada de existencia de respuesta al agregado de P, probablemente debido a que bajo las condiciones experimentales, el suelo mostró niveles de P que estarían por encima del nivel crítico (> 11,6 ppm).

- La fertilización incrementaría el peso de los granos, lo cual marca la importancia de evaluar, no solo el rendimiento del cultivo a distintas dosis aplicadas, sino además los distintos componentes de rendimiento.

VII. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- ALLEN, B.L. and A.P. MALLARINO. 2006. **Relationships between extractable soil phosphorus and phosphorus saturation after long-term fertilizer or manure application.** *Soil Science Society of America Journal* 70: 454-463.
- BARROW, N. 1980. **Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils.** En: F. Khasawneh, E. Sample y E. Kamprath (eds.). *The role of phosphorus in agriculture.* ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU.
- BERARDO, A. 2003. Manejo del fósforo en los sistemas de producción pampeanos. En: **Simposio “El fósforo en la Agricultura Argentina”.** Páginas 38-44. IMPOFOS Cono Sur. 89/5/2003 Rosario.
- BERARDO, A. 2008. **Manejo de la Fertilización en una agricultura sustentable.** Facultad de Ciencias Agrarias INTA Balcarce y Laboratorio de Suelos Fertilab (aberardo@laboratoriofertilab.com.ar)
- BERARDO, A.; F. GRATTORE; R. RIZZALLI and F. GARCIA. 1997. **Long-term effects of P fertilization in wheat yields, efficiency and soil test levels.** *Better Crops* 12 (2): 18-20.
- CASSMAN, K.G.; A.S. WHITNEY and K.R. STOCKINGER. 1980. **Root Growth and Dry Matter Distribution of Soybean as Affected by Phosphorus Stress, Nodulation, and Nitrogen Source.** *Crop Science* 20 (2): 239-244.
- DARST, B. C. 1986. **Crop yield response to phosphorus.** En **"Phosphorus for Agriculture: A situation analysis"**. Potash and Phosphate Institute, Athens, Georgia, USA.
- ECHEVERRÍA H., G. Ferraris, G. Gerster, F. Gutiérrez Boem y F. Salvaggiotti (Ex aequo). 2002. **Fertilización en soja y trigo - soja: Respuesta a la fertilización en la región pampeana.** Resultados de la red de ensayos del proyecto fertilizar – INTA. Campaña 2000/2001 y 2001/2002. Proyecto Fertilizar INTA. EEA INTA Pergamino. Buenos Aires, Argentina. En www.fertilizar.org, rev. 30/10/02.
- FERRÁRIS, G. y J. ELIZEI. 2003. **Fertilización en Soja.** Experiencias en Colon y Pergamino. Soja 2000/2003. Resultados en Unidades Demostrativas. Informe de Extensión, Proyecto Regional Agrícola. Pp96-104.
- GARCIA F. ; M. Boxler; J. Minteguiaga; R. Pozzi; L. Firpo; I. Ciampitti; A. Correndo; F. Bauschen; A. Berardo y N. Reussi Calvo. 2010. **La Red de Nutrición de la Región Crea Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones**

- de los primeros diez años 200-2009. 2a. ed. AACREA.** Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-1513-07-9. 64 pag.
- GARCÍA F. 2003. El manejo de fósforo en la producción de trigo y maíz. En: **Simposio “El fósforo en la Agricultura Argentina”.** INPOFOS Cono Sur. 8-9/5/2003 Rosario.
- HALVORSON, A. and A. BLACK. 1985. **Long-term dryland crop responses to residual phosphorus fertilizer.** *Soil Science Society of America Journal* 49:928-933.
- KASPAR, T. C.; Zahler, B. J.; Timmons, B. R. 1989. **Soybean response to phosphorus and potassium fertilizers as affected by soil drying.** *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol 53: 1448-1454.
- MALLARINO, A.P. and J. PRATER. 2007. **Corn and soybean grain yield, P removal, and soil-test responses to long-term phosphorus fertilization strategies.** Proceedings 19th Annual Integrated Crop Management Conference, Ames, Iowa State University.
- MARSCHNER, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London 2nd edition. 889 pp.
- MOLLIER, A. and S. PELLERIN. 1999. **Maize root system growth and development as influenced by P deficiency.** *Journal Experimental of Botany* 50 (333): 487-497.
- MONTOYA, J., BONO, A.A., SUÁREZ, A., DARWICH, N. Y BABINEC, F. 1999. **Cambios en el contenido de fósforo asimilable en los suelos del este de la Provincia de La Pampa.** *Ciencia del suelo* 17:45-48.
- Nelson, D.W., and L. E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *In:* A.L. Page et al. (Editors). *Methods of soil analysis. Part 2* 2nd ed. ASA, SSSA, Madison WI, pp. 539-577.
- SAGPYA. 2009. **Dirección de coordinación de delegaciones, estimaciones agrícolas.** En: www.sagpya.gov.ar. Consultado: 15/05/09.
- STEVENSON, F.J. and M.A. COLE. 1999. **Cycles of soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients.** John Wiley & Sons, Nueva York, EE.UU. 2a. edición. 427 pp.
- TIESSEN, H.; J.W.B. STEWART and C.V. COLE. 1984. **Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis.** *Soil Science Society of American Journal* 48: 853-858.

- VALETTI, O., L. Iriarte, M. Borda y N. Migasso. 1995. **Fertilización en girasol, aspectos generales a tener en cuenta.** Material de divulgación 1. Chacra Experimental Barrow. 38 p.
- VÁZQUEZ, ME. 2002. **Balance y fertilidad fosforada en suelos productivos de la Región Pampeana.** *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 10:3-7. INPOFOS, Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- VAZQUEZ, M.E. 2002. **Balance y fertilidad fosforada en suelos productivos de la región pampeana.** *Informaciones Agronómicas* 16: 3-7. IPNI Cono Sur. Acassuso, Bs. As., Argentina.

VIII. ANEXO

Meses	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril
Media Historica (mm)	88	103	112	115	94	136	82
Campaña 2006-2007 (mm)	226	138	225	141	375	249	18

Cuadro 5. Promedio histórico de precipitaciones y lluvias campaña 2006-2007.