

# Aplicación anticipada de fósforo: Efectos sobre la disponibilidad del nutriente, eficiencia de uso y rendimiento.

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,  
Área Ciencias del Suelo*

María Guadalupe Tellería  
Ingeniera Agrónoma - Universidad de Buenos Aires - 2005

Lugar de trabajo: AER INTA Junín



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano  
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



# COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Flavio H. Gutiérrez Boem  
Ingeniero Agrónomo (UBA)  
Ph. D. (University of Kentucky, EE.UU.)

Consejero de Estudios

Gustavo N. Ferraris  
Ingeniero Agrónomo (UNR)  
Magister Scientiae (UBA)

## **JURADO DE TESIS**

Director de tesis

Flavio H. Gutiérrez Boem

Ingeniero Agrónomo (UBA)

Ph. D. (University of Kentucky, EE.UU.)

Jurado

Norma Graciela Boschetti

Licenciada en Edafología (UCSF)

Dra. en Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente (Universidade da Coruña, España)

Jurado

Lidia Giuffré

Ingeniera Agrónoma (UBA)

Mg Sc Ciencias del Suelo (UBA)

Fecha de aprobación de la tesis: 16 de Julio de 2014

## Agradecimientos:

A mi director de tesis, el Dr. Flavio Gutiérrez Boem por haberme brindado sus conocimientos, por su paciencia y su colaboración continua en la elaboración de mi tesis y por haberme abierto las puertas de la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes quienes me hicieron sentir una integrante más del grupo.

A mi consejero de estudios, el Ing.Agr. Gustavo Ferraris por sus aportes a mi trabajo y por su guía permanente tanto durante el postgrado, como así también durante mi labor como becaria del INTA.

A mis compañeros de la AER INTA Junín, por su apoyo y por la ayuda que me proporcionaron para poder llevar a cabo el gran trabajo de campo de mi tesis y las actividades diarias de la agencia.

Y muy especialmente agradezco a mis padres y a mi esposo, por su afecto y apoyo incondicional y por acompañarme a cada instante en este largo camino que transité, así como en cada momento de mi vida.

*Dedicatoria: A mi futuro bebé, que dentro de muy poco tiempo estará en mis brazos.*

Declaración:

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

Ing.Agr. María Guadalupe Tellería

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
DESCRIPCIÓN DE ESTADOS FENOLÓGICOS DE MAÍZ (ESCALA DE Ritchie y Hanway, 1982) MENCIONADOS EN ESTE TRABAJO.....	xiv
DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS QUÍMICOS.....	xv
DESCRIPCIÓN DE ABREVIATURAS.....	xv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
<b>CAPÍTULO I:</b>	
Introducción.....	1
1. Objetivos.....	6
2. Hipótesis.....	6
<b>CAPÍTULO II: Materiales y Métodos.....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO III: Resultados y Discusión</b>	
1. Condiciones agroclimáticas durante el desarrollo de los experimentos.....	11
2. Biomasa acumulada en distintos estados fenológicos.....	14
2.1. Crecimiento temprano del cultivo (V6-V8).....	14
2.2. Floración (R1).....	17
2.3. Madurez fisiológica (MF).....	20
3. Rendimiento en grano y EUP (Eficiencia en el Uso del P).....	23
4. P disponible.....	29
4.1. Cambio de P disponible al inicio del ciclo del cultivo.....	29
4.2. Contenido de P disponible al momento de la cosecha.....	36
5. Recuperación del P.....	39
5.1. Recuperación del P aplicado a inicios del ciclo del cultivo.....	39
5.2. Recuperación del P en madurez fisiológica.....	42

6. Balance de P.....	46
CAPÍTULO IV: Conclusiones y consideraciones finales.....	50
BIBLIOGRAFÍA.....	53
ANEXO.....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> - Datos analíticos (físicos y químicos) del horizonte superficial de las Series de suelo y su clasificación taxonómica.....	7
<b>Tabla 2</b> - Precipitaciones mensuales desde junio hasta marzo para las campañas 2009-10; 2010-11 y 2011-12.....	11
<b>Tabla 3</b> - Precipitaciones durante el período de 90 días antes de la siembra y durante el ciclo del cultivo de maíz para las campañas 2009-10; 2010-11 y 2011-12.....	11
<b>Tabla 4</b> - Crecimiento temprano del cultivo. Biomasa aérea (kg ha <sup>-1</sup> ) en V6 (2009-10) y V8 (2010-11).....	15
<b>Tabla 5</b> - ANVA de crecimiento temprano del cultivo (biomasa aérea acumulada en V6 en 2009/10 y V8 en 2010/11).....	15
<b>Tabla 6</b> - Relación entre la Respuesta en V6 y V8 ( $\Delta$ biomasa aérea, kg ha <sup>-1</sup> ) y la dosis de P en los experimentos de 2009/10 y 2010/11. Comparación entre momentos de aplicación.....	16
<b>Tabla 7</b> - Biomasa aérea (kg ha <sup>-1</sup> ) acumulada por el cultivo maíz en floración.....	18
<b>Tabla 8</b> - ANVA de Biomasa aérea acumulada en maíz en R1 (kg ha <sup>-1</sup> ). Campañas 2009-10 y 2010-11.....	18
<b>Tabla 9</b> - Relación entre la Respuesta en R1 ( $\Delta$ biomasa aérea, kg ha <sup>-1</sup> ) y la dosis de P en los experimentos de 2009/10 y 2010/11. Comparación entre momentos de aplicación.....	19
<b>Tabla 10</b> - Biomasa aérea acumulada en maíz en MF (kg ha <sup>-1</sup> ). Campañas 2009-10 y 2010-11.....	20
<b>Tabla 11</b> - ANVA de Biomasa aérea acumulada en maíz en MF (kg ha <sup>-1</sup> ). Campañas 2009-10 y 2010-11.....	20
<b>Tabla 12</b> - Relación entre la Respuesta en MF ( $\Delta$ biomasa aérea, kg ha <sup>-1</sup> ) y la dosis de P en los experimentos de las campañas 2009/10 y 2010/11. Comparación entre momentos de aplicación.....	21
<b>Tabla 13</b> - Eficiencia en el uso del P (EUP) en la generación de biomasa en MF para aplicaciones al voleo y en línea de siembra (kg kg P <sup>-1</sup> ).....	23
<b>Tabla 14</b> - Rendimiento en grano (kg ha <sup>-1</sup> , 14,5% Humedad). Campañas 2009/10, 2010/11 y 2011/12.....	24
<b>Tabla 15</b> - ANVA de rendimiento en grano de maíz (kg ha <sup>-1</sup> ). Campañas 2009-10, 2010-11 y 2011-12.....	25



<b>Tabla 16</b> - Relación entre la Respuesta de rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y la dosis de P en los experimentos de las campañas 2009/10, 2010/11 y 2011/12. Comparación entre momentos de aplicación.....	26
<b>Tabla 17</b> - Relación entre rendimiento anticipado vs siembra y respuesta anticipado vs siembra.....	27
<b>Tabla 18</b> - Contenido de P disponible en el suelo ( $\text{mg P kg}^{-1}$ suelo) (P Bray) con el cultivo en V6 y V8 para las campañas 2009/10 y 2010/11, respectivamente.....	30
<b>Tabla 19</b> - Relación entre el incremento de P disponible en el suelo ( $\Delta\text{P suelo mg P kg}^{-1}$ suelo) y la dosis de P en los experimentos de 2009/10 y 2010/11. Comparación entre momentos de aplicación.....	32
<b>Tabla 20</b> - Relación entre la biomasa acumulada en V6 y V8 ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y el P disponible en el suelo ( $\text{mg P kg}^{-1}$ suelo) de 0-5 cm de profundidad en los experimentos de 2009/10 y 2010/11. Comparación entre momentos de aplicación.....	35
<b>Tabla 21</b> - Contenido de P disponible en el suelo ( $\text{mg P kg}^{-1}$ suelo) (P Bray) al momento de MF del cultivo para las campañas 2009/10 y 2010/11.....	36
<b>Tabla 22</b> - Relación entre el incremento de P disponible en el suelo ( $\Delta\text{P suelo mg P kg}^{-1}$ suelo) y la dosis de P en los experimentos de 2009/10 y 2010/11. Comparación entre momentos de aplicación.....	38
<b>Tabla 23</b> - Concentración y absorción de P en biomasa aérea de maíz en V6 (2009-10) y V8 (2010-11).....	39
<b>Tabla 24</b> - ANVA de Concentración y absorción de P en biomasa aérea de maíz en V6 (2009-10) y V8 (2010-11).....	40
<b>Tabla 25</b> - Relación entre el incremento de P absorbido ( $\Delta\text{P absorbido}$ ) y la dosis de P en los experimentos de 2009/10 y 2010/11. Las pendientes representan las ERP. Comparación entre momentos de aplicación.....	41
<b>Tabla 26</b> - Concentración de P en grano y rastrojo ( $\text{mg g}^{-1}$ ), P absorbido (grano + rastrojo) ( $\text{kg P ha}^{-1}$ ), P extraído ( $\text{kg P ha}^{-1}$ ) y Balance de P en maíz en MF.....	42
<b>Tabla 27</b> - ANVA de Concentración de P en grano ( $\text{mg P g}^{-1}$ ) y absorción de P ( $\text{kg P ha}^{-1}$ ) (grano + rastrojo). Campañas 2009-10 y 2010-11.....	43
<b>Tabla 28</b> - Relación entre $\Delta\text{P Absorbido}$ ( $\text{kg P ha}^{-1}$ ) y la dosis de P en el experimento de 2009/10. Comparación entre momentos de aplicación.....	44
<b>Tabla 29</b> - Valores de ERP marginal y de error estándar para cada una de las dosis.....	45

**ANEXO**

<b>Tabla 1</b> - Balance hídrico para la Campaña 2009/10.....	59
<b>Tabla 2</b> - Balance hídrico para la Campaña 2010/11.....	59
<b>Tabla 3</b> - Balance hídrico para la Campaña 2011/12.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1** - Balance hídrico para la Campaña 2009-10. Los valores 1, 2 y 3 en el eje horizontal indican el primer, segundo y tercer período decádico de cada mes. Los datos de precipitaciones fueron obtenidos de los registros de un establecimiento vecino y los datos de Evapotranspiración de maíz (Et.maíz) fueron calculados a partir de los datos de Evapotranspiración tomados por la EEA Pergamino.....12
- Figura 2** - Balance hídrico para la Campaña 2010-11. Los valores 1, 2 y 3 en el eje horizontal indican el primer, segundo y tercer período decádico de cada mes. Los datos de precipitaciones fueron obtenidos del Servicio Meteorológico (Aeródromo Junín) y los datos de Evapotranspiración de maíz (Et.maíz) fueron calculados a partir de los datos de Evapotranspiración tomados por la EEA Pergamino.....13
- Figura 3** - Balance hídrico para la Campaña 2011-12. Los valores 1, 2 y 3 en el eje horizontal indican el primer, segundo y tercer período decádico de cada mes. Los datos de precipitaciones fueron obtenidos del Servicio Meteorológico (Aeródromo Junín) y los datos de Evapotranspiración de maíz (Et.maíz) fueron calculados a partir de los datos de Evapotranspiración tomados por la EEA Pergamino.....14
- Figura 4** - Respuesta al agregado de P en V6 (Campaña 2009-10) y V8 (Campaña 2010-11) en función de la dosis. La representación se realiza con una sola regresión ya que no difiere de la representación con dos regresiones (una para cada momento).....17
- Figura 5** - Respuesta al agregado de P en R1 (Campañas 2009-10 y 2010-11) en función de la dosis. La representación se realiza con una sola regresión ya que no difiere de la representación con dos regresiones (una para cada momento).....19
- Figura 6** - Respuesta al agregado de P en MF (Campañas 2009-10 y 2010-11) en función de la dosis. La representación se realiza con una sola regresión ya que no difiere de la representación con dos regresiones (una para cada momento).....22
- Figura 7** - Acumulación de MS temprana y al final del ciclo del cultivo por efecto de la ubicación del fertilizante (voleo vs. línea) para la dosis de  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  durante los estadios fenológicos V6-V8 (figura A) y MF (figura B). Los datos de los tratamientos con aplicación de P al voleo corresponden a la aplicación al momento de la siembra. Letras diferentes dentro de la misma campaña indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ).....23

- Figura 8** - Respuesta de rendimiento en grano en función de la dosis, Campañas 2009-10 (cuadrados), 2010-11 (triángulos) y 2011-12 (círculos). La representación se realiza con una sola regresión por año ya que no difiere de la representación con dos regresiones.....25
- Figura 9** - Relación entre el rendimiento y respuesta de los tratamientos con aplicaciones al voleo anticipado vs a la siembra. Los puntos alineados en torno a la relación 1:1 indican ausencia de diferencia entre ambos momentos de aplicación. Campañas 2009-10, 2010-11 y 2011-12.....27
- Figura 10** - Rendimiento en grano según la ubicación del fertilizante (voleo vs. línea) para las campañas 2009-10, 2010-11 y 2011-12. Letras diferentes dentro de la misma campaña indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ).....29
- Figura 11** - Incremento de P disponible en el suelo ( $\Delta P$  suelo  $\text{mg P kg}^{-1}$  suelo) en función de las dosis de P en las tres profundidades evaluadas (0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm). Sólo fueron graficadas las regresiones significativas. Cuadrados: campaña 2009-10 y rombos: campaña 2010-11.....31
- Figura 12** - Biomasa acumulada en V6 (ensayo 2009-10) y V8 (ensayo 2010-11) y sus respectivos contenidos de P disponible en el suelo de 0-5 cm.....34
- Figura 13** - Relación entre biomasa acumulada en V6 y V8 y P disponible ( $\text{mg P kg}^{-1}$  suelo) en el suelo de 0-5 cm de profundidad para los ensayos de las campañas 2009-10 y 2010-11.....35
- Figura 14** - Incremento de P disponible en el suelo ( $\Delta P$  suelo  $\text{mg P kg}^{-1}$  suelo) en función de las dosis de P en las tres profundidades evaluadas (0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm) al momento de cosecha. Sólo fueron graficadas las regresiones significativas. Cuadrados: campaña 2009-10 y rombos: campaña 2010-11.....37
- Figura 15** – Incremento de P absorbido ( $\Delta P$  absorbido) en función de la dosis en V6 y V8 para las campañas 2009/10 y 2010/11, respectivamente. La pendiente representa la ERP.....41
- Figura 16** - Relación entre  $\Delta P$  absorbido en MF vs. dosis. La pendiente representa la ERP.....44
- Figura 17** - Balance de P ( $\text{kg P ha}^{-1}$ ) vs dosis ( $\text{kg P ha}^{-1}$ ) para el cálculo de la dosis de mantenimiento. Campañas 2009/10 y 2010/11.....47

**Figura 18** - Relación entre el contenido de P disponible ( $\text{mg P kg}^{-1}$  suelo) en el suelo de 0-5 cm de profundidad con el Balance de P ( $\text{kg P ha}^{-1}$ ).....47

DESCRIPCIÓN DE ESTADOS FENOLÓGICOS DE MAÍZ  
MENCIONADOS EN ESTE TRABAJO. ESCALA DE  
Ritchie y Hanway, 1982

Ve: emergencia

V1: 1° hoja desarrollada

V2: 2° hoja desarrollada

V3: 3° hoja desarrollada

V4: 4° hoja desarrollada

V5: 5° hoja desarrollada

V6: 6° hoja desarrollada

Vn: n° de hoja desarrollada

Vt: panojamiento

R1: emergencia de estigmas

R2: cuaje (ampolla)

R3: grano lechoso

R4: grano pastoso

R5: grano dentado

R6: madurez fisiológica

## DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS QUÍMICOS

Al: aluminio

Fe: hierro

N: nitrógeno

P: fósforo

S: azufre

## DESCRIPCIÓN DE ABREVIATURAS

ANVA: Análisis de varianza

EA: Eficiencia agronómica

ERP: Eficiencia de recuperación del fósforo

Et: Evapotranspiración

EUP: Eficiencia en el uso del fósforo

HCl: Ácido clorhídrico

MF: madurez fisiológica del maíz

mg g<sup>-1</sup>: miligramos por gramo

mg kg<sup>-1</sup>: miligramo por kilogramo

MO: material orgánica

MS: material seca

*p*: Probabilidad de encontrar una observación fuera del área de rechazo de la hipótesis nula

Pp: precipitaciones

ppm: partes por millón (equivale a mg P kg<sup>-1</sup> suelo)

R1: floración femenina (emergencia de estigmas) del maíz

$R^2$ : coeficiente de determinación lineal

t: prueba t de student

V6: 6º hoja desarrollada del maíz

V8: 8º hoja desarrollada del maíz

$\alpha$ : probabilidad de cometer error de Tipo I: rechazar la hipótesis nula cuando esta es verdadera

$\Delta$ : Delta. Indica la variación entre un valor final e inicial.



## RESUMEN

Tradicionalmente el P es colocado en la línea de siembra, aunque las cantidades que pueden agregarse son relativamente bajas por razones operativas y riesgos de fitotoxicidad. Las aplicaciones al voleo podrían presentar una menor eficiencia, pero permiten agregar mayores dosis. Localmente existen experiencias que comparan aplicaciones en línea y anticipadas al voleo con una única dosis, pero no hay estudios que evalúen comparativamente las aplicaciones al voleo a la siembra y antes de la siembra con un rango de dosis. El tiempo prolongado de contacto entre el nutriente y el suelo incrementaría los procesos de fijación, aunque esto podría ser compensado por una mayor incorporación. Los objetivos de este trabajo fueron evaluar cambios del P disponible a inicios del ciclo del cultivo de maíz, las respuestas y eficiencias agronómicas y de recuperación del P para las distintas dosis, momentos y formas de aplicación de fertilizante fosforado. Para responder a los objetivos se realizaron tres ensayos de campo en Hapludoles del Partido de Junín y se evaluaron 9 tratamientos: del 0 a 8 corresponden a un factorial con cuatro dosis (10, 20, 30 y 40 kg P ha<sup>-1</sup>) aplicados al voleo y dos momentos (anticipado -90 días antes de la siembra del maíz- y al momento de la siembra), un testigo y un tratamiento con P en línea (con la dosis de 20 kg P ha<sup>-1</sup>). Se midieron: contenido de P disponible, biomasa aérea, contenido de P absorbido y rendimiento de maíz. Con la fertilización anticipada hubo una tendencia a menores contenidos de P de 0-5 cm a inicios del ciclo del cultivo, pero no se observaron diferencias en crecimiento de maíz en ningún estado fenológico. No se detectaron diferencias en rendimiento, sin embargo se observó una tendencia a respuestas superiores con las aplicaciones a la siembra sólo con las dosis más altas. Se registraron efectos de las dosis sobre la producción de biomasa aérea, el rendimiento en grano y el contenido de P disponible. Las eficiencias de recuperación (ERP) y eficiencias agronómicas (AE) no difirieron entre momentos de aplicación, sin embargo las EA fueron un 26% superiores con las aplicaciones a la siembra. Las ERP medias halladas, por el método de la diferencia, fueron de 6,5% con el cultivo en sexta hoja (V6) y 3,2% en madurez fisiológica (MF). No se detectaron diferencias según el método de ubicación del P.

*Palabras clave:* fertilización anticipada, fertilización a la siembra, P al voleo, P en línea, P disponible, biomasa, respuesta, rendimiento, maíz.

## ABSTRACT

Traditionally P is placed on the seed line, although the amounts that can be added are relatively low for operational reasons and risks of phytotoxicity. Broadcast applications may have a lower efficiency but allow adding higher doses. Locally there are experiences that compare in the furrow and broadcast early applications with a single dose, but no comparative studies evaluating broadcast applications at planting and before planting with a range of doses. The long contact time between the nutrient and soil fixation processes increase, although this could be offset by greater incorporation. The objectives of this study were to evaluate changes in P available at the beginning of the maize crop cycle, responses and agronomic and P recovery efficiencies for different doses, times and forms of phosphorus fertilizer application. To meet the objectives were established three field trials in Junín Hapludoll soils and 9 treatments were evaluated: the 0-8 correspond to a factorial with four doses (10, 20, 30 and 40 kg P ha<sup>-1</sup>) applied broadcast and two times (-90 days before maize anticipated sowing - and planting time), a control and a treatment with P in the furrow (with the dose of 20 kg P ha<sup>-1</sup>). Were measured: available P content, aboveground biomass, content of P uptake and yield of maize. With early fertilization was a trend to lower P contents of 0-5 cm at the beginning of the crop cycle, but there were no differences in maize growth at any growth stage. No yield differences were detected, however there was a trend to higher responses with only seeding applications with higher doses. Dose effects on biomass production, grain yield and content of available P were detected. The recovery efficiencies (ERP) and agronomic efficiency (AE) did not differ between time of application, however the EA were 26% higher with applications sowing. The ERP averages found by the method of difference, were 6.5% in sixth leaf crop (V6) and 3.2% at physiological maturity (MF). No differences were detected by the method of location of P.

*Keywords:* early fertilization, fertilization at planting, P broadcast, P in furrow, available P, biomass, response, yield, maize.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La llanura Pampeana está constituida en la mayor parte de su extensión por suelos correspondientes a los órdenes de los Molisoles, Alfisoles y Vertisoles (Scoppa, 1975) siendo los Molisoles los suelos dominantes al Oeste del río Paraná, en la llamada “Zona Núcleo”, que abarca la región comprendida por el Sudeste de Córdoba, Centro-Sur de Santa Fe, sudoeste de Entre Ríos y Norte de Buenos Aires. Sus suelos están entre los más fértiles de mundo (Hall et al., 1992), y las bondades edafoclimáticas la convierten en la principal productora de granos de la Argentina, fundamentalmente cereales y oleaginosas. El maíz, uno de los cultivos que mejor refleja la calidad ambiental, presenta la mayor parte de su superficie sembrada en esta región abarcando en la actualidad entre 2 y 2,5 millones de hectáreas (SAGPyA, 2010).

Además de las excepcionales condiciones naturales de estos suelos, existen otras causas de índole tecnológica que han motivado la siembra del cultivo de maíz en esta zona. En los `70 la masificación en el uso de híbridos motivó incrementos en la producción en las zonas típicamente maiceras de la pradera pampeana, asociado a los avances en maquinaria agrícola, mayor empleo de agroquímicos y mejoramiento de las prácticas agronómicas. En los `80 la continuidad de este proceso, los avances en siembra directa, mejorando la economía del agua, y el manejo poscosecha del grano marcan la misma tendencia. En los `90 la disponibilidad en el mercado de nuevos híbridos de mayor potencial de rendimiento, mejor resistencia a plagas y enfermedades, incrementos en el consumo de fertilizantes, avances de la siembra directa, recambio del parque de cosechadoras y el uso de semillas transgénicas a partir de la campaña 1998/99 han terminado por plasmar el extraordinario crecimiento de los rendimientos del cultivo en esta región (ILSI Argentina, 2006).

Todo lo antes dicho explica por qué la producción argentina de maíz, que a comienzos de la década del `90 totalizaba 8 millones de toneladas anuales ha experimentado un sostenido crecimiento llegando a niveles récords de 24,8 millones de toneladas en la campaña 2.012/13 y niveles estimados de 28 millones de toneladas en la campaña 2013/14 con un rendimiento medio nacional récord histórico de 8,64 toneladas por hectárea para la campaña 2.009/10 (Bolsa de Cereales, 2013).

No sólo el cultivo de maíz experimentó un gran crecimiento en sus niveles de rendimiento y producción sino que este escenario se repitió para el resto de los principales cultivos de la región: soja, trigo y en menor medida girasol. En dos décadas hubo un aumento del área sembrada de 15.400.000 hectáreas en 1988/89 a 31.100.000 hectáreas en la 2006/07 a nivel nacional, mientras que la producción en el mismo período se ha triplicado (Cruzate y Casas, 2009); como consecuencia de ello se produjo una elevada extracción de nutrientes los cuales no fueron repuestos en igual magnitud generando una paulatina disminución de la fertilidad química del suelo. Cruzate y Casas realizaron para la campaña 2006/07 un balance de nutrientes para los cuatro cultivos principales a nivel nacional, concluyendo que sólo fue repuesto el 61% del fósforo (P) extraído. Caparelli (2008) informó valores de reposición del 62% para el mismo

nutriente; mientras que Ciampitti y García (2008) reportaron valores menores (53%) para P en el mismo período.

Este balance negativo de fósforo del suelo ha conducido a que actualmente muchos suelos ubicados al Este de la Región Pampeana, en las provincias de Santa Fe y Buenos Aires, los contenidos de P disponible (Bray I) se encuentren por debajo de  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  (Vázquez et al., 1991; Montoya et al., 1999; García, 2001; Vázquez, 2002), aunque están por encima de este valor hacia el Oeste (Córdoba y La Pampa). Estos resultados coinciden con los reportados por un reciente trabajo de Sainz Rozas y Echeverría (2008), quienes hallaron que de un total de 34.447 muestras de suelo de la Región Pampeana y Extrapampeana, el 50% de las muestras extraídas de las provincias de Buenos Aires, La Pampa, Entre Ríos y Corrientes presentaron concentraciones de P menores a  $14 \text{ mg kg}^{-1}$ . En la Región Pampeana Central (Centro – norte de Buenos Aires, Centro – sur de Santa Fe y sudeste de Córdoba y sudoeste de Entre Ríos) distintos estudios han determinados valores críticos de P para maíz, cuantificando el P disponible en el suelo por el método de Bray I (Bray y Kurtz, 1945). García et al. (2006) obtuvo niveles críticos de P de 15-16 ppm para la región en cuestión, mientras que Ferrari et al. (2000) estableció valores en 13,5 ppm. Estos valores de referencia son una clara evidencia de la necesidad de fertilización fosforada del cultivo de maíz en la región, una práctica que se ha convertido en habitual para el productor. Capareli (2008) y Oliverio y López (2008) indicaron que en la campaña 2006/07 el 75% de los productores maiceros de todo el país fertilizaron con N y P. Probablemente este porcentaje sea mayor en la Región Pampeana, debido a que en ella se registran los mayores niveles de adopción tecnológica.

El uso eficiente de los fertilizantes se encuentra enmarcado dentro del concepto de las “Mejores Prácticas de Manejo” (MPM) para la fertilización que fueron delineadas por Roberts (2007) como: la aplicación del nutriente correcto en la cantidad necesaria y en el momento y localización apropiados para satisfacer la demanda del cultivo. Siguiendo este concepto Ferrari (2009) sugirió que la fertilización fosforada del cultivo de maíz se realice en un proceso de dos etapas. En la primera se definen las dosis de P a aplicar, las cuales son determinadas de acuerdo al seguimiento de uno de los dos criterios: criterio de suficiencia o criterio de construcción y mantenimiento. En la segunda etapa se selecciona la tecnología de aplicación del fertilizante: su ubicación y momento de aplicación, aspectos en los cuales centraremos el presente estudio.

La difusión de la siembra directa para la producción de cultivos de granos en la región pampeana, ha reavivado el interés en los estudios referentes a la tecnología de la aplicación de P (momento, ubicación). El bajo contenido de P de los suelos, su escasa movilidad y su capacidad de fijación (según las características del suelo) determinan a menudo diferencias en la eficiencia de la fertilización en la línea y en cobertura total. Mallarino (1997) y Fariña Nuñez (1997) sugirieron que la respuesta a la fertilización en bandas probablemente es superior a la aplicación al voleo cuando los suelos son muy deficientes en P o presentan alta capacidad de fijación; sin embargo, a medida que el nivel de P del suelo aumenta, las diferencias entre aplicarlo al voleo o en bandas disminuyen o son nulas (Mallarino 1997; Darwich, 1998).

Similares resultados obtuvieron Bono y Barraco (2005), quienes trabajando en una red de ensayos de maíz en el Oeste bonaerense hallaron que en suelos con niveles bajos de P asimilable (menores a  $13 \text{ mg kg}^{-1}$ ) las mejores aplicaciones de P fueron en la línea de siembra comparando aplicaciones de P (con y sin N) al voleo anticipado y en la

línea de siembra. Mientras que en un ensayo análogo realizados por los mismos investigadores al Noroeste de la provincia en suelos con niveles mayores de P en el suelo ( $16,9 \text{ mg kg}^{-1}$ ) también se detectaron respuestas significativas por la fertilización, pero no entre distintas tecnologías (voleo 30 días anticipado a la siembra, voleo a la siembra y en línea). Ferrari (2009) en un ensayo de maíz realizado en Rojas (provincia de Buenos Aires) en un suelo con  $5,3 \text{ mg kg}^{-1}$  de P empleando dosis crecientes de P (0, 12, 24 y  $36 \text{ kg ha}^{-1}$  de Superfosfato Triple) aplicado al voleo 9 días antes de la siembra y una dosis de  $24 \text{ kg ha}^{-1}$  del mismo fertilizante aplicado en la línea de siembra, halló respuesta significativa al agregado de P pero no por la ubicación del fertilizante, concluyendo que la aplicación de P al voleo antes de la implantación en suelos manejados con siembra directa constituye una “localización apropiada” particularmente cuando se aplican dosis elevadas como las utilizadas cuando se fertiliza con un criterio de construcción y mantenimiento.

Mallarino (1998), comparando aplicaciones de P en bandas profundas, bandas con la sembradora y voleo, observó que las aplicaciones bandeadas estimularon el crecimiento inicial del maíz más que las aplicaciones al voleo. El autor sugiere que este comportamiento es de esperar en suelos deficientes en P, sin embargo observó un comportamiento similar en suelos con altos niveles de P donde no hubo respuesta en rendimiento a ninguno de los métodos de aplicación. Este efecto “starter” por la ubicación del fertilizante fosforado en la línea de siembra que genera una estimulación adicional del crecimiento inicial es comúnmente observado por los productores, sin embargo existe poca experiencia local que tenga cuantificada estas diferencias en el crecimiento inicial y que hayan evaluado si las mismas se mantienen o se diluyen durante el ciclo del cultivo y, además, si se traducen o no en respuestas de rendimiento.

Las aplicaciones fosforadas al voleo usualmente se realizan al momento de la siembra o en períodos de tiempo variables previos a la siembra, existiendo resultados divergentes en cuanto a la eficacia de esta práctica. Según Mallarino (1998), es probable que la fertilización con anterioridad a la siembra sea más eficiente porque hay más tiempo para que el P llegue a incorporarse (por medio de lluvias, fauna, grietas, etc.) en los primeros centímetros del suelo. Una reciente revisión acerca de la “Fertilización Fosforada en la Argentina” realizada por García et al. (2009) sugiere que las aplicaciones anticipadas en cobertura bajo siembra directa han demostrado ser tan eficientes como las aplicaciones en la línea de siembra bajo condiciones de suelos no fijadores de P; niveles de P Bray mayor a  $8-10 \text{ mg kg}^{-1}$ , dosis mayores de  $20-25 \text{ kg ha}^{-1}$  de P; tiempo biológico (temperatura y humedad) mayores a 60 días; lluvias post-aplicación mayores a 50 mm y niveles de cobertura de residuos no excesivos.

En general, se cree que la aplicación anticipada no incrementa los procesos de fijación por un mayor tiempo de contacto entre el P aplicado anticipadamente y las partículas del suelo, ya que la localización superficial en siembra directa minimiza el contacto del nutriente con los coloides del suelo. Además, bajo este sistema de labranza se incrementa el contenido de materia orgánica en las capas más superficiales del suelo y existe evidencia que demuestra reducciones en la capacidad de sorción del P por efectos de los ácidos húmicos, fúlvicos y orgánicos, los cuales compiten con el P por los sitios de sorción (Pavinato y Rosolem, 2008), aunque otros trabajos apuntan a que la reducción de la capacidad buffer de los suelos manejados con siembra directa no deben ser atribuidos a la acumulación superficial de materia orgánica, sino al enriquecimiento de P en los primeros centímetros del suelo (Gutiérrez Boem et al., 2008).

Las aplicaciones en cobertura anticipada de P en sistemas de siembra directa podrían ofrecer diversas ventajas respecto a las tradicionales formas de aplicación: 1) eficiencias de uso similares a las aplicaciones en la línea de siembra; 2) evitaría crear problemas de variabilidad espacial en la disponibilidad de P asociados a la fertilización con altas dosis en bandas (Kitchen et al., 1990); 3) reducción de posibles efectos de fitotoxicidad por aplicación de dosis elevadas en la línea de siembra; 4) reducción de los tiempos operativos involucrados en la siembra; 5) empleo de la mano de obra ociosa en los meses previos a la siembra gruesa; 6) beneficio económico por la compra del fertilizante en momentos de menor demanda.

Otros investigadores han realizado estudios con aplicaciones de P anticipadas a la siembra en cobertura total.

Bordolli y Mallarino (1998) no hallaron diferencias en rendimiento del cultivo de maíz con aplicaciones de P al voleo aplicado entre 3 y 5 semanas antes de la siembra y el P aplicado en bandas (en la línea de la sembradora y en bandas profundas), pero si encontraron respuestas por el agregado de P.

Barbieri et al., (2006) evaluó la combinación de dosis de P (0, 25 y 50 kg ha<sup>-1</sup>) y métodos de aplicación: al voleo dos meses antes de la siembra y en la línea en el cultivo de maíz en un Paleudol petrocálcico del sudeste bonaerense con un nivel inicial promedio de P del suelo de 11 mg kg<sup>-1</sup>. Los resultados arrojaron ausencia de diferencias significativas en rendimiento por el método de colocación del P para ambas dosis y atribuyeron esto a la baja capacidad de fijación debido al reducido contenido de arcillas de tipo 1:1, bajo contenido de Al intercambiable y de óxidos de Fe y Al de esos suelos.

En suelos de la provincia de Entre Ríos, Barbagelata y Melchiori (2008) evaluaron una red de 19 ensayos de trigo con distintas dosis de P (12, 24 y 36 kg ha<sup>-1</sup>) aplicado al voleo en forma anticipada (en períodos entre 17 y 70 días antes de la siembra) y 24 kg ha<sup>-1</sup> aplicados en la línea al momento de la siembra. Sólo en tres sitios hubo diferencias debidas a la forma de aplicación de P, en dos de ellos (con niveles iniciales de P de 8,6 y 5 mg kg<sup>-1</sup>) a favor de la aplicación al voleo anticipado. El mejor comportamiento del P aplicado anticipadamente respecto a la línea de siembra fue atribuido a posibles efectos fitotóxicos causados por las dosis de fertilizante. Es interesante observar que a pesar de las texturas más finas de estos suelos, probablemente no se hayan registrado procesos importantes de fijación del P por la aplicación anticipada.

Bono y Barraco (2005) hallaron diferencias en el rendimiento de maíz a favor de aplicaciones de P (100 kg ha<sup>-1</sup> de Superfosfato Triple) al voleo anticipado 90 días sin limitantes de N, respecto a aplicaciones en la línea de siembra en un Hapludol Típico del partido de Daireaux (provincia de Buenos Aires), aunque atribuyeron que este comportamiento podría deberse a los niveles de medios a altos de P de estos suelos (37,44 mg kg<sup>-1</sup>). Los mismos investigadores realizaron un estudio similar en Hapludoles Típicos y Enticos de General Villegas y América, respectivamente. Los tratamientos evaluados en esa oportunidad fueron la aplicación de 100 kg ha<sup>-1</sup> de Fosfato Monoamónico a los 90, 60 y 30 días antes y el día de la siembra al voleo y en la línea. En esa experiencia encontraron, sin embargo, que los mayores rendimientos fueron con las aplicaciones incorporadas en la línea de siembra, al voleo al momento de la siembra o con 30 días de anticipación, atribuyendo este comportamiento a los bajos niveles de P del suelo (menores de 13 ppm), que provocaron deficiencias severas del nutriente.

Trabajos realizados por Bianchini (2003) han demostrado que bajo las condiciones edafoclimáticas de la región pampeana argentina, las aplicaciones de fertilizantes fosfatados solubles en cobertura total anticipada resultan en respuestas del cultivo de trigo similares a las aplicaciones en banda al momento de la siembra, aún en suelos con baja disponibilidad de P extractable.

En un reciente trabajo de Calderaro y Gutiérrez Boem (2009) se halló una respuesta significativamente superior en rendimiento de maíz por la aplicación al voleo anticipado 60 días de la siembra de  $34,4 \text{ kg ha}^{-1}$  de P respecto a similares dosis aplicadas al voleo al momento de la siembra y en la línea en un Argiudol típico de Carmen de Areco (provincia de Buenos Aires) con  $9,5 \text{ mg kg}^{-1}$  de P. Los autores sugieren que esto podría atribuirse a una mayor disponibilidad del P aplicado anticipadamente por una mejor incorporación del nutriente en los primeros centímetros del suelo debido a las particulares condiciones hídricas de esa campaña.

Una reciente red de ensayos en maíz y soja conducida durante 2005 al 2007 en Iowa por Mallarino et al. (2009) evaluaron diferentes dosis de P en cobertura aplicados en dos momentos: durante el barbecho y en primavera, argumentando que las aplicaciones anticipadas a la siembra permitirían una mayor disolución de los gránulos del fertilizante favoreciendo el movimiento del P debajo de las capas de residuos, gracias a los procesos de congelamiento y deshielo del suelo, y al agua procedente de nevadas y lluvias. De los resultados se concluyó que el momento de aplicación no afectó la eficiencia de la aplicación de P al voleo en maíz y soja en siembra directa especulando que la carencia de diferencias por el momento de aplicación fueron atribuidas a lluvias suficientes durante la primavera y principios del verano.

Del análisis de la información anterior se puede decir que la experiencia desarrollada hasta el momento presenta poca consistencia en cuanto a los resultados obtenidos. Otras de las carencias de las experiencias existentes es que en muchos casos sólo se realizaron evaluaciones comparativas entre las aplicaciones en cobertura total anticipadas y en la línea al momento de la siembra pero no evaluaron aplicaciones en cobertura a la siembra. Por lo tanto, en el caso de observar diferencias, no se puede establecer si éstas ocurrieron por el distinto momento de aplicación (anticipado vs. siembra) o por la distinta ubicación (voleo vs. banda). Otro problema que tienen varios de estos experimentos es el uso de una sola dosis de P (en general alta) común a varios momentos de aplicación. Se sabe que la respuesta (aumento del rendimiento) y la eficiencia agronómica de la fertilización no es independiente de la dosis, con lo cual diferencias de respuesta entre dos formas de aplicación con dosis bajas, bien pueden no existir con dosis más altas. Por otro lado, en la bibliografía se encuentra una gran variabilidad en cuanto al período de anticipación de las aplicaciones y en la mayoría de los casos ese período es relativamente breve (en pocas oportunidades llega a los 90 días de anticipación). Por último, en la bibliografía consultada al respecto sólo se han realizado evaluaciones del rendimiento del cultivo, pero no se ha estudiado que sucede con la disponibilidad del P aplicado anticipadamente en los momentos de elevada demanda del cultivo, cuanto de ese P es realmente absorbido y cuanta biomasa es generada.

A partir de los interrogantes no respondidos a partir de las experiencias consultadas en la bibliografía, y a causa de los múltiples beneficios que originaría la fertilización en cobertura total “al voleo”, se desprende la necesidad de realizar nuevas

investigaciones tendientes a generar información acerca de los puntos mencionados anteriormente y que todavía no han sido abordados. Es importante destacar la conveniencia de desarrollar estos trabajos en suelos Hapludoles, debido a que por su tipo de textura esta práctica se presentaría como más promisoría.

## 1. OBJETIVOS

- 1) Evaluar los cambios en el P disponible del suelo desde el inicio del ciclo del cultivo de maíz, producto de las dosis de fertilizante fosforado y los dos momentos estudiados (aplicación anticipada y a la siembra), con la misma ubicación (al voleo).
- 2) Evaluar la respuesta (crecimiento inicial y final del cultivo, rendimiento, P absorbido) a las distintas dosis de P aplicadas al voleo a la siembra y presiembra anticipada.
- 3) Evaluar la eficiencia de recuperación aparente del P aplicado ( $\text{kg P absorbido (fertilizado-testigo) / kg P aplicado}$ ), y la eficiencia en el uso del P ( $\text{(Rendimiento fertilizado-Rendimiento testigo) / kg P aplicado}$ ) del cultivo de maíz.
- 4) Evaluar la respuesta del cultivo a las diferentes formas de aplicación del fertilizante fosforado (voleo vs. línea).

## 2. HIPOTESIS

Las hipótesis de trabajo de este estudio son que la fertilización anticipada no va a provocar una disminución en la recuperación del fósforo agregado por mayor fijación (debido al mayor tiempo de contacto del P agregado con el suelo) porque los suelos de la región tienen baja capacidad de fijación de P (Hipótesis 1). Por el contrario, se espera que la aplicación anticipada genere una mayor disponibilidad de P al comienzo del ciclo del cultivo que las aplicaciones a la siembra (ambas al voleo sin incorporación) por el mayor tiempo disponible para que el P aplicado ingrese al suelo (Hipótesis 2). Esta mayor disponibilidad inicial provocará un mayor crecimiento inicial (similar a lo observado en aplicaciones en bandas incorporadas cerca de la semilla a la siembra), lo cual no necesariamente implica un mayor rendimiento y recuperación de P agregado (Hipótesis 3).



## CAPÍTULO II

### MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron tres experimentos de campo (uno por año) en el cultivo de maíz, los cuales fueron iniciados en la campaña 2009-10 y finalizados en la 2011-12, a fin de abarcar una mayor variabilidad climática.

El primer experimento (campaña 2009-10) se realizó sobre un suelo Hapludol Típico, Serie Lincoln ubicado en el Partido de General Viamonte (Buenos Aires) (latitud 34° 47' 45,69''S, longitud 60° 58' 23,22''O), en tanto que los otros dos experimentos (campañas 2010-11 y 2011-12) fueron realizados sobre Hapludoles Típicos, Serie Junín del Partido de Junín (Buenos Aires) (latitud 34° 38' 54,95''S, longitud 60° 55' 0,88'' O). En la Tabla 1 se presentan los datos analíticos (físicos y químicos) del horizonte superficial de las Series de suelo y su clasificación taxonómica. Los datos analíticos químicos corresponden a los resultados obtenidos de las muestras extraídas de los sitios experimentales previo a la instalación de los experimentos.

<b>Tabla 1-</b> Datos analíticos (físicos y químicos) del horizonte superficial de las Series de suelo y su clasificación taxonómica.			
Serie de suelo	Lincoln	Junín	Junín
Clasificación taxonómica	Hapludol típico	Hapludol típico	Hapludol típico
Textura (0-20 cm)	franco arenoso	franco arenoso	franco arenoso
Arcilla (%)	12	15,2	15,2
Limo (%)	24,4	26,3	26,3
Arena (%)	63,6	58,5	58,5
pH (0-20 cm)	5,6	6,2	6
MO (0-20 cm) (%)	2,75	2,22	1,68
N-NO <sub>3</sub> (0-20 cm) (mg kg <sup>-1</sup> )	9	14	5,5
S-SO <sub>4</sub> (0-20 cm) (mg kg <sup>-1</sup> )	2	5	
P (0-20 cm) (mg kg-1)	6,8	7,3	7,1
P (0-5 cm) (mg Kg-1)	8,1	8,1	10,8
P (5-10 cm) (mg Kg-1)	6,1	4,9	6,2
P (10-20 cm) (mg Kg-1)	5,3	3,7	5,3

En la campaña 2009-10 el híbrido de maíz utilizado fue Syngenta NK 900 sembrado el 14 de septiembre con una distancia entre hileras de 52,5 cm, en el ensayo 2010-11 el híbrido fue Dekalb DK 670 MGRR2 sembrado el 7 de octubre a 70 cm entre hileras y en la campaña 2011-12 se utilizó el híbrido Dekalb 747 MGRR2 sembrado el 27 de septiembre también a 70 cm entre hileras. Los cultivos fueron sembrados en siembra directa y los sitios experimentales al momento de los experimentos se hallaban bajo manejo de siembra directa ya estabilizada (cinco años o más).

Los experimentos tuvieron 10 tratamientos, 9 de los cuales correspondieron a un factorial con dos factores (cuatro dosis de P aplicadas al voleo y dos momentos de aplicación) más un testigo sin fertilizar. Además, se agregó un tratamiento con una dosis de P aplicada en bandas incorporado a la siembra (la ubicación y momento habitual que realizan los productores). La fuente de P utilizada en todos los experimentos fue Superfosfato triple de calcio (0-46-0).

Tratamiento	Dosis (kg P ha <sup>-1</sup> )	Ubicación	Momento de aplicación
0	0		
1	10	voleo	90 días antes de la siembra
2	20		
3	30		
4	40		
5	10		siembra
6	20		
7	30		
8	40		
9	20	línea	siembra

Los experimentos tuvieron un diseño en bloques completos aleatorizados con cuatro repeticiones. El tamaño de cada parcela fue del ancho de la sembradora (5,25 m de ancho para el primer ensayo y 7,7 m para el segundo y tercer ensayo) y una longitud de 15 m.

Los cultivos fueron conducidos bajo un planteo de alta tecnología, sin limitantes nutricionales de nitrógeno (N) ni azufre (S). Al momento de la siembra se fertilizó el cultivo con una dosis de 150 kg ha<sup>-1</sup> de N (360 kg ha<sup>-1</sup> de urea) y 15 kg ha<sup>-1</sup> de S (83 kg ha<sup>-1</sup> de CaSO<sub>4</sub>), ambos aplicados en forma de cobertura total. Los cultivos fueron mantenidos libres de plagas y malezas hasta el momento de cosecha.

A fin de poner a prueba las Hipótesis planteadas a lo largo del ciclo del cultivo se realizaron distintas evaluaciones a campo y en laboratorio, tanto con material vegetal como de suelo.

A los 90 días antes de la siembra del maíz, se tomaron muestras compuestas (20 submuestras) de los cuatro bloques de 0 a 20 cm de profundidad a fin de caracterizar los suelos. En las mismas se midieron el contenido de carbono orgánico (Walkley y Black, 1934), pH (relación Suelo/Agua: 1:2,5) (Jackson, 1982), N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> -Acido fenoldisulfónico- (Jackson, 1982), S-SO<sub>4</sub> (Turbidimétrico) y el contenido de P extractable -Bray 1- (Bray and Kurtz, 1945) estratificado en tres profundidades: 0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm.

Al momento de la siembra del maíz, se midieron los contenidos de humedad del suelo por el método gravimétrico hasta el metro de profundidad a fin determinar el almacenaje de agua y elaborar los balances hídricos.

Con el cultivo en V6-V8 (seis a ocho hojas expandidas), con el objetivo de determinar diferencias en la disponibilidad de P por aplicaciones anticipadas, se midieron los contenidos de P extractable (Bray 1) en muestras extraídas a 0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm de profundidad. El contenido de P extractable se midió en muestras compuestas (constituidas por 10 submuestras) de cada parcela. Se determinó la biomasa aérea a través de la recolección de plantas en una superficie de 1m<sup>2</sup> por parcela, las cuales fueron secadas en estufa de circulación forzada a 60°C hasta peso constante y pesadas. En las muestras de biomasa aérea se determinó la concentración de P. Para ello las muestras fueron molidas y calcinadas en mufla a 500°C durante toda la noche. Las cenizas fueron disueltas con una solución de HCl 0.1 M, y se determinó la concentración de P realizando una colorimetría (Murphy y Riley, 1962).

Con el cultivo en R1 (floración femenina/emisión de estigmas), se midió la biomasa aérea acumulada, del mismo modo que en V6.

Con el cultivo en Madurez Fisiológica, se determinó el rendimiento de una superficie de 2m<sup>2</sup>. La cosecha de las espigas se realizó en forma manual y la trilla de las mismas se realizó con una máquina trilladora estacionaria. Sobre las muestras húmedas se midió el contenido de humedad con un equipo Delver y se hicieron las correcciones de peso correspondientes. Se midió la biomasa aérea en 1m lineal de surco por parcela, las muestras fueron secadas en estufa de circulación forzada a 60°C hasta peso constante. En las muestras se midió la concentración de P absorbido del mismo modo que fue explicado antes, discriminando entre grano y rastrojo. Se midió el contenido de P extractable (Bray 1) en muestras extraídas a 0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm de profundidad. Las mediciones se realizaron en muestras compuestas (constituidas por 10 submuestras) de cada parcela. Las mediciones del contenido de P absorbido en V6 y MF y los contenidos de P en el suelo medidos en esos mismos estadios, sólo fueron realizados en los ensayos de las campañas 2009-10 y 2010-11.

Se tomaron registros diarios de precipitaciones desde el momento de la 1ª aplicación del fertilizante.

El cálculo de la eficiencia en el uso del P (EUP) se realizó del siguiente modo:

$$\text{EUP} = (\text{Rendimiento fertilizado} - \text{Rendimiento testigo}) / \text{Dosis de P}$$

El cálculo de la eficiencia aparente de recuperación del P (ERP) se realizó del siguiente modo:

$$\text{ERP} = (\text{kg P absorbido fertilizado} - \text{kg P absorbido testigo}) / \text{kg P aplicado}$$

Se calculó la respuesta del cultivo a la aplicación de P como la diferencia entre los tratamientos fertilizados y del testigo en la variable de interés (e.g. biomasa aérea, rendimiento).

Los datos recolectados se analizaron mediante ANVA y contrastes para determinar efectos del momento de aplicación, dosis, su interacción y efecto de la ubicación del fertilizante. Para comparar momentos de aplicación se compararon modelos (regresiones lineales y no lineales) ajustados a la relación respuesta vs. dosis. Para eso se ajustaron dos modelos: uno con una línea para cada momento y otro con una línea común a ambos momentos. La comparación se realizó testeando si el aumento del error por ajustar una línea en vez de dos fue significativo mediante un test de *F*. Si el

valor  $p$  fue mayor que 0.05 indicó que el momento de aplicación no afectó significativamente la relación respuesta vs. dosis, por lo que ésta se pudo representar con una sola línea común a ambos momentos. Se utilizó el programa Statistix para realizar el ANVA y los contrastes, y Tablecurve para ajustar funciones a la relación respuesta vs. dosis.

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 1. Condiciones agroclimáticas durante el desarrollo de los experimentos

Las condiciones climáticas no fueron las mismas en las tres campañas en las que se realizaron los experimentos.

En la Tabla 2 se presenta la evolución de las precipitaciones durante el período previo a la siembra y durante el ciclo del cultivo de maíz para las tres campañas evaluadas.

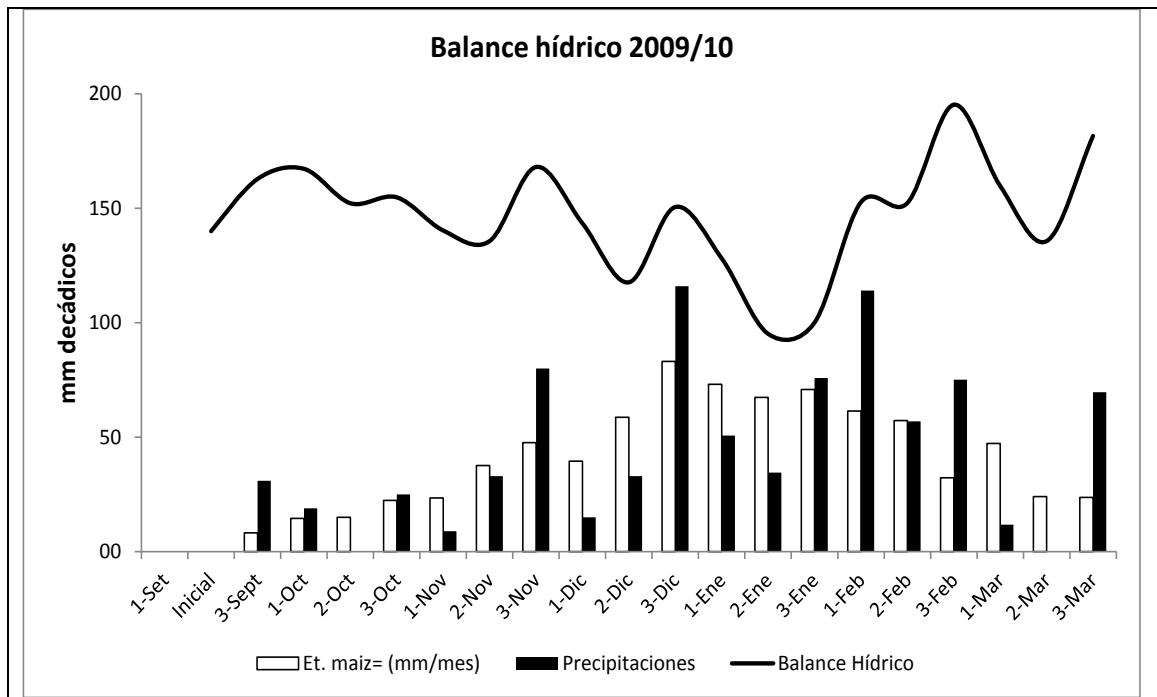
<b>Tabla 2</b> – Precipitaciones mensuales (mm) desde junio hasta marzo para las campañas 2009-10; 2010-11 y 2011-12.										
Campaña	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.
2009-10	8	56	13	120	44	122	164	161	246,2	81,5
2010-11	41,4	38,9	2,3	99,7	62,8	8,2	49,4	198,2	122,4	87,1
2011-12	31,3	29	10,4	45,3	99,6	132	1,1	188,3	231,6	124
Promedio histórico	37,7	35,1	29,2	53,2	103,4	100,2	93,4	129,9	110,9	132,4
Los valores históricos corresponden a datos oficiales del Aeródromo de Junín (Bs As) durante el período 1942-2011. Los datos mensuales para la campaña 2009-2010 corresponden a registros pluviométricos de un establecimiento vecino de la localidad de Baigorrita, en tanto que para las campañas 2010-11 y 2011-12 corresponden al Aeródromo de Junín.										

La Tabla 3 muestra las precipitaciones durante el desarrollo de los experimentos (desde los 90 días antes de la siembra –momento en el cual se realizó la aplicación anticipada del P- hasta el momento de la cosecha).

<b>Tabla 3</b> – Precipitaciones (mm) durante el período de 90 días antes de la siembra y durante el ciclo del cultivo de maíz para las campañas 2009-10; 2010-11 y 2011-12.			
Campaña	Pp 90 días antes siembra	Pp ciclo cultivo	Pp Totales
2009-10	161	768,2	929,2
2010-11	143	438,9	518,9
2011-12	70,2	791,1	861,3

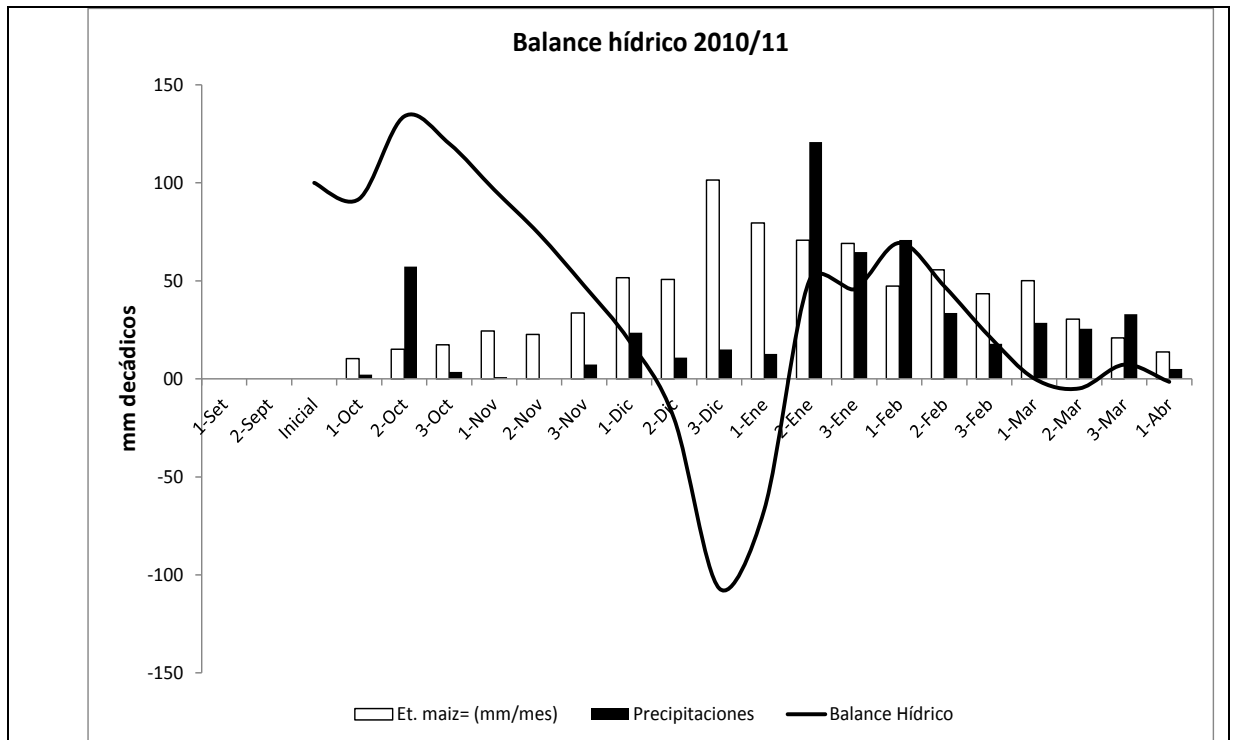
La campaña 2009-10 fue muy favorable climáticamente para el desarrollo de los cultivos. Durante los meses de octubre y noviembre las precipitaciones fueron suficientes para permitir un buen desarrollo inicial. En diciembre, enero y febrero las precipitaciones fueron abundantes y superiores a los registros históricos (Tabla 2) con lo cual los cultivos no sufrieron déficits hídricos durante el período crítico ni durante el

llenado de granos. Los balances hídricos no mostraron déficits en ningún momento del ciclo (Tabla 1 del anexo y Figura 1).



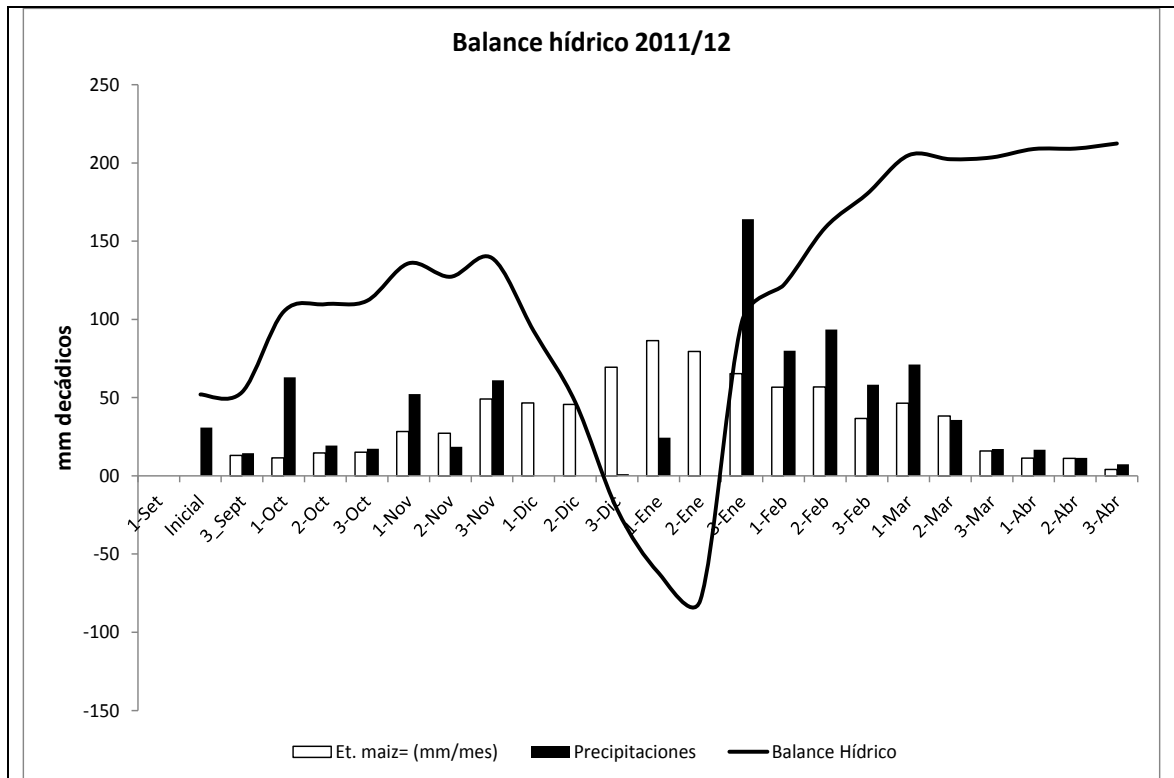
**Figura 1** –Balance hídrico para la Campaña 2009-10. Los valores 1, 2 y 3 en el eje horizontal indican el primer, segundo y tercer período decádico de cada mes. Los datos de precipitaciones fueron obtenidos de los registros de un establecimiento vecino y los datos de Evapotranspiración de maíz (Et.maíz) fueron calculados a partir de los datos de Evapotranspiración tomados por la EEA Pergamino.

La campaña 2010-11 se caracterizó por presentar los meses de noviembre y diciembre muy secos que totalizaron 57,6 mm, un registro pluviométrico muy por debajo del histórico registrado para ese mismo período (193,6 mm). Las escasas precipitaciones ocurridas en esos meses causaron un paulatino agotamiento de la humedad del suelo generando un estrés a los cultivos que atravesaban períodos avanzados de desarrollo y severos déficits hídricos durante diciembre y enero (Tabla 2 del anexo y Figura 2) cuando se encontraban transcurriendo los inicios de su período crítico. Sin embargo, la restitución de las precipitaciones a partir de mediados de enero permitieron una recomposición del estado de los cultivos y en el Partido de Junín se lograron niveles de rendimiento de maíz muy aceptables, que fue atribuido a que ocurrió cierta compensación en el peso de los granos.



**Figura 2** –Balance hídrico para la Campaña 2010-11. Los valores 1, 2 y 3 en el eje horizontal indican el primer, segundo y tercer período decádico de cada mes. Los datos de precipitaciones fueron obtenidos del Servicio Meteorológico (Aeródromo Junín) y los datos de Evapotranspiración de maíz (Et.maíz) fueron calculados a partir de los datos de Evapotranspiración tomados por la EEA Pergamino.

La campaña 2011-12 se inició con una disponibilidad de agua al momento de la siembra un poco inferior respecto a las campañas anteriores, sin embargo se produjo una muy buena recarga de los perfiles durante noviembre. El mes de diciembre se caracterizó por la ausencia total de precipitaciones (Tabla 2), lo cual sumado a la elevada demanda atmosférica en ese momento (Tabla 3 del anexo) ocasionó severos déficits hídricos en el cultivo de maíz que se encontraba transcurriendo su período crítico desde fines de diciembre hasta mediados de enero (Tabla 3 del anexo y Figura 3). A partir de mediados de ese mes se restablecieron las lluvias, permitiendo una recuperación parcial del cultivo.



**Figura 3** –Balance hídrico para la Campaña 2011-12. Los valores 1, 2 y 3 en el eje horizontal indican el primer, segundo y tercer período decádico de cada mes. Los datos de precipitaciones fueron obtenidos del Servicio Meteorológico (Aeródromo Junín) y los datos de Evapotranspiración de maíz (Et.maíz) fueron calculados a partir de los datos de Evapotranspiración tomados por la EEA Pergamino.

## 2. Biomasa acumulada en distintos estados fenológicos

### 2.1. Crecimiento temprano del cultivo (V6-V8)

La Tabla 4 muestra la acumulación temprana (V6-V8) de biomasa aérea en los ensayos de 2009/10 y 2010/11. Los valores de biomasa aérea de la campaña 2010/11 fueron mayores que la campaña anterior debido a que el muestreo de biomasa se realizó con el cultivo en un estadio fenológico más avanzado (V8).

El agregado de dosis crecientes de P produjo aumentos significativos en la biomasa acumulada en ambos sitios y no se detectó interacción entre las dosis y el momento de aplicación (Tabla 5). Las dosis empleadas presentaron un efecto lineal y cuadrático en un sitio (2009/10), y sólo lineal en el otro sitio (2010/11) (Tabla 5). El aumento máximo de biomasa aérea por el agregado de P fue de 560 kg ha<sup>-1</sup> (48%) en un sitio (2009/10), y de 970 kg ha<sup>-1</sup> (39%) en el otro (2010/11) (Figura 4).



**Tabla 4** – Crecimiento temprano del cultivo. Biomasa aérea ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en V6 (2009-10) y V8 (2010-11)

		Momento y Ubicación del fertilizante		
		Voleo		Línea
Campaña	Dosis ( $\text{kg P ha}^{-1}$ )	Anticipado	Siembra	Siembra
2009-10	0	1.125		
	10	1.200	1.400	
	20	1.450	1.512	1.775
	30	1.700	1.675	
	40	1.637	1.587	
2010-11	0	3.028		
	10	2.916	3.192	
	20	2.958	3.464	3.845
	30	3.488	3.241	
	40	3.791	4.209	

**Tabla 5** – ANVA de crecimiento temprano del cultivo (biomasa aérea acumulada en V6 en 2009/10 y V8 en 2010/11).

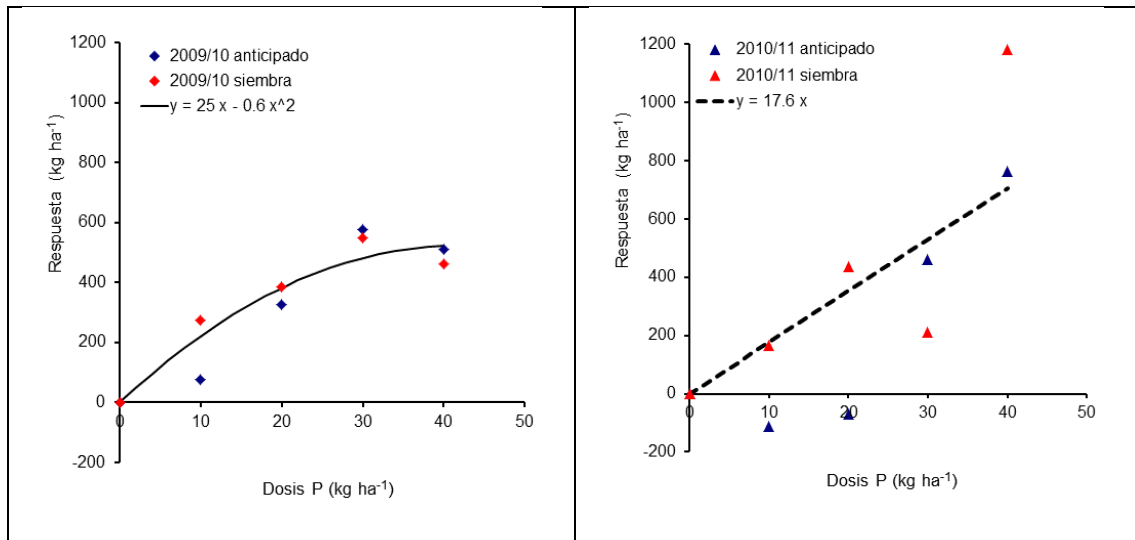
	Campaña 2009-10 Valor <i>p</i>	Campaña 2010-11 Valor <i>p</i>
Momento (anticipado vs. siembra)	0,41	0,08
Dosis		
Lineal	< 0,01	< 0,01
Cuadrático	0,03	0,08
Lack of fit	0,23	0,42
Dosis x Momento	0,24	0,69
Ubicación (voleo vs. línea)	0,02	0,16

No fueron detectadas diferencias significativas en el crecimiento inicial debido al momento de fertilización (Tabla 5). La biomasa acumulada fue en promedio sólo un 6% superior con las aplicaciones a la siembra comparado con las aplicaciones anticipadas. Esto sugiere que la anticipación en la aplicación del P no generó una mayor disponibilidad de P al comienzo del ciclo del cultivo que provocara un mayor crecimiento inicial. Mallarino et al., (2009), trabajando en una red de ensayos en diferentes sitios y con un amplio rango de disponibilidades de P del suelo, tampoco hallaron diferencias significativas en la biomasa aérea de maíz y soja en el estado fenológico de V5-V6 por efecto del momento de aplicación del P.

Para describir la respuesta al agregado de P en los dos momentos de aplicación, se ajustó una función para cada momento de aplicación. Se compararon las funciones entre sí para determinar si la respuesta dependió del momento de aplicación (Tabla 6). En ninguna de las dos campañas las funciones para cada momento de aplicación fueron distintas entre sí. Por lo tanto, se pudo representar la respuesta al agregado de fósforo con una sola función por campaña (Figura 4). Esto sugiere que la eficiencia del P agregado para la generación de biomasa (i.e.: la pendiente de la función ajustada) fue similar en ambos momentos de aplicación. La eficiencia agronómica media del P agregado también fue similar en ambos experimentos, 17,6 kg kgP<sup>-1</sup> en el 2010/11, y de 17,5 kg kgP<sup>-1</sup> en el 2009/10 (en este último caso es el promedio de la eficiencias medias en el rango de dosis evaluadas).

**Tabla 6** - Relación entre la Respuesta en V6 y V8 ( $\Delta$  biomasa aérea, kg ha<sup>-1</sup>) y la dosis de P en los experimentos de 2009/10 y 2010/11. Comparación entre momentos de aplicación.

Campaña 2009/10		Parámetros		
Modelo: $y=b.x+c.x^2$	b	c	R <sup>2</sup>	p
Modelo 1: dos funciones			0,93	<0,001
función Participado	19,0	-0,12		
función Psiembra	31,1	-0,47		
Modelo 2: una función	25,0	-0,30	0,90	<0,001
Diferencia entre modelos*				0,16
Campaña 2010/11				
Modelo: $y=b.x$	b		R <sup>2</sup>	p
Modelo 1: dos funciones			0,66	0,01
función Participado	13,9			
función Psiembra	21,3			
Modelo 2: una función	17,6		0,61	<0,01
Diferencia entre modelos*				0,29
* Una diferencia no significativa ( $p>0,05$ ) implica que no es necesario usar dos funciones (una para cada momento de aplicación) para representar la relación entre Respuesta (y) y dosis de P (x).				



**Figura 4** - Respuesta al agregado de P en V6 (Campaña 2009-10) y V8 (Campaña 2010-11) en función de la dosis. La representación se realiza con una sola regresión ya que no difiere de la representación con dos regresiones (una para cada momento)

La acumulación de biomasa en V6 (Campaña 2009-10) fue significativamente superior en los tratamientos que recibieron aplicación del fertilizante en la línea de siembra con respecto a las aplicaciones en cobertura (Tabla 5). Estos resultados coinciden con otras experiencias presentes en la bibliografía (Mallarino y Bermudez, 2005). Estas diferencias en el crecimiento temprano se deben a que, en suelos deficientes en P, cuando el fertilizante fosforado es ubicado en la línea de siembra las raíces encuentran la zona enriquecida con fósforo antes que cuando se lo ubica más alejado de la semilla (como sería el caso de las aplicaciones al voleo) (Eghball y Sander, 1989), aunque esto no necesariamente se traduzca en un mayor rendimiento del cultivo (Mallarino, 1998; Kaiser et al., 2005). Este menor crecimiento inicial puede ser potenciado en siembra directa y en fechas de siembra tempranas debido a que las temperaturas más frías del suelo (por la presencia de cobertura) retrasan el crecimiento inicial tanto de la parte aérea como de las raíces (Mallarino, 1998).

## 2.2. Floración (R1)

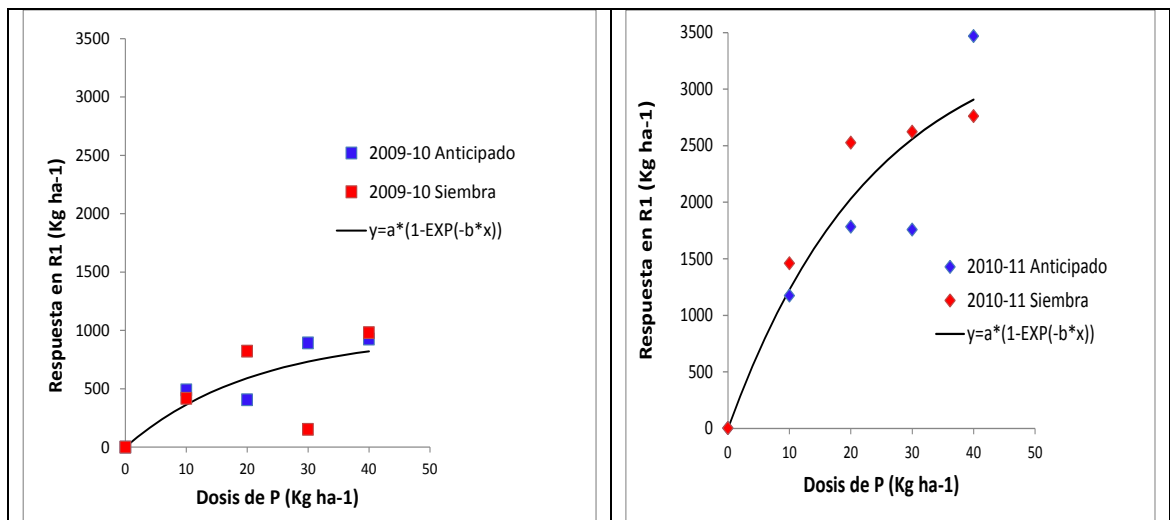
Sólo en la campaña 2010-11 el efecto de la dosis sobre la acumulación de biomasa en floración fue significativo, siendo un efecto de tipo lineal (Tablas 7 y 8). El aumento máximo de biomasa aérea fue de  $950 \text{ kg ha}^{-1}$  (9%) durante la Campaña 2009-10 y de  $3.100 \text{ kg ha}^{-1}$  (36%) durante 2010-11.

<b>Tabla 7 – Biomasa aérea (kg ha<sup>-1</sup>) acumulada por el cultivo maíz en floración</b>				
		Momento y ubicación del fertilizante		
		Voleo		Línea
Campaña	Dosis (Kg P ha <sup>-1</sup> )	Anticipado	Siembra	Siembra
2009-10	0	10.063		
	10	10.553	10.481	
	20	10.468	10.884	9.790
	30	10.955	10.215	
	40	10.989	11.043	
2010-11	0	8.440		
	10	9.611	9.898	
	20	10.220	10.965	10.410
	30	10.196	11.060	
	40	11.907	11.198	

<b>Tabla 8– ANVA de Biomasa aérea acumulada en maíz en R1 (kg ha<sup>-1</sup>). Campañas 2009-10 y 2010-11.</b>		
	Campaña 2009-10 Valor <i>p</i>	Campaña 2010-11 Valor <i>p</i>
Momento	0,88	0,45
Dosis		
Lineal	0,59	< 0,01
Cuadrático	0,81	0,91
Lack of fit	0,77	0,33
Dosis x Momento	0,98	0,31
Ubicación	0,36	0,48

La respuesta a la aplicación de P se describió con una función (tipo Mitscherlich) para cada momento de aplicación. Se realizó la comparación de dos modelos: Modelo 1: de dos líneas de regresión, una ajustada a cada momento de aplicación y Modelo 2: de un línea de regresión única a ambos momentos. La comparación de los modelos no difirió significativamente (Tabla 9), por lo tanto la relación respuesta vs dosis quedó representada por un modelo significativo de una sola función (Tabla 9, Figura 5), indicando que no hubo efecto del momento de aplicación.

<b>Tabla 9</b> - Relación entre la Respuesta en R1 ( $\Delta$ biomasa aérea, $\text{kg ha}^{-1}$ ) y la dosis de P en los experimentos de 2009/10 y 2010/11. Comparación entre momentos de aplicación.				
Parámetros				
	a	b	R <sup>2</sup>	p
<b>Campaña 2009-10</b>				
Modelo: $y = a (1 - \text{Exp}^{-b \text{ dosis}})$				
Modelo 1: dos funciones			0,64	0,06
- Función anticipado	1.374,3	0,028		
- Función siembra	686,9	0,102		
Modelo 2: una función			0,61	<0,01
Diferencia entre modelos*				0,78
<b>Campaña 2010-11</b>				
Modelo: $y = a (1 - \text{Exp}^{-b \text{ dosis}})$				
Modelo 1: con dos funciones			0,93	<0,01
Función anticipado	83.522	9,67E-04		
Función siembra	2.935,2	0,078		
Modelo 2: con una función			0,88	<0,01
Diferencia entre modelos*				0,15
* Una diferencia no significativa ( $p > 0,05$ ) implica que no es necesario usar dos funciones (una para cada momento de aplicación) para representar la relación entre Respuesta (y) y dosis de P (x).				



**Figura 5** - Respuesta al agregado de P en R1 (Campañas 2009-10 y 2010-11) en función de la dosis. La representación se realiza con una sola regresión ya que no difiere de la representación con dos regresiones (una para cada momento).

En ninguna de las dos campañas fueron halladas diferencias significativas en la acumulación de biomasa en R1 por efecto de la ubicación del fertilizante (Tabla 8).

### 2.3. Madurez fisiológica (MF)

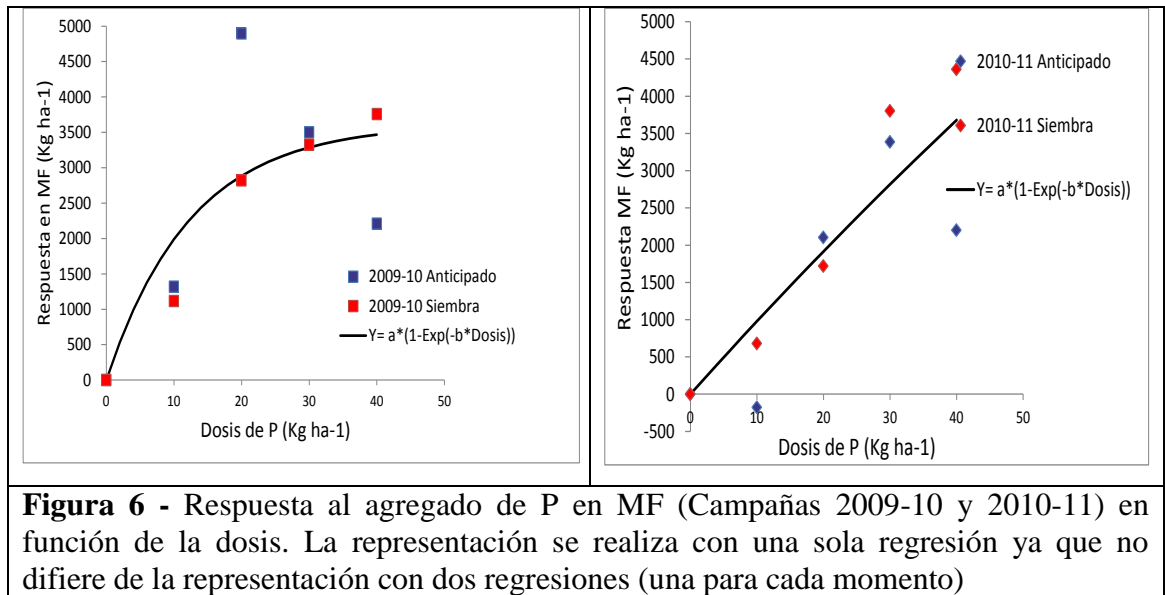
El agregado de dosis crecientes de P produjo aumentos significativos en la biomasa acumulada en ambas campañas y no se detectó interacción entre las dosis y el momento de aplicación, ni efecto del momento de aplicación (Tabla 11). Las dosis empleadas presentaron un efecto cuadrático durante una campaña (2009/10), y lineal en la otra (2010/11) (Tabla 11). El aumento máximo de biomasa aérea por el agregado de P fue de 3.850 kg ha<sup>-1</sup> (18%) en una campaña (2009/10), y de 3.590 kg ha<sup>-1</sup> (18%) en la otra (2010/11).

<b>Tabla 10</b> – Biomasa aérea acumulada en maíz en MF (kg ha <sup>-1</sup> ). Campañas 2009-10 y 2010-11.				
		Momento y ubicación del fertilizante		
		Voleo		Línea
Campaña	Dosis (kg P ha <sup>-1</sup> )	Anticipado	Siembra	Siembra
2009-10	0	20.935		
	10	22.253	22.050	
	20	25.830	23.756	25.983
	30	24.435	24.260	
	40	23.145	24.693	
2010-11	0	19.972		
	10	19.796	20.651	
	20	22.075	21.691	23.981
	30	23.357	23.773	
	40	22.174	24.332	

<b>Tabla 11</b> – ANVA de Biomasa aérea acumulada en maíz en MF (kg ha <sup>-1</sup> ). Campañas 2009-10 y 2010-11.		
	Campaña 2009-10 Valor <i>p</i>	Campaña 2010-11 Valor <i>p</i>
Momento	0,77	0,15
Dosis		
Lineal	0,17	< 0,01
Cuadrático	0,05	0,07
Lack of fit	0,38	0,39
Dosis x Momento	0,32	0,23
Ubicación	0,16	0,03
Se realizaron contrastes para determinar los efectos de dosis, momento y su interacción y el efecto de la ubicación del fertilizante.		

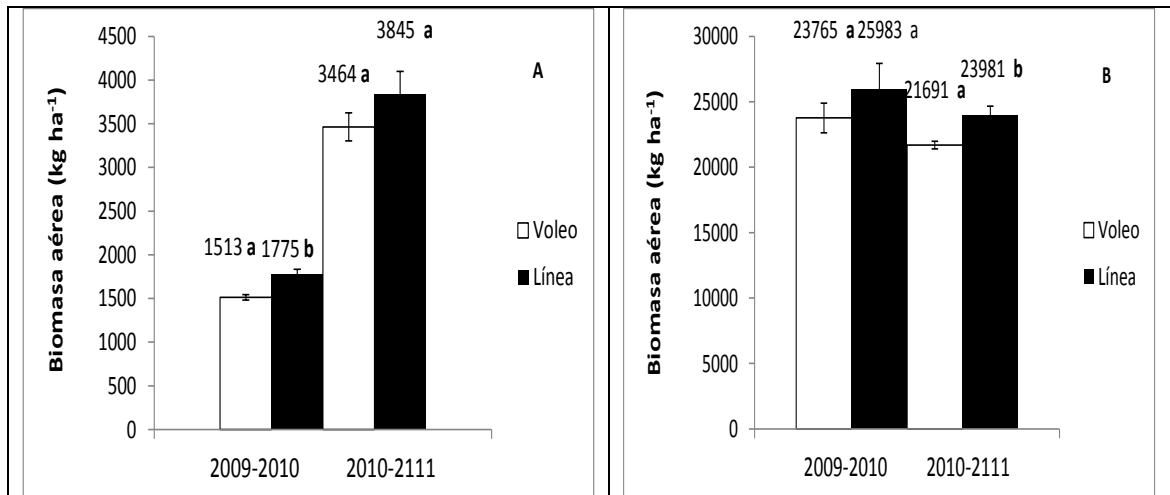
La relación entre la respuesta en biomasa en MF vs dosis fueron representadas mediante curvas, para lo cual se realizaron regresiones no lineales ajustando funciones del tipo Mitscherlich. Se realizó la comparación de dos modelos en forma similar a lo explicado para la respuesta de biomasa en R1. Los resultados arrojados indicaron que durante las dos campañas los modelos comparados no difirieron significativamente (Tabla 12), por lo tanto la relación respuesta vs dosis quedó representada por un modelo significativo de una sola función (Figura 6) demostrando que no hubo efecto del momento de aplicación así como tampoco interacción momento x dosis.

<b>Tabla 12</b> - Relación entre la Respuesta en MF ( $\Delta$ biomasa aérea, $\text{kg ha}^{-1}$ ) y la dosis de P en los experimentos de las campañas 2009/10 y 2010/11. Comparación entre momentos de aplicación.				
	Parámetros		$R^2$	$p$
	a	b		
Campaña 2009-10				
Modelo: $y = a(1 - \text{Exp}^{-b \text{ dosis}})$				
Modelo 1: dos funciones			0,75	0,018
- Función anticipado	3.385	0,1191		
- Función siembra	5.346,3	0,0319		
Modelo 2: una función	3.614,8	0,080	0,71	<0,01
Diferencia entre modelos*				0,62
Campaña 2010-11				
Modelo: $y = a(1 - \text{Exp}^{-b \text{ dosis}})$				
Modelo1: con dos funciones			0,85	<0,01
Función anticipado	4.804,2	0,0227		
Función siembra	794.547	1,386E-4		
Modelo 2: con una función	23.821	4,19E-3	0,78	<0,01
Diferencia entre modelos*				0,28
* Una diferencia no significativa ( $p > 0,05$ ) implica que no es necesario usar dos funciones (una para cada momento de aplicación) para representar la relación entre Respuesta (y) y dosis de P (x).				



Respecto a la ubicación del fertilizante, se observó que sólo en el ciclo 2010-11 la acumulación de MS total fue significativamente superior en los tratamientos con P localizado en la línea de siembra (Tabla 11). Esto demuestra que las diferencias detectadas a inicios del ciclo del cultivo se diluyeron en el ensayo del ciclo 2009-10. Esto podría deberse a que el sistema radicular alcanza una extensión suficiente que le permite incrementar la absorción del fertilizante que se encuentra sobre la superficie del suelo a través de difusión e intercepción. Estos procesos se ven potenciados en los sistemas de siembra directa debido a que usualmente se registran mayores contenidos de humedad superficial que favorecen una amplia proliferación de raíces superficiales, además en estos sistemas no se produce un mezclado del fertilizante con el suelo lo cual reduce la posibilidad de retención del P (Mallarino, 1998). Sin embargo durante el ciclo 2010-11 la tendencia del mayor crecimiento detectado en V6 con el P ubicado en línea respecto al voleo (9,9%) se mantuvo hasta finales del ciclo. Quizás esto pudo deberse a que la sequía que experimentó el cultivo durante estados tempranos en los meses de octubre, noviembre y diciembre (Tabla 2) pudieron afectar la proliferación de raíces en los primeros centímetros del suelo y el aprovechamiento del P aplicado en superficie. En la Figura 7 se presenta la acumulación de biomasa temprana y al final del ciclo del cultivo por efecto de la ubicación del fertilizante, donde se observa que las diferencias en crecimiento inicial se diluyen a lo largo del ciclo sólo en la campaña 2009-10, en tanto que en la campaña 2010-11 la tendencia de la mayor acumulación de biomasa con las aplicaciones en línea se mantienen hasta MF.





**Figura 7** – Acumulación de MS temprana y al final del ciclo del cultivo por efecto de la ubicación del fertilizante (voleo vs. línea) para la dosis de 20 kg ha<sup>-1</sup> durante los estadios fenológicos V6-V8 (figura A) y MF (figura B). Los datos de los tratamientos con aplicación de P al voleo corresponden a la aplicación al momento de la siembra. Letras diferentes dentro de la misma campaña indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ).

En la Tabla 13 se presentan los valores de EUP (Eficiencia en el Uso del P) en MF para los tratamientos con diferente ubicación del P. Durante la campaña 2009-10 la EUP voleo fueron un 44% menos eficientes que las aplicaciones en línea, mientras que durante la campaña 2010-11 las diferencias ascendieron a un 57%. La reducción tan marcada durante la campaña 2010-11 se debería al déficit hídrico ocurrido a inicios del ciclo del cultivo no le permitió una recuperación del cultivo en estados más avanzados que le permitiera igualar su biomasa a la del tratamiento con aplicación de P en la línea.

**Tabla 13** – Eficiencia en el uso del P (EUP) en la generación de biomasa en MF para aplicaciones al voleo y en línea de siembra (kg biomasa kg P aplicado<sup>-1</sup>).

	EUP MF Voleo (Siembra)	EUP MF Línea	% Disminución por aplicación al voleo
2009-10	141,5	252,4	44
2010-11	86	200	57

### 3. Rendimiento en grano y Eficiencia en el uso del P (EUP)

Los efectos de los tratamientos sobre los rendimientos siguieron las mismas tendencias que sobre la materia seca acumulada en los estadios fenológicos anteriores.

La Tabla 14 muestra el rendimiento en grano de maíz, corregido al 14,5% de humedad en los ensayos de 2009/10, 2010/11 y 2011/12. El agregado de dosis crecientes de P produjo aumentos significativos en el rendimiento en las tres campañas

y no se detectó interacción entre las dosis y el momento de aplicación, ni efecto del momento de aplicación (Tabla 15). Las dosis empleadas presentaron una tendencia de efecto lineal ( $p < 0.10$ ) en la primer campaña y un efecto lineal significativo ( $p < 0.05$ ) en las dos últimas.

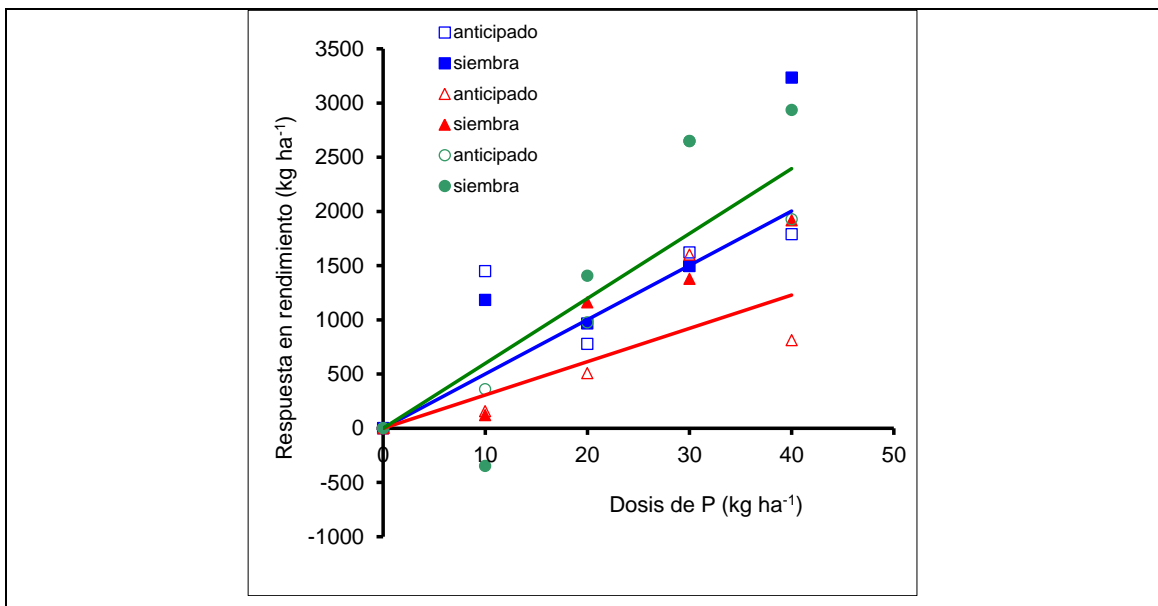
<b>Tabla 14</b> – Rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ , 14,5% Humedad). Campañas 2009/10, 2010/11 y 2011/12.				
		Momento y ubicación del fertilizante		
		Voleo		Línea
Campaña	Dosis ( $\text{kg P ha}^{-1}$ )	Anticipado	Siembra	Siembra
2009-10	0	12.490		13.370
	10	13.938	13.672	
	20	13.268	13.456	
	30	14.111	13.985	
	40	14.279	15.723	
2010-11	0	11.272		13.435
	10	11.429	11.392	
	20	11.779	12.432	
	30	12.873	12.649	
	40	12.083	13.190	
2011-12	0	7.363		9.891
	10	7.722	7.014	
	20	8.339	8.769	
	30	10.011	10.013	
	40	9.291	10.298	

**Tabla 15**– ANVA de rendimiento en grano de maíz ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). Campañas 2009-10, 2010-11 y 2011-12.

	Campaña 2009-10 Valor <i>p</i>	Campaña 2010-11 Valor <i>p</i>	Campaña 2011-12 Valor <i>p</i>
Momento	0,53	0,18	0,71
Dosis			
Lineal	0,06	< 0,01	< 0,01
Cuadrático	0,16	0,14	0,17
Lack of fit	0,69	0,55	0,39
Dosis x Momento	0,47	0,50	0,57
Ubicación	0,93	0,08	0,27

Se realizaron contrastes para determinar los efectos de dosis, momento y su interacción y el efecto de la ubicación del fertilizante.

La Figura 8 muestra el incremento de rendimiento en función de la dosis de fósforo agregada en términos absolutos. El aumento máximo de rendimiento fue de  $2.500 \text{ kg ha}^{-1}$  (20%) en la campaña 2009/10, de  $1.490 \text{ kg ha}^{-1}$  (13%) en la 2010/11 y de  $2.650 \text{ kg ha}^{-1}$  (36%) en la 2011-12.



**Figura 8:** Respuesta de rendimiento en grano en función de la dosis, Campañas 2009-10 (cuadrados), 2010-11 (triángulos) y 2011-12 (círculos). La representación se realiza con una sola regresión por año ya que no difiere de la representación con dos regresiones.

La relación entre la respuesta de rendimiento en grano y dosis, y cuya pendiente es la eficiencia en el uso del P (EUP) fueron representadas mediante regresiones lineales. En la tabla 16 se presenta la comparación de dos modelos, uno con una función ajustada para cada momento de aplicación y año y otro con una función por año (común

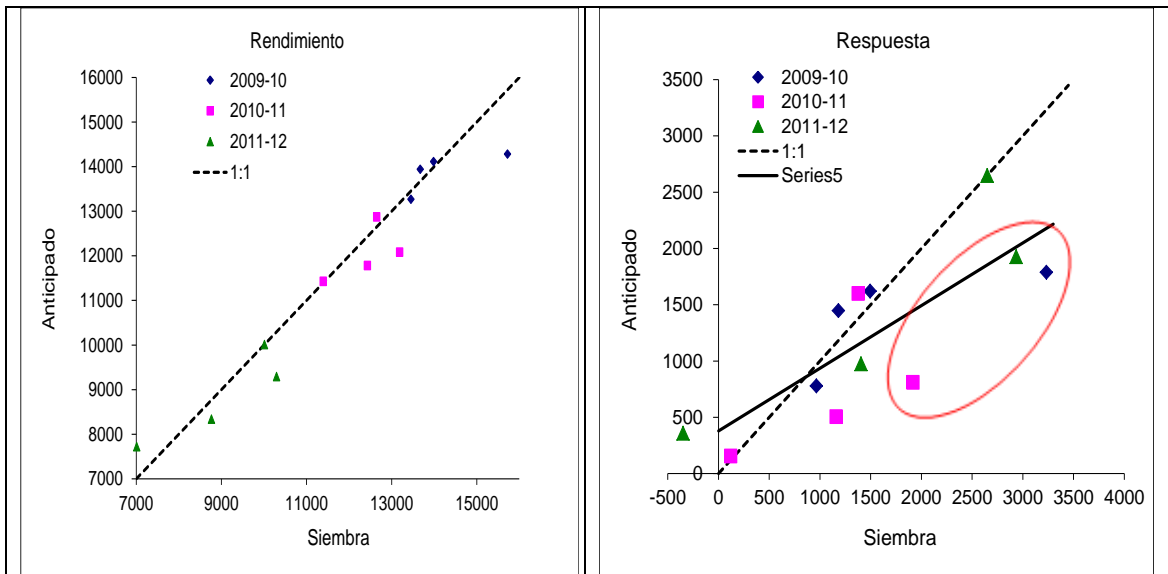
a ambos momentos de aplicación). Los resultados arrojaron que no hubo diferencias entre ambos modelos, con lo cual la representación entre respuesta de rendimiento en grano y dosis se realizó con una sola función para cada año (Figura 8). Sin embargo, con las aplicaciones a la siembra las EA (pendientes b) fueron un 26, 35 y 19% superiores respecto a las aplicaciones anticipadas para las campañas 2009-10, 2010-11 y 2011-12, respectivamente.

**Tabla 16** - Relación entre la Respuesta de rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y la dosis de P en los experimentos de las campañas 2009/10, 2010/11 y 2011/12. Comparación entre momentos de aplicación.

	Parámetros		
	b	p	R2
Campañas 2009-10, 2010-11 y 2011-12			
Modelo: $y = b x$			
MODELO 1: 6 funciones		<0,01	0,81
Función anticipado 2009-10	50,07		
Función siembra 2009-10	68,43		
Función anticipado 2010-11	30,72		
Función siembra 2010-11	47,47		
Función anticipado 2011-12	59,89		
Función siembra 2011-12	73,84		
MODELO 2: 3 funciones		<0,01	0,76
Función anticipado y siembra 2009-10	59,25		
Función anticipado y siembra 2010-11	39,10		
Función anticipado y siembra 2011-12	66,86		
Diferencia*		0,16	

\* Una diferencia no significativa ( $p > 0,05$ ) implica que no es necesario usar dos funciones (una para cada momento de aplicación) para representar la relación entre Respuesta (y) y dosis de P (x).

Se realizaron comparaciones de los momentos de aplicación graficando los rendimientos de la aplicación anticipada vs aplicación a la siembra. De la figura 9 se observa que los puntos estuvieron alineados sobre la recta de pendiente 1:1 indicando que ambos momentos de aplicación presentaron un comportamiento similar y a través de un test t se determinó que la pendiente de la recta de los momentos de aplicación no difirió de 1 (Tabla 17). Sin embargo, cuando se graficaron las respuestas (Figura 9) la pendiente fue significativamente menor que 1 (Tabla 17) sugiriendo que las respuestas fueron mayores con las aplicaciones a la siembra, para los valores más altos de respuesta.



**Figura 9** - Relación entre el rendimiento y respuesta de los tratamientos con aplicaciones al voleo anticipado vs a la siembra. Los puntos alineados en torno a la relación 1:1 indican ausencia de diferencia entre ambos momentos de aplicación. Campañas 2009-10, 2010-11 y 2011-12. Los puntos dentro de la elipse corresponden a la dosis de 40 kg P ha<sup>-1</sup>.

**Tabla 17-** Relación entre rendimiento anticipado vs siembra y respuesta anticipado vs siembra.

	Pendiente	t	p
Rendimiento anticipado vs Rendimiento siembra	0,89	-1,43	0,18
Respuesta anticipada vs Respuesta siembra	0,55	-3,34	< 0,01

\*Una diferencia no significativa ( $p > 0,05$ ) indica que la pendiente no difiere de 1.

Los puntos que más se separan de la línea 1:1 son los correspondiente a la dosis más alta de P (40 kg P ha<sup>-1</sup>), lo que sugiere que sólo con estas altas dosis se esperaría observar una diferencia en respuesta a favor de la aplicación a la siembra. Por otro lado, en el rango de dosis más comúnmente usado en este cultivo, no se observaron diferencias entre momento de aplicación. Las diferencias promedio de rendimiento entre las aplicaciones anticipadas y a la siembra para las tres campañas fueron de tan sólo 289 kg ha<sup>-1</sup> a favor de las aplicaciones a la siembra. Por lo tanto, es de esperar que en suelos Hapludoles de textura franco arenosa la aplicación anticipada, en los lapsos de tiempo mencionados, no generen fijación del P de gran magnitud así como tampoco generen una mayor disponibilidad del P en solución. Similares resultados hallaron Mallarino et al. (2009) trabajando en una red de 20 ensayos con maíz y soja en Iowa; donde tampoco detectaron diferencias en rendimiento ni en materia seca acumulada en estadios iniciales de los cultivos por efecto del momento de aplicación del fertilizante utilizando dosis muy similares a las de este estudio (0,10, 20, 30, 40 y 50 kg P ha<sup>-1</sup>).

En la bibliografía existen otros trabajos recientes donde se observa ausencia de efectos del momento de aplicación del P sobre el rendimiento del cultivo de soja. Ferraris et al. (2012), en un ensayo con soja en un suelo Argiudol típico Serie Rojas,

observaron que la aplicación anticipada de P al voleo demostró similar eficiencia que la misma dosis ( $25 \text{ kg P ha}^{-1}$ ) ubicada en la línea a la siembra y que los mejores rendimientos fueron obtenidos cuando la dosis era particionada en forma anticipada y a la siembra respecto a aplicar la misma dosis en forma total en banda a la siembra.

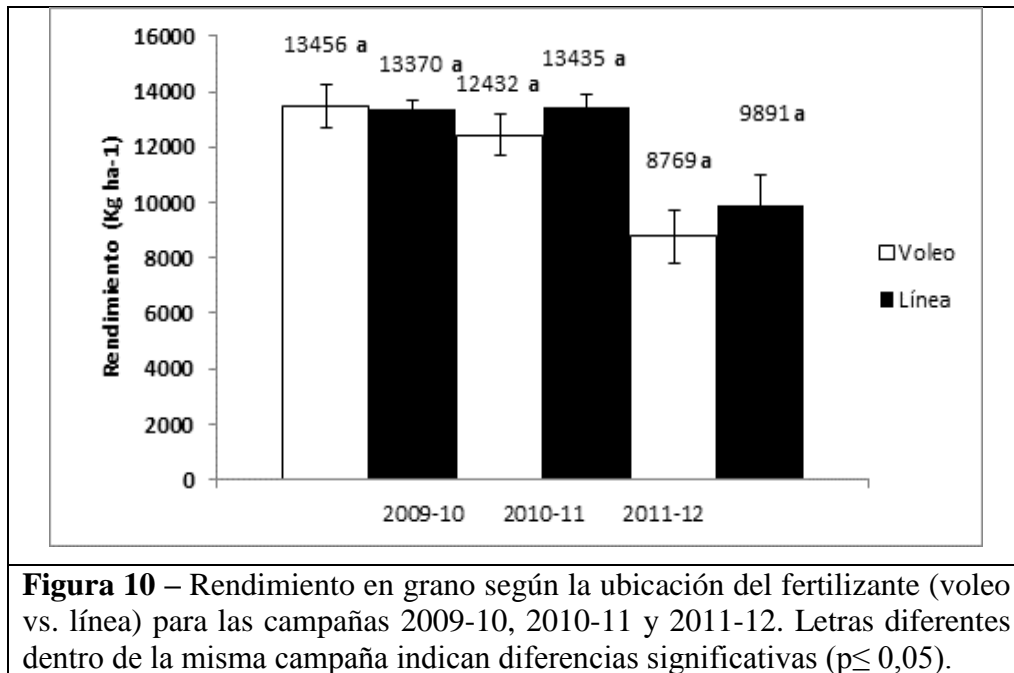
Barbagelata et al. (2011) realizaron una red en la Región Pampeana que comprendió 46 ensayos de trigo y 63 de maíz, en la cual evaluaron el efecto de distintas dosis (0, 12, 24 y  $36 \text{ kg P ha}^{-1}$ ) aplicadas al voleo previo a la siembra y en la línea al momento de la siembra. En el análisis conjunto de los sitios no se detectaron diferencias entre las dos formas de aplicación evaluadas para ninguno de los dos cultivos. Estos resultados fueron explicados por razones, 1) la aplicación de P en superficie minimiza el contacto del fertilizante con los coloides del suelo, disminuyendo la fijación y 2) en siembra directa se produce un incremento de la actividad radicular superficial debido al mayor contenido de humedad del suelo debajo de la cobertura de residuos de cosechas anteriores.

En un estudio más antiguo realizado por Bianchini et al., (2006) en 4 sitios ubicados en el sudeste de Córdoba y Buenos Aires sobre una rotación trigo/soja de 2° - maíz - soja, tampoco hallaron diferencias en rendimiento debidas a la forma de aplicación comparando aplicaciones en línea vs. voleo en presiembra con dosis de 25 y  $50 \text{ kg P ha}^{-1}$ .

Por su parte Ferraris et al., (2010) en una red de nueve ensayos de trigo realizados en el norte, centro y oeste de Buenos Aires, observaron que los tratamientos con aplicaciones al voleo y en banda se distribuyeron de manera uniforme alrededor de una relación 1:1, indicando que ambas formas de localización mostraron un comportamiento similar y que esta tendencia no fue afectada por las dosis, las cuales oscilaron entre 10 y  $30 \text{ kg P ha}^{-1}$ .

Cuando se trabaja en suelos con alta capacidad de fijación las aplicaciones anticipadas podrían afectar negativamente los rendimientos de los cultivos. Amanullah et al. (2010) observaron que en suelos con alta capacidad de fijación por presencia de calcio, las mejores estrategia de fertilización fueron aquellas en las cuales el P fue aplicado sólo 10 días antes de la siembra o al momento de la siembra, ya que una anticipación por un período más prolongado aumentaba el tiempo de contacto del P con las partículas del suelo incrementando la fijación.

En ninguna de las tres campañas se observó un efecto significativo de la ubicación del fertilizante sobre el rendimiento (Tabla 15). Sin embargo, los rendimientos de los tratamientos con la ubicación del P en la línea de siembra fueron un 7,5 y 11,3% superiores respecto a las aplicaciones al voleo para las campañas 2010-11 y 2011-12, respectivamente (Figura 10). Durante la campaña 2010-11 se registraron restricciones hídricas durante octubre, noviembre y diciembre período en el cual las precipitaciones fueron casi del 60% inferiores respecto a las precipitaciones de ese mismo trimestre histórico (Tabla 1), en tanto que en la campaña 2011/12 los meses de octubre y noviembre fueron normales pero diciembre se caracterizó por la ausencia total de precipitaciones (Tabla 1). De esto se deduce que en los dos años más secos hubo una tendencia a un mejor desempeño de la aplicación incorporada debido probablemente a una menor disolución del fertilizante con las aplicaciones en cobertura o a una menor actividad radical cercana a la superficie del suelo.



**Figura 10** – Rendimiento en grano según la ubicación del fertilizante (voleo vs. línea) para las campañas 2009-10, 2010-11 y 2011-12. Letras diferentes dentro de la misma campaña indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ).

## 4. P disponible

### 4.1. Cambios de P disponible al inicio del ciclo del cultivo

El agregado de P al voleo causó un aumento de la disponibilidad de P del suelo al comienzo del ciclo del cultivo, en especial en los primeros 5 cm de profundidad (Tabla 18, Figura 11). En el 2009 también aumentó, aunque en menor magnitud, la disponibilidad en la profundidad 5-10 cm (Figura 11). Los efectos sobre la disponibilidad más allá de los 10 cm fueron poco relevantes. La disponibilidad de P aumentó en los primeros 10 cm de suelo entre 0.17-0.20 mg P kg<sup>-1</sup> suelo por cada kilo de P agregado (en promedio para los dos momentos de aplicación). Si se consideran los primeros 20 cm de suelo, el aumento fue de 0.09-0.11 mg P kg<sup>-1</sup> suelo por cada kg de P agregado. Esto implica que, para elevar la disponibilidad 1 mg P kg<sup>-1</sup> suelo en los primeros 20 cm del suelo, hubo que agregar entre 11-9 kg P ha<sup>-1</sup>.

Estos valores de incremento en el P disponible, si bien algo más bajos, son bastante cercanos a los hallados por Rubio et al., (2008). En ese estudio se obtuvieron los coeficientes b que representan el incremento en el P extractable en el suelo por la aplicación de 1 mg kg<sup>-1</sup> de un total de 71 suelos representativos de la Región Pampeana, además de lograr modelos de regresión lineal múltiple que permiten predecir estos coeficientes a partir de diferentes propiedades de los suelos. Los resultados arrojaron que los coeficientes b se hallaron en el rango de 0,27 a 0,75, promediando 0,52 lo que equivale a incrementos de 0,11 a 0,3 promediando 0,21 mg P kg<sup>-1</sup> suelo de P extractable por cada kilo de P agregado. Otro punto interesante del trabajo de Rubio et al., (2008) fue que detectaron una notable segregación espacial de los coeficientes b según los suelos estuvieran localizados al norte (en cuyo caso los coeficientes eran más altos) o al sur de la región Pampeana, lo cual fue atribuido a ciertas diferencias en los constituyentes del material parental. Esto se debería a que los suelos del sur Pampeano están formados por un loess en el que prevalecen materiales volcánicos de los Andes patagónicos, mientras que en los suelos del norte Pampeano el loess cuenta también con

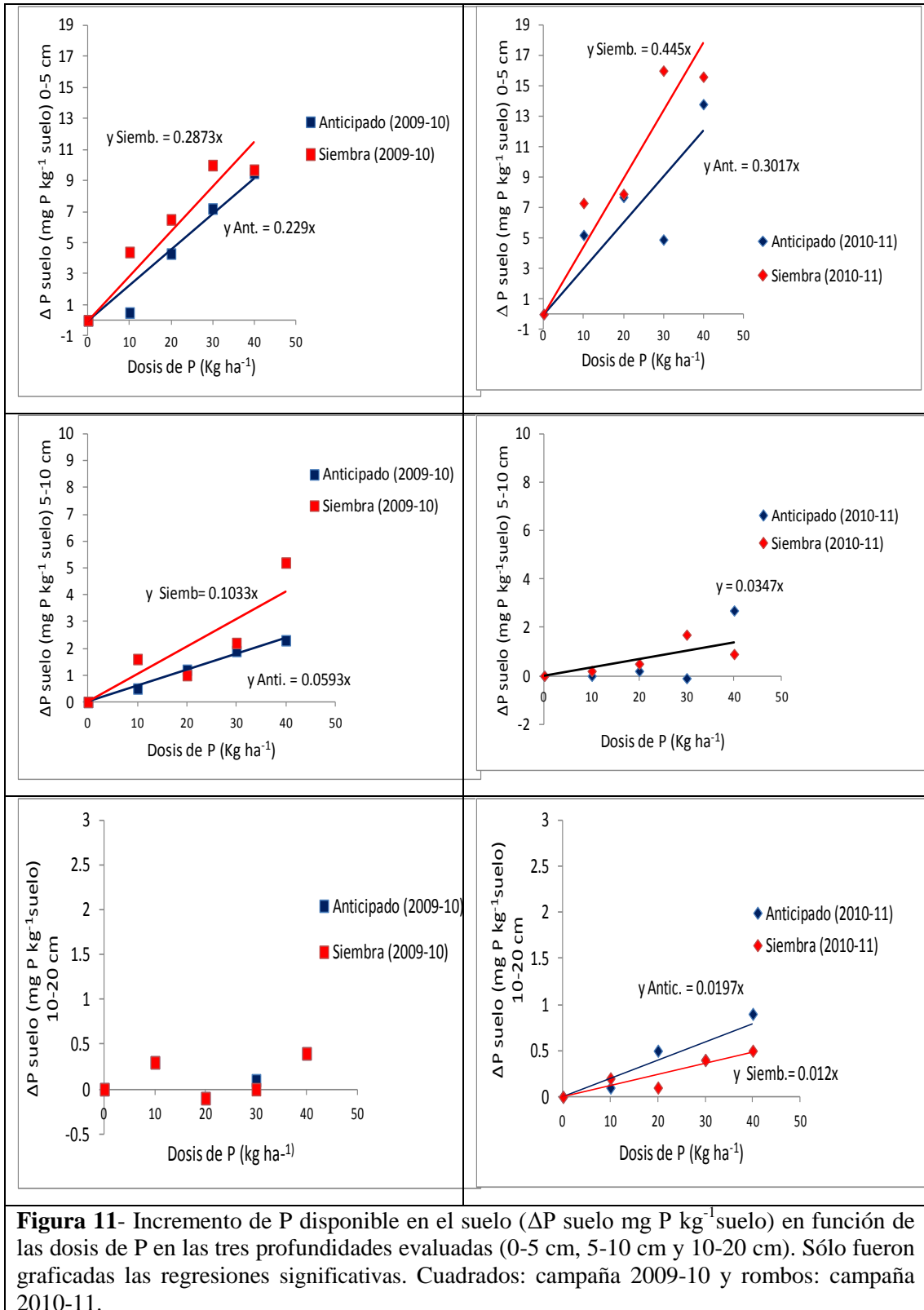
otros materiales como lo son los de las Sierras Pampeanas y cuenca del Paraná con rocas ígneas y metamórficas y una menor proporción de material volcánico.

**Tabla 18** – Contenido de P disponible en el suelo ( $\text{mg P kg}^{-1}$  suelo) (P Bray) con el cultivo en V6 y V8 para las campañas 2009-10 y 2010-11, respectivamente.

		Profundidad					
		0-5 cm		5-10 cm		10-20 cm	
Campaña	Dosis ( $\text{kg P ha}^{-1}$ )	Anticipado	Siembra	Anticipado	Siembra	Anticipado	Siembra
2009-10	0	9,9		4,5		3,7	
	10	10,4	14,3	5,0	6,1	4,0	4,0
	20	14,2	16,4	5,7	5,5	3,6	3,6
	30	17,1	19,9	6,4	6,7	3,8	3,7
	40	19,4	19,6	6,8	9,7	4,1	4,1
2010-11	0	10,8		6,2		4,0	
	10	16,0	18,1	6,2	6,4	4,1	4,2
	20	18,5	18,7	6,4	6,7	4,5	4,1
	30	15,7	26,8	6,1	7,9	4,4	4,4
	40	24,6	26,4	8,9	7,1	4,9	4,5

Para evaluar el efecto del momento de aplicación sobre el cambio en la disponibilidad de P del suelo, se compararon dos rectas forzadas a cero ( $\Delta$  P suelo vs. Dosis, una para cada momento de aplicación) contra una sola recta (común a ambos momentos de aplicación) (Figura 11 y Tabla 19).





Para la profundidad 0-5 cm, los dos años se observó que las aplicaciones a la siembra tendieron a tener una pendiente superior a la aplicación anticipada ( $p < 0.10$ ). Cuando se compararon los dos años juntos el efecto momento fue significativo ( $p = 0.02$ ). Para la profundidad 5-10 cm, un efecto similar del momento de aplicación se

observó en el año 2009. De 10-20 cm, si bien los efectos fueron poco relevantes se observó que en año 2010 las aplicaciones anticipadas presentaron una pendiente superior que la aplicación a la siembra ( $p < 0.05$ ).

<b>Tabla 19-</b> Relación entre el incremento de P disponible en el suelo ( $\Delta P$ suelo mg P kg <sup>-1</sup> suelo) y la dosis de P en los experimentos de 2009/10 y 2010/11. Comparación entre momentos de aplicación.			
0-5 cm			
Campaña 2009/10		Parámetros	
Modelo: $y=b.x$	b	$R^2$	$p$
Modelo 1: dos funciones		0,92	<0,01
función Panticipado	0,22		
función Psiembra	0,28		
Modelo 2: una función	0,25	0,88	<0,01
Diferencia entre modelos*			0,09
Campaña 2010/11			
Modelo: $y=b.x$	b	$R^2$	$p$
Modelo 1: dos funciones		0,83	<0,01
función Panticipado	0,30		
función Psiembra	0,44		
Modelo 2: una función	0,37	0,73	<0,01
Diferencia entre modelos*			0,05
Campañas 2009/10 y 2010/11			
Modelo: $y=b.x$			
Modelo 1: 4 funciones		0,87	<0,01
función Panticipado 09/10	0,22		
función Psiembra 09/10	0,29		
función Panticipado 10/11	0,30		
función Psiembra 10/11	0,44		
Modelo 2: 2 funciones		0,79	<0,01
función ant. y siembr. 09/10	0,25		
función ant. y siembr. 10/11	0,37		
Diferencia			0,023
5-10cm			
Campaña 2009/10		Parámetros	
Modelo: $y=b.x$	b	$R^2$	$p$
Modelo 1: dos funciones		0,83	<0,01
función Panticipado	0,05		
función Psiembra	0,10		
Modelo 2: una función	0,08	0,69	<0,01
Diferencia entre modelos*			0,03
Campaña 2010/11			

<b>Continuación Tabla 19</b>			
Modelo: $y=b.x$	b	$R^2$	$p$
Modelo 1: dos funciones		0,46	0,08
función Participado	0,036		
función Psiembra	0,033		
Modelo 2: una función	0,034	0,45	0,02
Diferencia entre modelos*			0,84
10-20 cm			
Campaña 2009/10		Parámetros	
Modelo: $y=b.x$	b	$R^2$	$p$
Modelo 1: dos funciones		0,16	0,47
función Participado	0,006		
función Psiembra	0,005		
Modelo 2: una función	0,006	0,16	0,21
Diferencia entre modelos*			0,84
Campaña 2010/11			
Modelo: $y=b.x$	b	$R^2$	$p$
Modelo 1: dos funciones		0,86	<0,01
función Participado	0,019		
función Psiembra	0,012		
Modelo 2: una función	0,015	0,74	<0,01
Diferencia entre modelos*			0,02
* Una diferencia no significativa ( $p>0,05$ ) implica que no es necesario usar dos funciones (una para cada momento de aplicación) para representar la relación entre Respuesta ( $y$ ) y dosis de P ( $x$ ), lo que implica que las pendientes de las dos rectas no son distintas y, por lo tanto, no hay efecto del momento sobre la relación $y$ vs. $x$ .			

Los resultados obtenidos nos habilitan a rechazar la hipótesis que la aplicación anticipada generaría una mayor disponibilidad de P al comienzo del ciclo del cultivo que las aplicaciones a la siembra (Hipótesis 2). Los contenidos de P disponible tendieron a ser superiores con las aplicaciones a la siembra. Posiblemente el mayor tiempo de contacto del fertilizante con las partículas del suelo en los tratamientos fertilizados anticipadamente (90 días, aproximadamente) generaron un proceso de adsorción que determinó una disminución del contenido de P disponible superficialmente.

Esta disminución del contenido de P con el tiempo, coincide con el modelo conceptual de dos fases, en el cual hay una fase inicial de reacción rápida con el suelo y luego una fase de reacción más lenta en la cual se alcanza un equilibrio más estable (Barrow, 1998). En este trabajo, con las mediciones realizadas, no es posible determinar la naturaleza del proceso de sorción, pero por el período de tiempo transcurrido (90 días aproximadamente) es probable que hubieran ocurrido no sólo fenómenos de superficie sino también alguna interacción con los componentes internos del coloide.

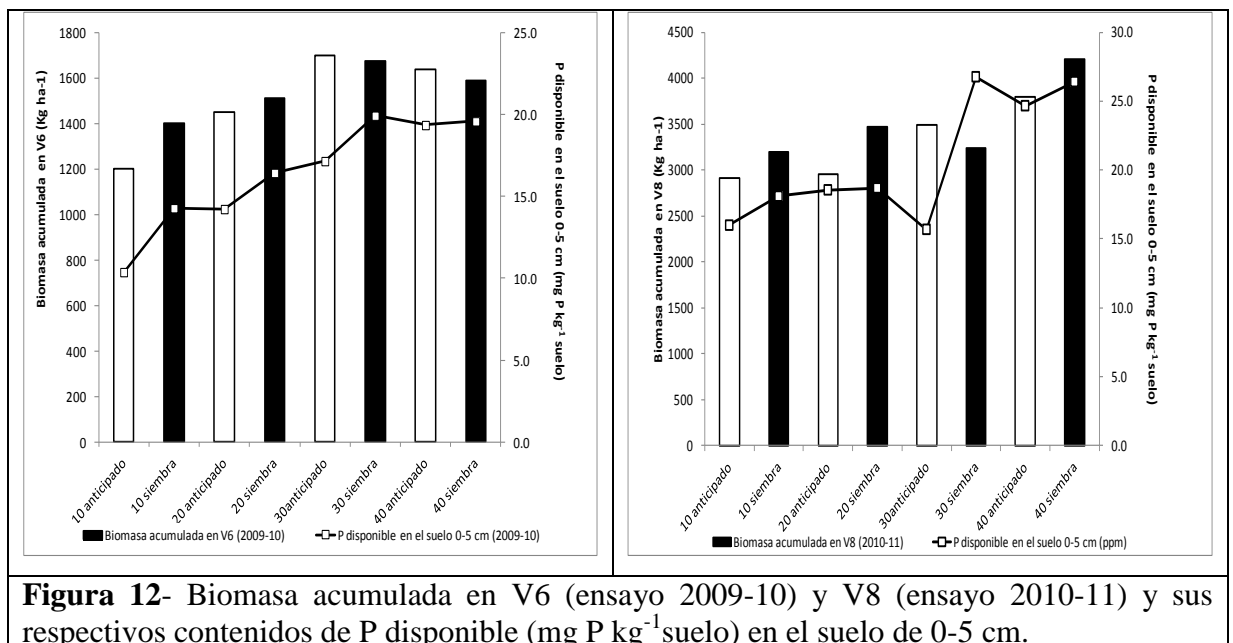
Cabello et al. (2008), trabajando en un ensayo en macetas con 70 suelos representativos de la Región Pampeana realizaron incubaciones de distintas dosis de P

durante 365 días y midieron su disponibilidad a lo largo del tiempo. En todos los suelos se observó una caída rápida del P disponible antes de los 45 días de la fertilización, y luego una caída leve del P disponible, que fue mayor cuanto mayores fueron las dosis. Por su parte, Barrow (1973) demostró con cultivos creciendo en macetas, que el P aplicado recientemente estaba más disponible que el aplicado 5 meses antes lo cual se atribuyó a procesos de adsorción lenta que convierten al P en formas no disponibles para las plantas.

De todos modos, de acuerdo a la escasa disminución del contenido de P disponible en las aplicaciones anticipadas respecto a las aplicaciones a la siembra (15 y 8% para las profundidades de 0-5 y 5-10cm, respectivamente) se puede suponer que la fijación ocurrida no fue de gran magnitud. Además, los suelos en los cuales se realizaron estos ensayos (Hapludoles típicos) poseen propiedades físico-químicas que le confieren escasa capacidad de retención (bajo contenido de arcilla, y bajos contenidos de óxidos de Fe y Al) (Giuffré, 1989).

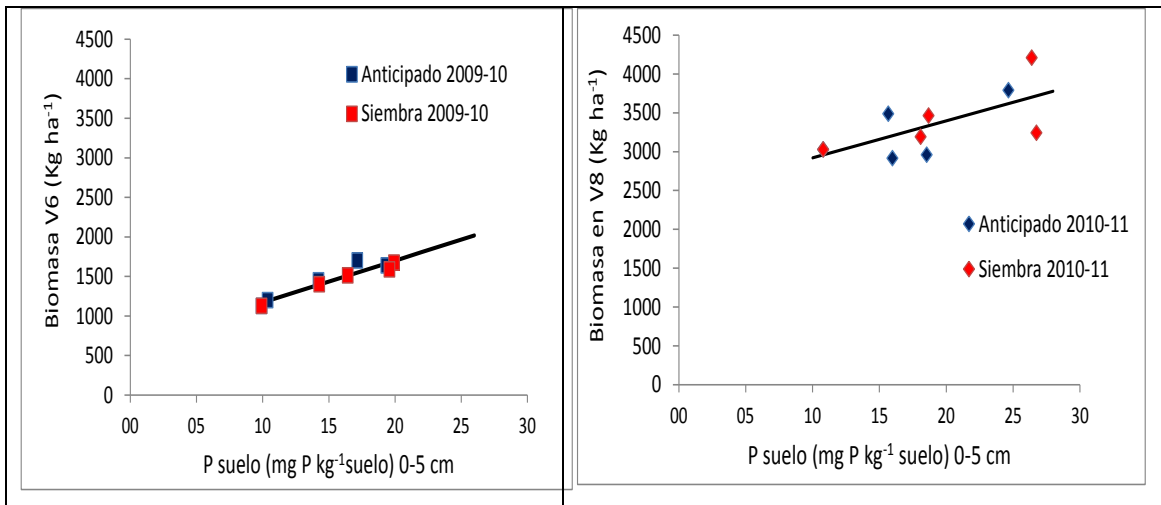
Las mediciones de los contenidos de P disponible del suelo estuvieron correlacionados con la biomasa acumulada en V6 y V8. Tal como fuera señalado más arriba, no fueron detectadas diferencias en la biomasa en V6 y V8 por efecto del momento de aplicación, sin embargo se observó que la biomasa acumulada fue en promedio de los dos ensayos un 6% superior con las aplicaciones a la siembra lo cual concuerda con que el contenido de P disponible en el suelo de 0-5 cm fue en promedio un 17,5% superior con las aplicaciones en ese mismo momento.

Como se observa en la Figura 12, los incrementos en el contenido de P disponible en el suelo acompañan a los incrementos en la biomasa acumulada en V6 y V8. Por otro lado, se observa gráficamente que los mayores contenidos de P del suelo de las aplicaciones a la siembra se corresponden bastante bien con la mayor biomasa acumulada con las aplicaciones en ese mismo momento.



Se ajustaron regresiones lineales para evaluar la relación entre la biomasa acumulada y el P disponible en el suelo de 0-5 cm para los ensayos de las campañas

2009-10 y 2010-11. Para ninguna de las dos campañas se detectaron diferencias significativas entre modelos, por eso se ajustó una regresión lineal significativa común a ambos momentos de aplicación (Tabla 20 y Figura 13). Se realizó la comparación entre años y los resultados arrojaron que las pendientes no difirieron entre años.



**Figura 13** - Relación entre biomasa acumulada en V6 y V8 y P disponible ( $\text{mg P kg}^{-1}$  suelo) en el suelo de 0-5 cm de profundidad para los ensayos de las campañas 2009-10 y 2010-11.

**Tabla 20:** Relación entre la biomasa acumulada en V6 y V8 ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y el P disponible en el suelo ( $\text{mg P kg}^{-1}$  suelo) de 0-5 cm de profundidad en los experimentos de 2009/10 y 2010/11. Comparación entre momentos de aplicación.

Campaña 2009/10	Parámetros			
Modelo: $y=a+b.x$	a	b	$R^2$	$p$
Modelo 1: dos funciones			0,93	<0,01
función Panticipado	581,54	59,22		
función Psiembra	648,76	50,65		
Modelo 2: una función	641,03	52,96	0,91	<0,01
Diferencia entre modelos*				0,34
Campaña 2010/11				
Modelo: $y=a+b.x$	a	b	$R^2$	$p$
Modelo 1: dos funciones			0,44	0,28
función Panticipado	2.375,21	50,29		
función Psiembra	2.534,18	44,31		
Modelo 2: una función	2.443,96	47,61	0,44	0,03
Diferencia entre modelos*				0,96

\* Una diferencia no significativa ( $p>0,05$ ) implica que no es necesario usar dos funciones (una para cada momento de aplicación) para representar la relación entre biomasa (y) y P suelo 0-5 cm (x).

Berardo et al. (2003), al igual que en este trabajo, halló un efecto significativo de la disponibilidad de P en el suelo sobre la acumulación de materia seca en V6. En el

trabajo de Berardo los valores absolutos de sus coeficientes  $b$  fueron muy inferiores y oscilaron entre 8,1 y 15,6 kg ha<sup>-1</sup> de materia seca por mg P kg<sup>-1</sup> del suelo. De todos modos los coeficientes de este trabajo no son comparables con los de Berardo debido a la diferente profundidad considerada en la determinación del P disponible (0-5 cm en este trabajo y 0-20 cm en el de Berardo).

#### 4.2. Contenido de P disponible al momento de la cosecha

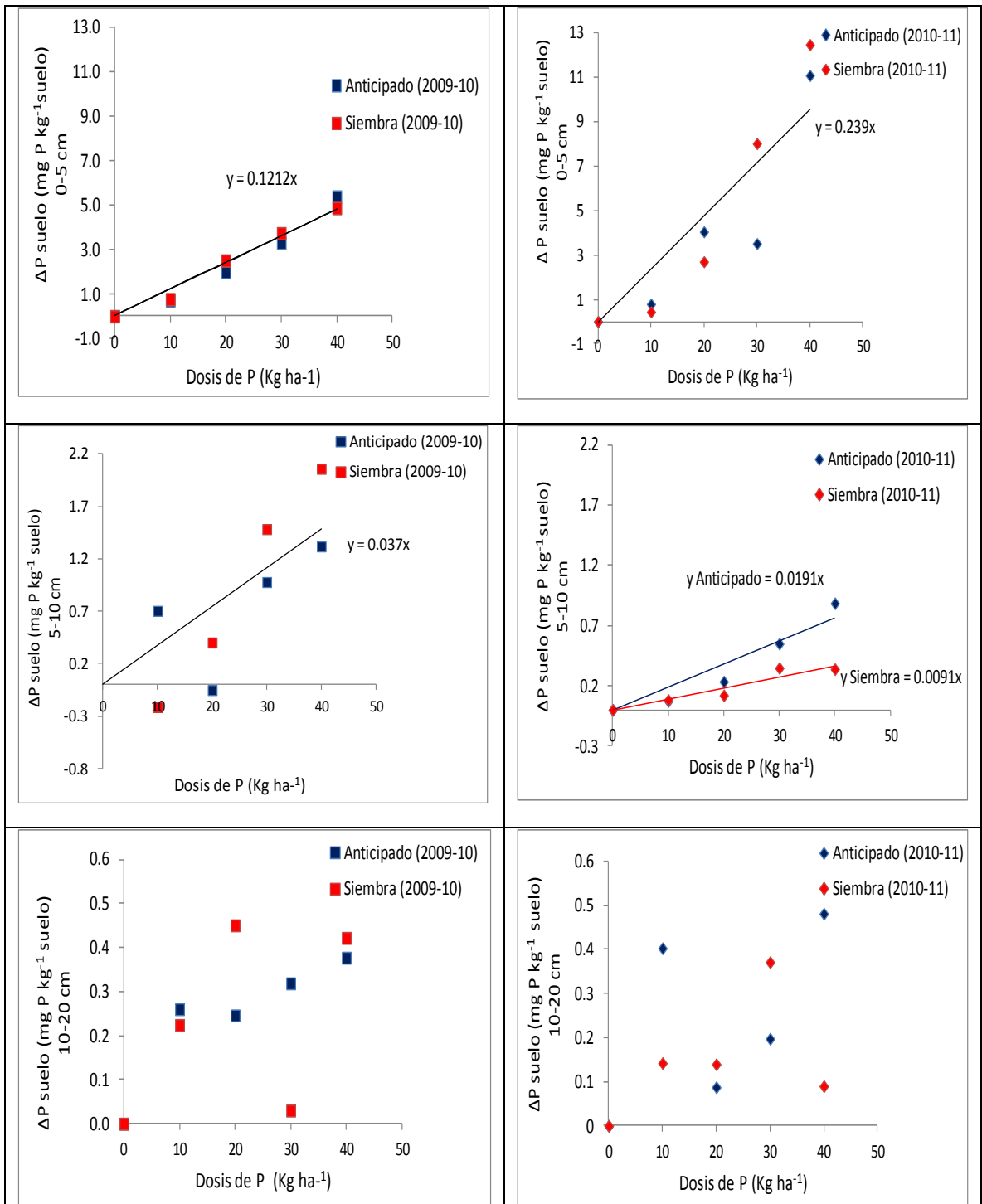
Los contenidos de P disponible al momento de la cosecha fueron inferiores a los medidos cuando el cultivo se hallaba en V6-V8 en todas las profundidades evaluadas ( $p < 0,01$ ) Esta disminución refleja el consumo de P por parte del cultivo y cierto efecto de fijación por el paso del tiempo.

El agregado de P presentó un efecto residual que se manifestó por los pequeños incrementos de P que se mantuvieron hasta el momento de la cosecha (Tabla 21). La disponibilidad de P aumentó en los primeros 10 cm de suelo entre 0.08-0.13 mg P kg<sup>-1</sup>suelo por cada kilo de P aplicado (en promedio para los dos momentos de aplicación). Si se consideran los primeros 20 cm de suelo, el aumento fue de 0.04-0.07 mg P kg<sup>-1</sup>suelo por cada kilo de P aplicado.

**Tabla 21** – Contenido de P disponible en el suelo (mg P kg<sup>-1</sup>suelo) (P Bray) al momento de MF del cultivo para las campañas 2009/10 y 2010/11.

		Profundidad					
		0-5 cm		5-10 cm		10-20 cm	
Campaña	Dosis (kg P ha <sup>-1</sup> )	Anticipado	Siembra	Anticipado	Siembra	Anticipado	Siembra
2009-10	0	5,3		3,2		2,9	
	10	6,0	6,1	3,9	3,0	3,2	3,2
	20	7,3	7,8	3,1	3,6	3,2	3,4
	30	8,6	9,0	4,2	4,7	3,2	3,0
	40	10,7	10,2	4,5	5,2	3,3	3,4
2010-11	0	9,1		4,5		3,5	
	10	9,9	9,5	4,5	4,5	3,9	3,6
	20	13,1	11,8	4,7	4,6	3,6	3,6
	30	12,6	17,1	5,0	4,8	3,7	3,9
	40	20,2	21,6	5,3	4,8	4,0	3,6

Para evaluar el efecto del momento de aplicación sobre el cambio en la disponibilidad de P del suelo a cosecha, se compararon dos rectas forzadas a cero ( $\Delta P$  suelo vs. dosis, una para cada momento de aplicación) contra una sola recta (común a ambos momentos de aplicación). Para la profundidad de 0-5 cm no se hallaron diferencias entre momentos de aplicación; de 5-10 cm en el año 2010 los contenidos de P fueron superiores con las aplicaciones anticipadas y de 10-20 cm no se realizaron comparaciones porque no se hallaron regresiones significativas entre  $\Delta P$  suelo vs. dosis (Figura 14 y Tabla 22 ).



**Figura 14** - Incremento de P disponible en el suelo ( $\Delta P$  suelo  $\text{mg P kg}^{-1}$  suelo) a cosecha en función de las dosis de P en las tres profundidades evaluadas (0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm) al momento de cosecha. Sólo fueron graficadas las regresiones significativas. Cuadrados: campaña 2009-10 y rombos: campaña 2010-11.

**Tabla 22** - Relación entre el incremento de P disponible en el suelo ( $\Delta P$  suelo  $\text{mg P kg}^{-1}$  suelo) a cosecha y la dosis de P en los experimentos de 2009/10 y 2010/11. Comparación entre momentos de aplicación.

0-5 cm			
Campaña 2009/10		Parámetros	
Modelo: $y=b.x$	b	$R^2$	$p$
Modelo 1: dos funciones		0,97	<0,01
función Panticipado	0,12		
función Psiembra	0,12		
Modelo 2: una función	0,12	0,97	<0,01
Diferencia entre modelos*			0,91
Campaña 2010/11		Parámetros	
Modelo: $y=b.x$	b	$R^2$	$p$
Modelo 1: dos funciones		0,83	<0,01
función Panticipado	0,21		
función Psiembra	0,26		
Modelo 2: una función	0,23	0,81	<0,01
Diferencia entre modelos*			0,33
5 -10 cm			
Campaña 2009/10		Parámetros	
Modelo: $y=b.x$	b	$R^2$	$p$
Modelo 1: dos funciones		0,74	<0,01
función Panticipado	0,029		
función Psiembra	0,045		
Modelo 2: una función	0,037	0,68	<0,01
Diferencia entre modelos*			0,18
Campaña 2010/11		Parámetros	
Modelo: $y=b.x$	b	$R^2$	$p$
Modelo 1: dos funciones		0,91	<0,01
función Panticipado	0,018		
función Psiembra	0,008		
Modelo 2: una función	0,013	0,70	<0,01
Diferencia entre modelos*			<0,01
* Una diferencia no significativa ( $p>0,05$ ) implica que no es necesario usar dos funciones (una para cada momento de aplicación) para representar la relación entre Respuesta (y) y dosis de P (x), lo que implica que las pendientes de las dos rectas no son distintas y, por lo tanto, no hay efecto del momento sobre la relación y vs. x.			



## 5. Recuperación del P

### 5.1. Recuperación del P aplicado a inicios del ciclo del cultivo

Los valores de concentración de P en V6 del ensayo de la campaña 2009-10 oscilaron entre 3,07 y 3,81 mg P g planta<sup>-1</sup> (Tabla 23). Estos valores son bastante coincidentes con los hallados por Mallarino et al., (2009) cuyos valores se encontraron en un rango de 3,6 y 4,1 g kg<sup>-1</sup> para un cultivo de maíz en similar estado fenológico. Los valores de concentración fueron bastante inferiores en el ensayo de la campaña 2010-11 y esto fue atribuido a un efecto de dilución, ya que las determinaciones se realizaron en un estado fenológico más avanzado. Por otra parte, cabe destacar que las concentraciones de nutrientes en planta son variables debido a que se encuentran influenciadas por diversos factores, tales como la genética, prácticas culturales (densidad de siembra, sistema de labranza, compactación del suelo, ajustes del pH, etc.) y condiciones ambientales (tales como la temperatura y humedad) (Munson & Nelson, 1990).

**Tabla 23** – Concentración y absorción de P en biomasa aérea de maíz en V6 (2009-10) y V8 (2010-11).

Campaña	Dosis (kg P ha <sup>-1</sup> )	Concentración de P mg P g <sup>-1</sup>			P absorbido kg P ha <sup>-1</sup>		
		Voleo		Línea	Voleo		Línea
		Anticipado	Siembra	Siembra	Anticipado	Siembra	Siembra
2009-10	0	3,28	3,28		3,67	3,67	
	10	3,21	3,23		3,87	4,52	
	20	3,31	3,52	3,07	4,82	5,33	5,44
	30	3,49	3,74		5,95	6,27	
	40	3,81	3,68		6,21	5,88	
2010-11	0	1,41	1,41		4,25	4,25	
	10	1,43	1,68		4,16	5,38	
	20	1,60	1,70	1,68	4,78	5,89	6,53
	30	1,68	1,71		5,92	5,56	
	40	1,80	1,82		6,77	7,73	

El agregado de dosis crecientes de P produjo aumentos significativos en la concentración de P en biomasa aérea de maíz en los ensayos de ambas campañas y no se detectó interacción con el momento de aplicación, ni efecto del momento de aplicación. Las dosis empleadas presentaron un efecto de tipo lineal (Tabla 24). Si bien no hubo diferencias significativas entre momentos de aplicación, las concentraciones de P fueron levemente superiores con las aplicaciones a la siembra (2,5 y 6,1% para los ensayos 2009-10 y 2010-11, respectivamente).

**Tabla 24** - ANVA de Concentración y absorción de P en biomasa aérea de maíz en V6 (2009-10) y V8 (2010-11).

	Concentración de P		P absorbido	
	Campaña 2009/10	Campaña 2010/11	Campaña 2009/10	Campaña 2010/11
	Valor <i>p</i>	Valor <i>p</i>	Valor <i>p</i>	Valor <i>p</i>
Momento (ant. vs. siembra)	0,42	0,26	0,27	0,11
Dosis				
Lineal	< 0,01	0,05	< 0,01	< 0,01
Cuadrático	0,77	0,91	0,08	0,30
Lack of fit	0,87	0,77	0,28	0,53
Dosis x Momento	0,39	0,60	0,36	0,63
Ubicación (voleo vs. línea)	0,048	0,89	0,83	0,48
Se realizaron contrastes para determinar los efectos de dosis, momento y su interacción y el efecto de la ubicación del fertilizante.				

Estos resultados coinciden con los hallados por Mallarino et al., (2009), quienes evaluaron el efecto de cinco dosis de P aplicados en dos momentos: barbecho y siembra en una red de diez ensayos en maíz y diez en soja en Iowa. De los resultados de esta red se pudo obtener una relación de tipo lineal entre la concentración de P en maíz y soja (en V5-V6) versus dosis y tampoco detectaron efecto del momento de aplicación ni interacción momento x dosis.

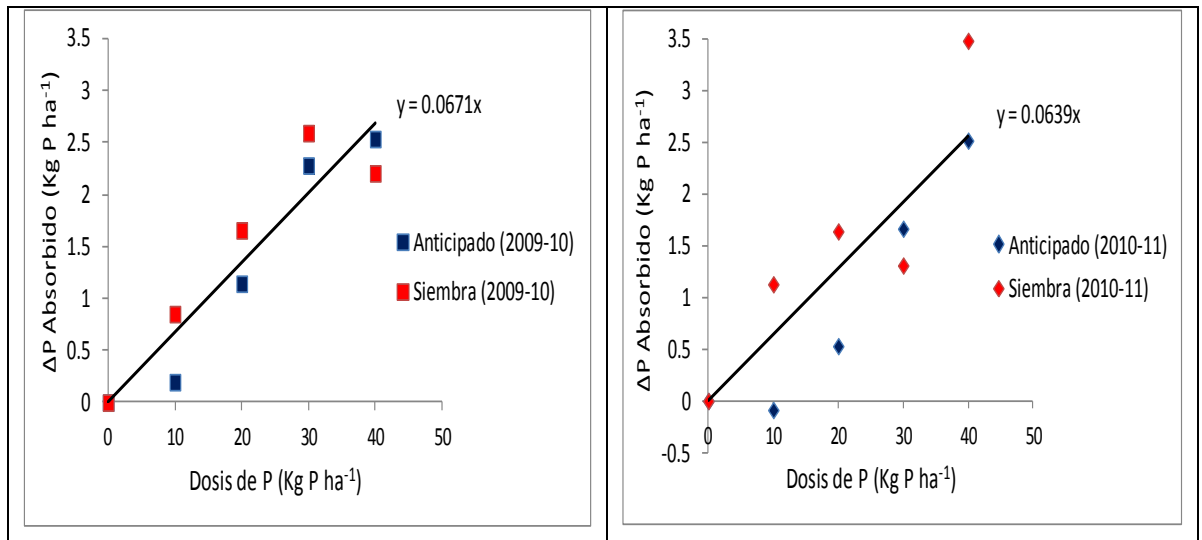
El agregado de dosis crecientes de P produjo aumentos significativos en la absorción de P en los ensayos de ambas campañas y no se detectó interacción con el momento de aplicación, ni efecto del momento de aplicación (Tabla 24). Si bien no hubo diferencias significativas, las absorciones de P fueron levemente superiores con las aplicaciones a la siembra (5,5 y 13% para los ensayos 2009-10 y 2010-11, respectivamente). Las dosis empleadas presentaron un efecto de tipo lineal en ambas campañas y una tendencia a un efecto cuadrático en la campaña 2009-10.

Los resultados de la absorción de P nuevamente coinciden con lo hallado por Mallarino et al. (2009). En esa misma red obtuvieron una relación lineal entre la absorción de P en maíz y soja (en V5-V6) en función de la dosis y tampoco detectaron efecto del momento de aplicación ni interacción con la dosis. En los resultados de los ensayos de Mallarino, la absorción de P en maíz aumentó linealmente hasta un plateau alcanzado en los 40 Kg P ha<sup>-1</sup> lo cual también coincide con la tendencia cuadrática de la absorción de P en función de la dosis hallada en el ensayo de la campaña 2009-10 de este trabajo.

Se calcularon las eficiencias medias de recuperación de P como la pendiente de la relación  $\Delta P$  absorbido (kg P ha<sup>-1</sup>) vs. P aplicado (kg P ha<sup>-1</sup>). Las ERP (Eficiencias de recuperación de P) fueron de 0,065 y 0,069 para la campaña 2009-10 y de 0,053 y 0,074 para la campaña 2010-11 para las aplicaciones anticipadas y a la siembra, respectivamente.

Para evaluar el efecto del momento de aplicación sobre las ERP, se compararon dos rectas forzadas a cero ( $\Delta P$  absorbido vs. dosis, una para cada momento de aplicación) contra una sola recta (común a ambos momentos de aplicación) (Figura 15). La comparación de regresiones arrojó que no hubo diferencias entre momentos de

aplicación en ninguno de los dos años, aunque se observó que las eficiencias fueron un 6 y 28% superiores con las aplicaciones a la siembra en las campañas 2009-10 y 2010-11, respectivamente (Tabla 25).



**Figura 15** – Incremento de P absorbido ( $\Delta P$  absorbido) en función de la dosis en V6 y V8 para las campañas 2009/10 y 2010/11, respectivamente. La pendiente representa la ERP.

**Tabla 25** - Relación entre el incremento de P absorbido ( $\Delta P$  absorbido) y la dosis de P en los experimentos de 2009/10 y 2010/11. Las pendientes representan las ERP. Comparación entre momentos de aplicación.

Campaña 2009/10		Parámetros	
Modelo: $y=b.x$	b	$R^2$	p
Modelo 1: dos funciones		0,89	<0,01
función Panticipado	0,065		
función Psiembra	0,069		
Modelo 2: una función	0,067	0,89	<0,01
Diferencia entre modelos*			0,68
Campaña 2010/11		Parámetros	
Modelo: $y=b.x$	b	$R^2$	p
Modelo 1: dos funciones		0,83	<0,01
función Panticipado	0,053		
función Psiembra	0,074		
Modelo 2: una función	0,063	0,77	<0,01
Diferencia entre modelos*			0,15

\* Una diferencia no significativa ( $p>0,05$ ) implica que no es necesario usar dos funciones (una para cada momento de aplicación) para representar la relación entre  $\Delta P$  absorbido (y) y dosis de P (x), lo que implica que las pendientes de las dos rectas no son distintas y, por lo tanto, no hay efecto del momento sobre la relación y vs. x.

## 5.2. Recuperación del P en Madurez Fisiológica

En el presente trabajo no fue hallado ocurrencia de consumo de lujo de P, es decir incrementos en la concentración de P en grano en función de las dosis cuando el rendimiento en grano ya no es afectado. Por el contrario, para la campaña 2010/11 fue hallado un efecto de dilución, es decir, disminuciones en la concentración de P en grano en función de las dosis (Tabla 26 y 27) cuando incrementaron los rendimientos (Tabla 14), en tanto que en la campaña 2009/10 se observó sólo una tendencia.

<b>Tabla 26 - Concentración de P en grano y rastrojo (mg g<sup>-1</sup>), P absorbido (grano + rastrojo) (kg P ha<sup>-1</sup>), P extraído (kg P ha<sup>-1</sup>) y Balance de P en maíz en MF.</b>									
Campaña 2009-10									
DosisP (kg ha <sup>-1</sup> )	Loc	M	P grano (mg P g <sup>-1</sup> )	Grano (kg ha <sup>-1</sup> )	P rastrojo (mg P g <sup>-1</sup> )	Rastrojo (kg ha <sup>-1</sup> )	P absorbido (kg P ha <sup>-1</sup> )	P extraído (kg P ha <sup>-1</sup> )	Balance (kg P ha <sup>-1</sup> )
0			1,072	10.804	0,298	10.131	14,61	11,6	-11,6
10	V	A	1,062	12.056	0,258	10.196	15,43	12,8	-2,8
20	V	A	1,039	11.477	0,246	14.353	15,45	11,9	8,1
30	V	A	0,999	12.206	0,296	12.229	15,81	12,2	17,8
40	V	A	0,951	12.351	0,325	10.794	15,25	11,7	28,3
10	V	S	1,023	11.826	0,276	10.224	14,92	12,1	-2,1
20	V	S	1,050	11.639	0,281	12.126	15,63	12,2	7,8
30	V	S	0,953	12.097	0,303	12.163	15,21	11,5	18,5
40	V	S	0,977	13.601	0,278	11.092	16,38	13,3	26,7
20	L	S	1,110	11.565	0,389	14.417	18,45	12,8	7,2
Campaña 2010-11									
DosisP (kg ha <sup>-1</sup> )	Loc	M	P grano (mg P g <sup>-1</sup> )	Grano (kg ha <sup>-1</sup> )	P rastrojo (mg P g <sup>-1</sup> )	Rastrojo (kg ha <sup>-1</sup> )	P absorbido (kg P ha <sup>-1</sup> )	P extraído (kg P ha <sup>-1</sup> )	Balance (kg P ha <sup>-1</sup> )
0			1,190	9.717	0,557	10.254	17,277	11,6	-11,6
10	V	A	1,121	9.852	0,569	9.944	16,697	11,0	-1,0
20	V	A	1,018	10.145	0,597	11.930	17,456	10,3	9,7
30	V	A	1,071	11.108	0,577	12.248	18,964	11,9	18,1
40	V	A	0,906	10.418	0,613	11.755	16,645	9,4	30,6
10	V	S	1,168	9.805	0,511	10.846	16,986	11,5	-1,5
20	V	S	1,044	10.723	0,579	10.968	17,546	11,2	8,8
30	V	S	1,030	10.887	0,638	12.886	19,437	11,2	18,8
40	V	S	0,859	11.360	0,597	12.971	17,497	9,8	30,2
20	L	S	1,182	11.558	0,519	12.423	20,111	13,7	6,3
V: voleo, L: línea, A: anticipado, S: siembra.									
P absorbido (kg P ha <sup>-1</sup> ) = P grano x grano + P rastrojo x rastrojo									
P extraído (kg P ha <sup>-1</sup> ) = P grano x grano									
Balance = Dosis de P aplicado como fertilizante – P extraído									

Los valores de concentración de P en grano ( $\text{mg gr}^{-1}$ ) oscilaron entre 0,951-1,110 y entre 0,859-1,190  $\text{mg gr}^{-1}$  para los ensayos de las campañas 2009-10 y 2010-11, respectivamente (Tabla 26). Estos valores se encuentran por debajo de los rangos informados por algunos autores ( $2\text{-}6 \text{ g kg}^{-1}$  por Munson y Nelson 1990,  $2.9 \text{ g kg}^{-1}$  por Mallarino y Prater 2007,  $2\text{-}2,5 \text{ g kg}^{-1}$  por Divito et al. 2010,  $2,8\text{-}3,4 \text{ g kg}^{-1}$  Berardo et al. 2003), pero dentro del rango de valores reportados por Setiyono et al., 2010. En esa base de datos (2.363 cultivos de maíz) las concentraciones variaron entre 0,55 a 5,15  $\text{mg P g}^{-1}$ , con lo cual los valores observados en este trabajo se encuentran dentro del rango del cuarto inferior de esta población (0,55 a 2,01  $\text{mg P g}^{-1}$ ). Una posible explicación a los valores hallados podría ser que los cultivos crecieron en condiciones deficitarias de P, reflejado por la baja disponibilidad del nutriente en el suelo (Tabla 1) y porque la respuesta no llegó a saturarse, aún con la dosis más alta de P.

La absorción de P (grano+rastrojo) ( $\text{kg P ha}^{-1}$ ) no fue afectada por el momento de aplicación ni por las dosis, así como tampoco se detectó interacción momento x dosis (Tabla 27). En las dos campañas evaluadas se observó una tendencia a mayores absorciones de P con las aplicaciones en la línea de siembra respecto a las aplicaciones al voleo (Tabla 26 y 27). Una explicación puede ser obtenida a partir del trabajo de Eghball y Sander (1989) en el cual estudiaron el efecto de la distancia y distribución del fertilizante fosforado aplicado en bandas sobre el crecimiento y la absorción de P en maíz en distintos estados fenológicos (7° y 10° hoja y madurez). En ese estudio hallaron una mayor absorción de P en planta cuando el P fue aplicado cerca de las plantas, lo cual fue atribuido a dos factores 1) el contacto de las raíces con el fertilizante ocurre en una etapa más temprana de crecimiento y por lo tanto el contacto es por un período de tiempo más prolongado y 2) la probabilidad de contacto raíz-fertilizante es mayor con distancias de aplicación más estrechas. De este modo, con las aplicaciones en línea el cultivo tendría más chances de absorber mayor contenido de P respecto a las aplicaciones al voleo. Cabe mencionar que estas tendencias de mayores absorciones de P con la ubicación en la línea de siembra también se habían registrado con el cultivo en V6, aunque habían sido de menor magnitud (Tabla 23).

**Tabla 27** - ANVA de Concentración de P en grano ( $\text{mg P g}^{-1}$ ) y absorción de P ( $\text{kg P ha}^{-1}$ ) (grano + rastrojo). Campañas 2009-10 y 2010-11.

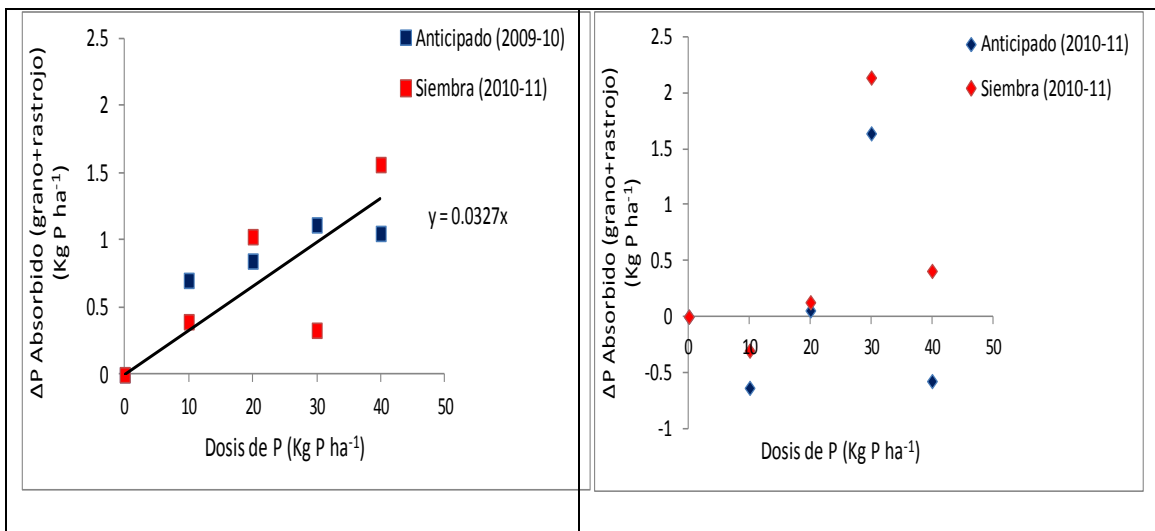
	Concentración de P en grano		P absorbido (grano+rastrojo)	
	Campaña 2009/10	Campaña 2010/11	Campaña 2009/10	Campaña 2010/11
	Valor <i>p</i>	Valor <i>p</i>	Valor <i>p</i>	Valor <i>p</i>
Momento (ant. vs. siembra)	0,81	0,95	0,89	0,50
Dosis				
Lineal	0,18	0,018	0,53	0,35
Cuadrático	0,88	0,68	0,89	0,08
Lack of fit	0,56	0,30	0,67	0,12
Dosis x Momento	0,94	0,84	0,93	0,89
Ubicación (voleo vs. línea)	0,55	0,32	0,06	0,05
Se realizaron contrastes para determinar los efectos de dosis, momento y su interacción y el efecto de la ubicación del fertilizante.				

Se calcularon las eficiencias medias de recuperación de P como la pendiente de la relación  $\Delta P$  absorbido vs. dosis. Las ERP para la campaña 2009-10 fueron de 0,033 y 0,032 para las aplicaciones anticipadas y a la siembra, respectivamente (Tabla 28). Para la campaña 2010-11 el P absorbido presentó un comportamiento errático con las dosis con lo cual no fue posible determinar una eficiencia media, por ese motivo se hizo un cálculo de las ERP para cada dosis. Los resultados arrojaron que las ERP para esa campaña oscilaron entre -0,064 y 0,071 sin poder diferenciar entre momentos de aplicación (Figura 16 y Tabla 29).

**Tabla 28-** Relación entre  $\Delta P$  Absorbido ( $\text{kg P ha}^{-1}$ ) y la dosis de P en el experimento de 2009/10. Comparación entre momentos de aplicación.

Campaña 2009/10	Parámetros		
Modelo: $y=b.x$	b	$R^2$	p
Modelo 1: dos funciones		0,62	0,02
función Panticipado	0,032		
función Psiembra	0,033		
Modelo 2: una función	0,032	0,62	<0,01
Diferencia entre modelos*			0,92

\* Una diferencia no significativa ( $p>0,05$ ) implica que no es necesario usar dos funciones (una para cada momento de aplicación) para representar la relación entre  $\Delta P$  Absorbido (y) y dosis de P (x), lo que implica que las pendientes no son distintas y, por lo tanto, no hay efecto del momento sobre la relación y vs. x.



**Figura 16** – Relación entre  $\Delta P$  absorbido en MF vs. dosis. La pendiente representa la ERP.

En la campaña 2009-10 la comparación de regresiones de  $\Delta P$  absorbido vs. dosis arrojó que las ERP no difirieron entre momentos de aplicación (Tabla 28).

**Tabla 29** - Valores de ERP marginal y de error estándar para cada una de las dosis.

Dosis (kg P ha <sup>-1</sup> )	2009-10				2010-11			
	Anticipado		Siembra		Anticipado		Siembra	
	ERP	Error	ERP	Error	ERP	Error	ERP	Error
10	0,070	0,10	0,039	0,14	-0,064	0,07	-0,030	0,09
20	0,042	0,04	0,051	0,04	0,003	0,08	0,006	0,06
30	0,037	0,03	0,011	0,06	0,055	0,02	0,071	0,07
40	0,026	0,04	0,039	0,05	-0,014	0,04	0,010	0,02

Como se mencionó antes, en la campaña 2009-10 las ERP no difirieron entre momentos de aplicación. Las escasas diferencias observadas entre momentos de aplicación en el contenido de P disponible del suelo a inicios del ciclo del cultivo (Tabla 18 y 19) no fueron suficientes para que el cultivo a lo largo del ciclo absorbiera cantidades diferenciales de P (Tabla 26) y como consecuencia se obtuvieron similares ERP en MF (Figura 16 y Tabla 28).

Las ERP de este trabajo fueron bajas; una razón es el método de cálculo empleado (Método de la diferencia). Con este método la ERP se calcula como: [(absorción del cultivo con x – absorción del cultivo sin x) / cantidad de x] \* 100, donde x: cantidad de P aplicado. Esta forma de cálculo asume que todos los tratamientos absorben la misma cantidad de P del suelo, supuesto que no siempre se cumple. Lo que pudo haber sucedido es que los tratamientos no fertilizados extendieron más su sistema radical como respuesta al déficit de P y por lo tanto pudieron absorber más P del suelo, subestimando el cálculo de recuperación de P del fertilizante por parte de los tratamientos fertilizados. Un dato que respalda esta explicación es que, según este cálculo, en V6 el cultivo había absorbido el 6,5% del P del fertilizante (Figura 15) y a cosecha había absorbido la mitad o menos (3,2%, Figura 16), lo cual es incoherente y la explicación lógica que se encontró fue que los cultivos con déficit de P a lo largo del ciclo continuaron extendiendo su sistema radical causando una reducción aún mayor de la ERP calculada por este método. Existen trabajos que avalan lo antes mencionado. Por ejemplo Gutierrez Boem y Thomas (1999) realizaron un ensayo en soja con tres niveles de P y con y sin irrigación y hallaron que la densidad de raíces en la capa más superficial del suelo (5-12 cm) se incrementó en respuesta a la baja disponibilidad de P y el estrés de agua en un 23 y 21%, respectivamente. En este trabajo, con baja disponibilidad de P se registraron mayores relaciones raíz/tallo, debido a la mayor reducción del crecimiento de la parte aérea respecto a las raíces. En otro estudio Rubio et al., (2013) realizaron un ensayo en macetas con soja, maíz y girasol con tres niveles de P. Sus resultados mostraron que con los niveles de bajo y medio P se indujeron situaciones de severo estrés que determinaron que las plantas de maíz y girasol modificaron su patrón de translocación de asimilados, incrementando la acumulación de biomasa en la parte subterránea de manera de favorecer la adquisición del recurso más limitante.

García et al. (2009), utilizando el mismo método, obtuvieron valores de ERP para maíz en el rango de 0,07 a 0,23 en ensayos pertenecientes a la red CREA de la región Sur de Santa Fe. Divito et al. (2010) realizaron un trabajo sobre un Paleudol

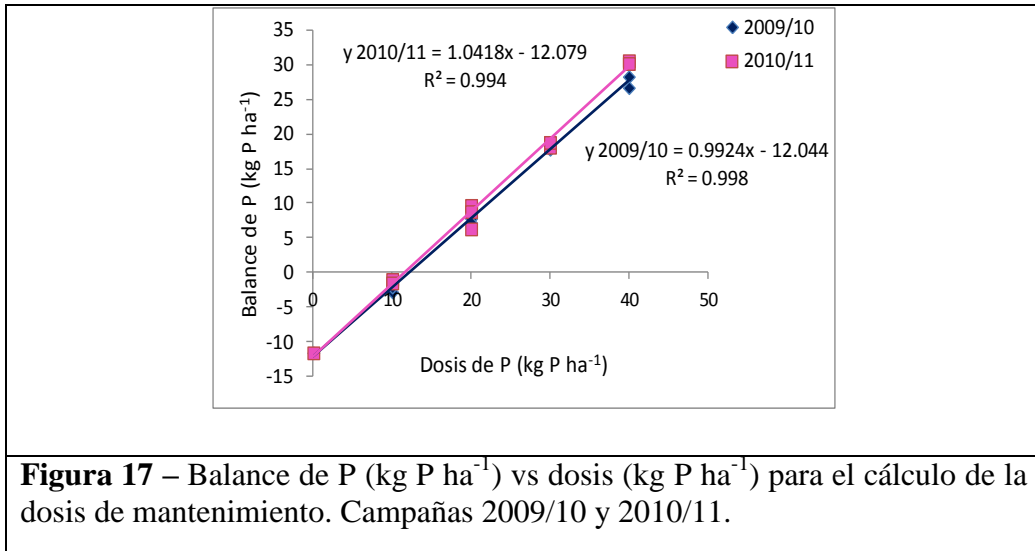
Petrocálcico en el Sudeste bonaerense en el cual realizaron aplicaciones de P anuales y en la rotación (es decir, el primer año) en los cultivos de maíz, soja y trigo/soja. Los valores de ERP hallados fueron de 0,03 y 0,13 para las aplicaciones anuales y en la rotación, respectivamente. Estos valores son más próximos a los obtenidos en el presente trabajo. Sin embargo, Divito et al. (2010) indicaron que estas eficiencias son bajas y lo atribuyeron a que el nivel inicial de P fue alto ( $28 \text{ mg kg}^{-1}$ ), lo cual determinó que los cultivos fertilizados utilizaron el P edáfico en una alta proporción.

Como se mencionó antes los resultados de la recuperación de P son dependientes del método de cálculo empleado. Además del método de la diferencia existe otro método para el cálculo de la ERP, que fue desarrollado por Syers et al. (2008) y que fue llamado método del Balance, donde  $\text{ERP} = (\text{remoción de P por el cultivo fertilizado/cantidad de P aplicado}) \times 100$ . El fundamento para el uso de este método es que tiene en cuenta la recuperación del P de las reservas del suelo (P nativo y residual). Con este método los porcentajes de recuperación son muy superiores a los de la diferencia y oscilan entre el 50-90%. Sin embargo, un reciente trabajo de Chien et al., (2012) cuestionan este método del balance argumentando que al no tener en cuenta un testigo de absorción de P se realiza una sobreestimación de la recuperación ya que se están considerando las fracciones nativas y residuales de P del suelo, por lo que sugieren que el valor determinado por este método no debería ser considerado como la “eficiencia de recuperación del fertilizante P” sino que el término más apropiado sería “eficiencia en el uso del P”. Por otro lado, el trabajo de Chien et al., (2012) propone que la ecuación de balance podría ser usada para monitorear el balance de P del suelo, es decir, si las reservas de P del suelo se están agotando o si hay una reconstrucción o mantenimiento. Para esto habría que hacer un ajuste en la fórmula de balance calculando su inversa, ya que otra limitante del método es que conduce a valores infinitos con dosis de aplicación igual a cero.

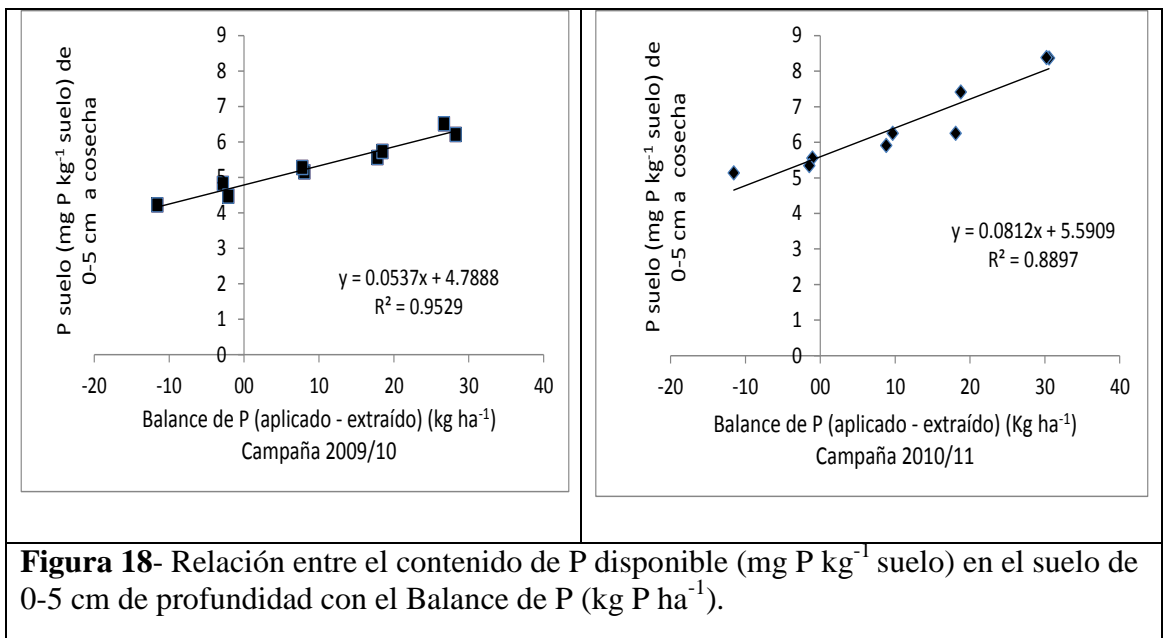
## 6. Balance de P

Los balances de P fueron negativos para los testigos y la dosis más baja de P, en tanto que se obtuvieron balances positivos para el resto de las dosis (Tabla 26). Las diferencias en los balances se deben a las diferencias en los aportes (dosis de fertilizante) y en los rendimientos, ya que como mencionara Mallarino y Prater (2007), la variación del nivel del rendimiento es mucho más importante que la concentración de P en grano cuando se desea determinar la remoción (extracción) de P del cultivo. Los balances de P se relacionaron en forma lineal con las dosis. Las dosis con las que se alcanzó un balance igual a cero fueron de 12,1 y 11,5  $\text{kgP ha}^{-1}$  para las campañas 2009/10 y 2010/11, respectivamente.





Los cambios en el P disponible en el suelo al momento de la cosecha se relacionaron con el balance de P del cultivo, lo cual permite medir la tasa de cambio en función de la extracción o reposición del nutriente (Figura 18). La inversa de la pendiente que relaciona estos parámetros indica la dosis de P que es necesario agregar para variar en 1 ppm la disponibilidad del nutriente en el suelo. En función de esto, por cada 18,62 y 12,31  $\text{kg P ha}^{-1}$  de diferencia entre agregado y extraído, el nivel de P en el suelo cambiaría en una unidad para las campañas 2009/10 y 2010/11, respectivamente. Las pendientes y las ordenada al origen de estas rectas difirieron significativamente entre años ( $p < 0,05$ ).



Ferraris et al., (2012) realizaron un estudio de larga duración con distintas estrategias de fertilización que involucró una rotación con ocho cultivos en seis campañas en el cual, además de medir distintas variables, relacionaron los balances de P con la disponibilidad de este elemento en el suelo a cosecha de 0-20 cm de profundidad.

Los resultados arrojaron que por cada  $6,75 \text{ kg P ha}^{-1}$  de diferencia entre agregado y extraído, el nivel de P en el suelo cambiaba en una unidad, lo cual es un valor bastante inferior al hallado en este trabajo. La explicación a esto podría ser lo explicado por Ferraris en el estudio en el cual señalaron que a inicios de la rotación la cantidad de P necesaria para hacer variar en  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  el contenido de P había sido superior (hasta  $11,9 \text{ Kg P ha}^{-1}$ ) y lo atribuyeron a que en el transcurso de la rotación había ocurrido una acumulación en el suelo de las fracciones más lábiles de P, las cuales compiten con el P del fertilizante por los sitios de adsorción generando una disminución de la fijación del fertilizante fosforado y de esta manera se producirían ganancias más elevadas del P disponible.

Ciampitti et.al. (2011) en una red de ensayos de largo plazo realizada en siete sitios del sudeste de Santa Fe con dos rotaciones agrícolas definidas (maíz- trigo/soja y maíz-soja-trigo/soja) también establecieron relaciones entre el contenido de P Bray en el suelo vs. balance de P. En este trabajo separaron a los sitios en dos grupos en función de su contenido de P inicial del suelo. En el grupo I estuvieron los suelos con un contenido de  $P < 25 \text{ ppm}$  y en el grupo II los suelos con un contenido de  $P > 40 \text{ ppm}$ . Las pendientes de la relación P suelo vs. balance de P fueron de  $0,37$  y  $0,0068 \text{ mg P kg}^{-1}$ , lo cual significa que para aumentar el contenido de P en  $1 \text{ ppm}$  es necesario un balance de  $2,7$  y  $147 \text{ kg P ha}^{-1}$  para el grupo I y II, respectivamente. La variabilidad de estas pendientes así como las del trabajo citado antes, son muy variables lo cual indica que este tipo de relación no son muy estables como para determinar las cantidades de fertilizante necesario para elevar el contenido de P del suelo.

A diferencia de lo hallado aquí, Divito et al., (2010) en un estudio de estrategias de fertilización fosforada en una rotación de cultivos en el sudeste bonaerense detectaron una débil asociación entre la variación anual de la concentración de P Bray y el Balance de P del cultivo ( $r^2:0,40$ ), observándose una mayor dispersión de los datos cuando el balance de P fue negativo. En ese sentido, argumentaron que en la medida que se incrementa el nivel inicial de P disponible los aumentos en el P Bray por unidad de P aplicado son mayores, debido a una saturación en los sitios de adsorción y en tanto que cuando el nivel inicial de P disponible es bajo no se manifiestan grandes cambios con balances negativos del nutriente debido a que ocurre un flujo de P desde fracciones menos lábiles.

Mallarino y Prater (2007) realizaron un estudio con cierta similitud, en el cual relacionaron la remoción de P en grano (en lugar del balance) con la reducción del contenido de P disponible (P Bray). Sus resultados indicaron que una remoción de  $22,8 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  se correspondieron con una reducción de  $1 \text{ ppm P año}^{-1}$ .

Este tipo de análisis resulta conveniente ser realizado en estudios de rotaciones o de largo plazo, ya que como mencionan Mallarino y Prater (2007) las buenas correlaciones entre remoción de P y cambio en el contenido de P disponible en el suelo se obtienen en el largo plazo pero no el corto, debido a la influencia del ciclado del P de los residuos y debido a la variabilidad temporal y espacial del contenido de P del suelo.

Como conclusión, en lo que respecta a las relaciones contenido de P disponible en el suelo ( $\text{mg P kg}^{-1}\text{suelo}$ ) vs. Balance de P ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) halladas en este trabajo, se puede decir que los resultados hallados aquí deben ser tomados sólo como orientativos y que resultan difíciles de comparar con otros datos de la bibliografía debido a que presentan ciertas limitantes, como son: 1) son valores obtenidos a partir de

ensayos de un solo año y no de rotaciones con lo cual existen ciertas dificultades en los cálculos del verdadero valor de balance de P suelo, por ejemplo debido a que no está cuantificado el retorno de P al suelo por la mineralización de los residuos y 2) la profundidad de muestreo del P Bray en este análisis fue de 0-5 cm, a diferencia de los presentes en la bibliografía en los cuales la cuantificación se realiza de 0-20 cm.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Las hipótesis de trabajo de este estudio eran que la fertilización anticipada no iba a provocar una disminución en la recuperación del fósforo agregado por mayor fijación (debido al mayor tiempo de contacto del P agregado con el suelo) porque los suelos de la región tienen baja capacidad de fijación de P (Hipótesis 1). Por el contrario, se esperaba que la aplicación anticipada generara una mayor disponibilidad de P al comienzo del ciclo del cultivo que las aplicaciones a la siembra (ambas al voleo sin incorporación) por el mayor tiempo disponible para que el P aplicado ingrese al suelo (Hipótesis 2). Esta mayor disponibilidad inicial provocaría un mayor crecimiento inicial (similar a lo observado en aplicaciones en bandas incorporadas cerca de la semilla a la siembra), lo cual no necesariamente implica un mayor rendimiento y recuperación de P agregado (Hipótesis 3).

A partir de los resultados de las experiencias realizadas durante los tres años de ensayo, fue posible extraer las siguientes conclusiones:

A inicios del ciclo del cultivo el agregado de P incrementó el contenido de P disponible en el suelo fundamentalmente en la capa más superficial (0 a 5 cm). Para elevar la disponibilidad de P en  $1 \text{ mg P kg}^{-1}$  suelo en los primeros 20 cm del suelo, se requirieron entre 9 y  $11 \text{ kg P ha}^{-1}$ . En forma opuesta a lo esperado se observó una tendencia a mayores contenidos de P disponible con las aplicaciones a la siembra respecto a las anticipadas de 0 a 5 cm de profundidad, lo cual fue atribuido a que ocurrieron procesos de adsorción, aunque de escasa magnitud. Por lo tanto se rechazó la hipótesis acerca de que la fertilización anticipada generaría una mayor disponibilidad de P al comienzo del ciclo del cultivo (Hipótesis 2). En consecuencia, no fueron observadas diferencias en el crecimiento inicial del cultivo por efecto del momento de aplicación del fertilizante, por lo tanto se rechazó parcialmente la Hipótesis 3.

Las eficiencias de recuperación aparente del P aplicado (ERP) en esta etapa fenológica no difirieron según momento de aplicación. Esto sugiere que las pequeñas diferencias halladas en el contenido de P disponible en el suelo no fueron un factor determinante en la recuperación del fertilizante, por lo tanto se aceptó la Hipótesis 1 propuesta en este trabajo, en la cual se postula que la fertilización anticipada no provoca una disminución en la recuperación del P por mayor fijación en suelos de baja capacidad de fijación de P como son los Hapludoles típicos de textura franco arenosa.

La fertilización fosforada presentó una residualidad que se manifestó por los incrementos en el contenido de P disponible medidos al momento de la cosecha. Los contenidos de P disponible medidos en ese momento, no difirieron según el momento de aplicación en ninguna de las profundidades evaluadas. Esto sugiere que el efecto de residualidad sobre los cultivos siguientes de la rotación no serán afectados por el momento de aplicación del fertilizante.

Las aplicaciones anticipadas de P presentaron similares rendimientos que las aplicaciones a la siembra. Esto sugiere que en suelos con baja capacidad de fijación de P podrían esperarse similar eficiencia en estrategias que anticipen la aplicación de P en cobertura como en aquellas en que el fertilizante es colocado al momento de la siembra.

Sin embargo, la relación respuesta en rendimiento anticipado vs siembra presentó una pendiente significativamente menor que uno, indicando que las respuestas tenderían a ser levemente superiores con las aplicaciones a la siembra, con la dosis más alta de P aplicada. En función de la ausencia de diferencias en los rendimientos, las eficiencias en el uso del P (EUP) no variaron según el momento de aplicación; sin embargo con las aplicaciones a la siembra las eficiencias fueron, en promedio para los tres años de estudio, un 26% superior respecto a las aplicaciones anticipadas.

Respecto a los rendimientos obtenidos, un punto interesante a mencionar en este trabajo es que las respuestas en rendimiento del cultivo no llegaron a un plateau (es decir, que los rendimientos continuaron incrementándose aún con las dosis más altas) en ninguno de los tres experimentos, a pesar que se usaron dosis de hasta  $40 \text{ kg P ha}^{-1}$ , lo cual representa una dosis que es más del doble de lo que habitualmente emplean los productores de la región.

Los valores de ERP al momento de la cosecha fueron muy bajos. Esto se debería a que no se cumplió el supuesto de igual absorción de P del suelo por parte de los tratamientos testigo y fertilizados que asume el Método de la diferencia, generando una subestimación de los resultados obtenidos en los cálculos.

Respecto a la ubicación del fertilizante, los rendimientos con las aplicaciones de P en cobertura no difirieron de las aplicaciones en línea de siembra. Sólo durante la campaña 2010-11, hubo una tendencia a que los rendimientos con las aplicaciones en línea superen a las aplicaciones en cobertura, lo cual fue atribuido a las escasas precipitaciones durante ese año. Por lo tanto se podría esperar que en años con déficits hídricos durante inicios del ciclo del cultivo se generen diferencias en el crecimiento que no alcancen a revertirse al final del ciclo.

A partir de las experiencias de estos tres años de ensayos surge el interrogante si con el agregado de dosis elevadas de P (más de  $30 \text{ kg P ha}^{-1}$ ) las aplicaciones a la siembra son más eficientes que las anticipadas. Debido al reducido número de ensayos realizados en este trabajo, se ha observado que existe una tendencia a que las aplicaciones a la siembra sean más eficientes que las anticipadas cuando se emplean dosis altas de P, por encima del rango de dosis habitualmente usado por los productores, pero esto no ha podido ser confirmado con la evidencia experimental que se dispone. Es importante señalar que este efecto de dosis ha podido ser detectado gracias a que en estos experimentos se ha empleado un gradiente de dosis, a diferencia de los trabajos preexistentes en los cuales habitualmente la comparación entre momentos de aplicación se realizaron con una sola dosis. A raíz de ésto en la bibliografía existen pocos antecedentes acerca de este efecto, lo cual constituye un punto innovador de este trabajo.

### **Consideraciones finales**

A raíz de los resultados obtenidos, surge la necesidad de continuar con experimentación de campo a fin de estudiar que sucede con las aplicaciones anticipadas en otros suelos de la Región Pampeana, como los Argiudoles típicos y vérticos de la Pampa Ondulada cuyas características físico-químicas probablemente determinarían un comportamiento diferente de esta práctica.

Para concluir, la aplicación anticipada de P tres meses antes de la siembra ha resultado una práctica eficiente en Hapludoles típicos que permiten salvar algunos inconvenientes que surgen a la hora de fertilizar al momento de la siembra como son: autonomía de la sembradora, dosis de P a agregar y logística en el transporte del fertilizante.

## BIBLIOGRAFÍA

Amanullah, Muhammad, Z., Muhammad T., Khalid, N., Amirzaman, K., Farhatullah, Zahir, S., Amanullah, N., Shad K., Muhammad, T., M.Sajids, Zahid, H., and Hidyat, U.R. 2010. Levels and time of phosphorus application influence growth, dry matter partitioning and harvest index in maize. *Pakistan Journal of Botany.*, 42(6): 4.051-4061.

Barbagelata, P. A. y R. J. M. Melchiori. 2008. Efecto de la forma de aplicación del fósforo sobre el rendimiento de trigo en Entre Ríos. VII Congreso Nacional de Trigo, Santa Rosa, La Pampa.

Barbagelata, P.A. 2011. Fertilización fosfatada para trigo y maíz en siembra directa: diagnóstico de la fertilidad y estrategias de fertilización. Simposio Fertilidad 2011. La nutrición de cultivos integrada al sistema de producción. 18 y 19 de mayo de 2011, Rosario. p.: 90-97.

Barbieri, P. A.; H. E. Echeverría, H. R Sañz Rozas. 2006. Métodos de colocación de fósforo en el cultivo de maíz bajo siembra directa. Actas del XX congreso de la AACS. Salta, Argentina.

Barrow, N.J. 1973. Relationship between a soil's ability to absorb phosphate and residual effectiveness of supersulphate. *Australian Journal of soil research*, 11, 57-63.

Barrow, N.J. 1998. The four laws of soil chemistry: the Leeper lecture. *Australian Journal of Soil Research*. 12 August 1999. Vol. 37.

Berardo, A., Ehrt, S., Grattone, F., Amingorena, M. 2003. Evaluación de la respuesta a fósforo de los cultivos estivales: maíz, girasol y soja. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, N° 18, Junio 2003.

Bianchini A. 2003. Localización de fósforo en siembra directa. Simposio "El fósforo en la agricultura argentina". Rosario, 8 y 9 de mayo de 2003. INPOFOS Cono Sur. Acassuso. Buenos Aires, Argentina.

Bianchini A., A. Silvestre Begnis, J. Rabasa, M.E. Magnelli, S. Lorenzati, D. Peruzzi, L. Pierella, H.E. Echeverría y F.O. García. 2006. Localización de fósforo en la rotación trigo/soja-maíz en siembra directa en la Región Pampeana. (CD Rom). Actas del XX Congreso de la AACS. Salta, Argentina.

Bolsa de Cereales. En: *Nuevo ABC Rural S.A.* 7 Marzo de 2010. Año VII. N°105. p. 17.

Bolsa de Cereales. 2013. En: [www.bolcereales.com.ar](http://www.bolcereales.com.ar)

Bono, A. y Barraco, M., 2005. Momentos y formas de aplicación de fósforo en maíz bajo siembra directa: en el oeste y noroeste bonaerense. Campaña 2004/05. *Cosecha Gruesa*. Cap. 11. p 43-53.

Bordoli, J.M. y A. Mallarino. 1998. Deep and shallow banding phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. *Agron.J.* 90: 27-33.

Bray, R.H.; Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic and available form of phosphorus in soil. *Soil Sci* (59), 29-45.

Cabello, M.J., F.H. Gutiérrez Boem, G. Rubio. Efecto de la fertilización fosforada sobre la variación anual del fósforo disponible en suelos de la Región Pampeana. Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 13 al 16 de mayo de 2008. Potrero de los Funes (SL), Argentina. pp: 238.

Calderaro, F. y Gutiérrez Boem, F.H. 2009. Momento y ubicación de fósforo en el cultivo de maíz. Tesis para optar al título de Especialista en Fertilidad de Suelos y Fertilización. Escuela para Graduados "Alberto Soriano", Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.

Caparelli, C.E., 2008. Extracción de nutrientes. CIAFA, Agosto de 2008. [www.ciafa.org.ar](http://www.ciafa.org.ar).

Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3560 – 7 y 8 L.N Alem – Junín. 1980. Instituto Nacional de tecnología Agropecuaria. Centro de Investigación de Recursos Naturales. Reconocimiento de Suelos.

Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3560 – 13 Bayauca. 1980. Instituto Nacional de tecnología Agropecuaria. Centro de Investigación de Recursos naturales. Reconocimiento de Suelos.

Chien, S.H., F.J. Sikora, R.J. Gilkes and M.J. McLaughlin. 2012. Comparing of the difference and balance methods to calculate percent recovery of fertilizer phosphorus applied to soils: a critical discussion. *Nutr Cycl Agroecosyst* 92: 1-8.

Ciampitti, I.A., García, F.O., 2008. Citado por M. García, 2009 en Producción de granos y consumo de fertilizantes. [http://www.sagpya.mecon.gov.ar/SAGPyA/agricultura/agua\\_y\\_suelos/05-fertilizantes/panorama.pdf](http://www.sagpya.mecon.gov.ar/SAGPyA/agricultura/agua_y_suelos/05-fertilizantes/panorama.pdf).

Cruzate, G.A., y Casas, R. 2009. Extracción de nutrientes en la agricultura Argentina. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. Diciembre de 2009. 44: 21- 26.

Darwich, N. 1998. Fósforo un nutriente esencial para las plantas. En: *Manual de fertilidad de suelos y uso de fertilizantes*. p. 65-94. ISBN 950-43-9178-8. Mar del Plata, Argentina.

Divito, G.A., Sainz Rozas, H., Echeverría, H.E. 2010. Estrategias de fertilización fosforada en una rotación de cultivos en el sudeste bonaerense. *Ci. Suelo (Argentina)* 28 (1): 47-55.

Eghball B., Sander D.H. (1989) Distance and distribution effects of phosphorus fertilizer on corn. *Soil Science Society of America Journal* 53:282-287.

Fariña Núñez, J.R., 1997. Soja, la importancia de la ubicación del fertilizante. *Revista Fertilizar* N° 8. p 4-7.

Ferrari, M., 2009. Las MPM para los Cultivos y Sistemas de Producción. Maíz en la Región Pampeana Central. En: *Simposio de Fertilidad 2009*. Rosario, Santa Fe, Abril 2009. IPNI Cono Sur –Fertilizar Asociación Civil.



Ferrari, M.; J. Ostojic; L. Ventimiglia; H. Carta; G. Ferraris; S. Rillo; M.L. R. de Galetto y F. Rimatori, 2000. Fertilización de maíz: buscando una mayor eficiencia en el manejo del nitrógeno y el fósforo. En: Jornada de Actualización Técnica para Profesionales Fertilidad 2000, pp. 23-27. Rosario, Santa Fe, Abril 2000. INPOFOS Cono Sur, Acassuso.

Ferraris, G.N., F. Mousegne, C. Álvarez, M. Barraco, J.J. Cavo, L. Couretot, F. Gutiérrez Boem, E. Lemos, M. López de Sabando, C. Ojuez, A. Paganini, G. Pérez, R. Pontoni, L. Torrens Baudrix, C. Scianca, R. Sciolotto, R. Solá, G. Tellería, L. Ventimiglia. 2010. Dosis y localización de fuentes fosforadas En: Trigo en Siembra Directa. Campaña 2009/10. ISSN 1850-0633. AAPRESID.

Ferraris, G.N., Toribio, M., Falconi, R. y Couretot, L. 2012. Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos, el balance de nutrientes y su disponibilidad en los suelos. Sexto año de experimentación. Soja campaña 2011/12. Informe del convenio de Vinculación Tecnológica INTA-Profertil. 11 pp.

García, F.O. 2001. Balance de fósforo en suelos de la región pampeana. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 9:1-3.

García, F.O.; L.I. Picone y A. Berardo. 2006. Fósforo. Pág. 99-121. *En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de cultivos.* Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.

García, F.O, I.A. Ciampitti, G. Rubio, L.I. Picone. 2009. La fertilización fosfatada en la Argentina: Actualidad, Manejo y Perspectivas. Presentado en las Jornadas Nacionales “Sistemas Productivos Sustentables: Fósforo, Nitrógeno y Cultivos de Cobertura”, organizadas por la AACS en Bahía Blanca, 10 y 11 de Agosto de 2009.

Giuffré, L. 1989. Índices de sorción de fósforo y su relación con algunas propiedades de los suelos. *Ciencia del suelo. Volumen 7. N° 1-2, 1989: 43-50.*

Gutiérrez Boem, F.H., Thomas, G.W. 1999. Phosphorus nutrition and water deficits in field – grown soybeans. *Plant and Soil, 207: 87-96.*

Gutiérrez Boem, F.H., C.A. Alvarez, M.J. Cabello, P.L. Fernández, P. Prystupa & M.A. Taboada. 2008. Phosphorus retention on soil surface of tilled and no-tilled soils. *Soil Science Society of America Journal, 72: 1158-1162.*

Hall, A.J., C.M. Rebella, C. Ghersa, and J.P. Culot. 1992. Field-crop systems of the Pampas. p. 413-450. In C.J. Pearson (ed.) *Field crop ecosystems.* Elsevier, Amsterdam.

ILSI Argentina. 2006. Maíz y Nutrición. Informe sobre los usos y propiedades nutricionales del maíz para la alimentación humana y animal. Recopilación del ILSI Argentina. Serie de Informes Especiales. Volumen II, octubre de 2006.

Jackson, M. 1982. Análisis químico de suelos. Omega. 4 ed. Barcelona, España. 662 pp.

Johnston, A.E., K. Syers. Enero 2010. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica N° 76. Pág. 17-20.*

Kaiser, D.E, Mallarino, A.P., and Bermudez, M. 2005. Fertilizer Management. Corn Grain Yield, Early Growth, and Early Nutrient Uptake as Affected by Broadcast and In-Furrow Starter Fertilization. *Agron. J.* 97: 620-626.

Kitchen, N.R.; J.L. Havlin y D.G. Westfall, 1990. Soil sampling under no-till banded phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*, 54(6):1661-1665.

Mallarino, A., 1997. Manejo de fósforo, potasio y starters para maíz y soja en siembra directa. 5° Congreso Nacional de AAPRESID. Mar del Plata. p. 11-19.

Mallarino; A. P.1998. Métodos de fertilización con fósforo y potasio para maíz y soja en siembra directa: recientes avances en el cinturón del maíz. 6° Congreso Nacional de AAPRESID. Mar del Plata, Agosto 1998. 27-41pp.

Mallarino, A.P., Prater, J. 2007. Corn and soybean grain yield, phosphorus removal, and soil-test responses to long-term phosphorus fertilization strategies. *Integrated Crop Management Conference – Iowa State University*. Pag 241-253.

Mallarino,A.P., S.R. Barcos, J.R. Prater., and D.J.Wittry. 2009. Timing of broadcast phosphorus fertilization for no-till corn and soybean. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:2143-2150.

Montoya, J., A. Bono, A. Suárez, N. Darwich y F. Babinec. 1999. Cambios en el contenido de fósforo asimilable en suelos del este de la provincia de La Pampa, Argentina. *Ciencia del Suelo* 17:45-48.

Munson, R.D. and Nelson, W.L. 1990. Chapter 14: Principles and Practices in Plant Analysis. *Soil Science Society of America*, 677 S.Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. *Soil Testing and Plant Analysis*, 3rd ed.- SSSA Book Series, no.3.

Murphy, J. and Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 27: 31-36.

Oliverio, G. y López, G., 2008. “Fertilizantes para la próxima década” 2008. XVII Seminario Anual Fundación Producir Conservando. Setiembre de 2008.

Pavinato, P.S. & Rosolem, C.A. 2008. Revisão de literatura. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. 2008. *Revista Brasileira Ci.Solo*, 32: 911-920.

Roberts, T.L., 2007. Right product, right rate, right time, and right place...the foundation of BMPs for fertilizer. *Better Crops with Plant Food*, 91(4):14-15.

Rubio, G., Cabello, M.J., Kay, F.H., Munaro, E. 2008. Estimating Available Soil Phosphorus Increases after Phosphorus Additions in Mollisols. *Soil Sci.Soc. Am. J.* 72: 1721-1727.

Rubio, G., Gutierrez Boem, F.H., and Fernandez, M.C. 2013. Severe Phosphorus Stress Affects Sunflower and Maize but Not Soybean Root to Shoot Allometry. *Agronomy Journal*. Volume 105, Issue 5: 1283-1288.

SAGPyA. 2010. <http://www.siaa.gov.ar/index.php/series-por-tema/agricultura>

Sainz Rozas H. y H.E. Echeverria. 2008. Relevamiento de la concentración de fósforo asimilable en suelos agrícolas de la Región Pampeana y Extrapampeana. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 13 al 16 de mayo de 2008. Potrero de los Funes (San Luis), Argentina.

Scoppa C. 1975. La mineralogía de los suelos de la llanura pampeana en la interpretación de su génesis y distribución. Presentado en la VII Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Diciembre de 1975.

Setiyono T.D., D.T Walters, K.G. Cassman, C.Witt and A. Dobermann. 2010. Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crops Research*, 118: 158-168.

Vázquez, M., E. Noellemeyer, y P.Coremberg. 1991. The dynamics of different organic and inorganic phosphorus fractions in soils from south of Santa Fe, province, Argentine. *Commun. Soil.Sci. Plant Anal.* 22 (11-12): 1151-1163.

Vázquez, M.E. 2002. Balance y fertilidad fosforada en suelos productivos de la región pampeana. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 16: 3-7.

Walkley, A & I Black. 1934. An examination of the Degtjareff method and a proposed modification of the chromic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 34: 29-38.

**ANEXO**

## Balances hídricos

**Tabla 1** – Balance hídrico para la Campaña 2009/10.

Campaña 2009/10	1 Sep	Ag. Inic	3 Sep	1 Oct	2 Oct	3 Oct	1 Nov	2 Nov	3 Nov	1 Dic	2 Dic	3 Dic	1 En	2 En	3 En	1 Feb	2 Feb	3 Feb	1 Mar	2 Mar	3 Mar	1 Abr
Et.pot= mm/10día			16	29	30	45	47	56	56	47	59	69	61	63	75	65	60	34	50	40	47	24
Et. Maíz= mm/10día			8,2	14,6	15,0	22,4	23,5	37,6	47,6	39,6	58,8	83,1	73,1	67,4	70,9	61,5	57,3	32,3	47,3	24,1	23,8	8,5
Precipit.			31	19	0	25	9	33	80	15	33	116	51	35	76	114	57	75	12	0	70	2
Bal. Hid.		140	163	167	152	155	140	136	168	143	118	151	128	95	100	153	152	195	160	136	182	175

Total déficit hídrico = 0 mm

**Tabla 2** – Balance hídrico para la Campaña 20010/11.

Campaña 2010/11	1 Sep	2 Sep	Ag Inic	1 Oct	2 Oct	3 Oct	1 Nov	2 Nov	3 Nov	1 Dic	2 Dic	3 Dic	1 En	2 En	3 En	1 Feb	2 Feb	3 Feb	1 Mar	2 Mar	3 Mar	1 Abr
Et.pot= mm/10día				25	30	35	49	45	62	61	60	85	66	59	73	50	59	46	53	32	35	31
Et. Maíz= mm/10día				10,3	15,1	17,4	24,4	22,6	33,7	51,7	50,7	101	79,5	70,7	69,0	47,3	55,7	43,5	50,2	30,5	20,9	13,8
Precip.				2	57	4	1	0	7	24	11	15	13	121	65	71	34	18	29	26	33	5
Bal. Hid.			100	92	134	120	96	74	47	19	-21	-107	-67	50	46	69	47	22	0	-5	7	-2

Total déficit hídrico = 199 mm

<b>Tabla 3 – Balance hídrico para la Campaña 2011/12.</b>																						
Campaña 2011/12	1 Sep	Ag Inic	3 Sep	1 Oct	2 Oct	3 Oct	1 Nov	2 Nov	3 Nov	1 Dic	2 Dic	3 Dic	1 En	2 En	3 En	1 Feb	2 Feb	3 Feb	1 Mar	2 Mar	3 Mar	1 Abr
Et.pot= mm/10día			33	23	29	30	57	54	60	55	54	58	72	66	69	60	60	39	49	40	28	32
Et. Maíz= mm/10día			13,0	11,5	14,6	15,1	28,3	27,2	49,1	46,6	45,6	69,4	86,4	79,6	65,3	56,7	56,8	36,7	46,4	38,2	15,9	11,2
Precip.			15	63	19	17	52	19	61	0	0	1	24	0	164	80	94	58	71	36	17	17
Bal. Hid.		52	53	105	110	112	136	127	139	93	47	-21	-62	-80	99	122	159	180	205	202	204	209

Total déficit hídrico = 163 mm

Ag.Inic.: agua inicial (agua útil inicial hasta 1,2 m de profundidad).

Et.pot: Evapotranspiración potencial.

Et. Maíz: Evapotranspiración del maíz (calculada como el promedio entre Et.potencial y el coeficiente kc).

Precip.: Precipitaciones.

Bal.Hid.: Balance hídrico.

Coefficientes kc durante los distintos estadios fenológicos del cultivo:

- Kc durante el período de Barbecho: 0,35.
- Kc durante el período inicial: 0,5.
- Kc durante el período de desarrollo: 0,85.
- Kc durante el período crítico: 1,2.
- Kc durante el período final: 0,95.
- Kc durante el período de recolección: 0,6.