

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**RESPUESTA AL AGREGADO DE FOSFORO EN SOJA  
DE SEGUNDA**

por

**Juan Manuel ERRO RUIZ  
Rodrigo MÖLLER GARELLI  
Marcos SAAVEDRA SASSO**

**TESIS presentada como uno de los  
requisitos para obtener el título de  
Ingeniero Agrónomo.**

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2012**

Tesis aprobada por:

Director:

---

Ing. Agr. Esteban Hoffman

---

Ing. Agr. Mónica Barbazán

---

Ing. Agr. Sebastián Mazilli

Fecha: 3 de febrero del 2012

Autor:

---

Juan Manuel Erro Ruiz

---

Rodrigo Möller Garelli

---

Marcos Saavedra Sasso

## AGRADECIMIENTOS

Al Director de la presente Tesis, Ing. Agr. Esteban Hoffman por su dedicación y apoyo en todas las etapas de esta tesis.

la Ing. Agr. Mónica Barbazán por su invaluable ayuda y al Ing. Agr. Sebastián Mazzilli por participar como tercer integrante del tribunal.

A las empresas que auspician este proyecto: BARRACA ERRO, ISUSA y TAFILAR S.A.

A las empresa ASP, por haber colaborado en el proyecto, mediante la donación de fertilizante.

A la empresa LAVSA, por su apoyo y dedicación en la etapa final de análisis.

A los funcionarios del Laboratorio de Suelos de Facultad de Agronomía Paysandú, por la ayuda recibida.

A nuestros padres por el apoyo y la comprensión que nos brindaron en todo momento.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	4
2.1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	4
2.2. <u>DINÁMICA DEL FÓSFORO EN EL SUELO</u> .....	5
2.2.1. <u>Formas y contenidos de fósforo en los suelos</u> .....	5
2.2.1.1. <u>Fósforo inorgánico</u> .....	6
2.2.1.2. <u>Fósforo orgánico</u> .....	7
2.2.1.3. <u>Compuestos de fósforo orgánicos</u> .....	9
2.2.2. <u>Retención de fósforo por los suelos</u> .....	10
2.3. <u>FACTORES QUE DETERMINAN LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO</u> .....	12
2.3.1. <u>Factores del suelo</u> .....	14
2.4. <u>EL FÓSFORO EN LA PLANTA</u> .....	18
2.4.1. <u>Mecanismos de aporte de fósforo a las plantas</u> .....	18
2.4.2. <u>Efectos sobre el crecimiento vegetal</u> .....	20
2.5. <u>INDICADORES DE RESPUESTA EN SUELO Y PLANTA</u> .....	22
2.5.1. <u>Indicadores en suelo</u> .....	22
2.5.2. <u>Indicadores foliares</u> .....	25
2.6. <u>NECESIDADES DE AGUA POR EL CULTIVO DE SOJA</u> .....	27
2.7. <u>COMPONENTES DEL RENDIMIENTO EN GRANO</u> .....	27
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	28
3.1. <u>CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS</u> .....	30
3.2. <u>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</u> .....	31
3.2.1. <u>Modelo estadístico</u> .....	31
3.2.2. <u>Análisis de la varianza</u> .....	32
3.2.3. <u>Análisis de los factores en determinar el rendimiento</u> .....	32
3.3. <u>HIPOTESIS DEL TRABAJO</u> .....	33
3.4. <u>OBJETIVOS DEL TRABAJO</u> .....	33
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	34
4.1. <u>CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA</u> .....	34

4.1.1. <u>Escenario climático verano 2010/2011</u> .....	34
4.1.2. <u>Caracterización climática de los ensayos</u> .....	35
4.2. <u>RENDIMIENTO Y COMPONENTES</u> .....	39
4.2.1. <u>Rendimiento en grano</u> .....	39
4.2.2. <u>Componentes del rendimiento</u> .....	41
4.2.3. <u>Factores determinantes del rendimiento</u> .....	41
4.3. <u>INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</u> .....	50
4.4. <u>INDICADORES DE SUELO</u> .....	52
4.5. <u>CANTIDAD DE RASTROJO Y CONCENTRACIÓN DE P EN EL MISMO</u> .....	53
4.6. <u>DINÁMICA DE P EN PLANTA</u> .....	56
4.7. <u>VARIACIONES DE P EN SUELO POSTERIORES A LA SIEMBRA</u> .....	57
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	68
6. <u>RESUMEN</u> .....	70
7. <u>SUMMARY</u> .....	71
8. <u>BIBLIOGRAFIA</u> .....	72
9. <u>ANEXOS</u> .....	78

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Caracterización de los sitios .....	29
2. Características de los ensayos.....	30
3. Rendimiento promedio por tratamiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) según sitio experimental.....	41
4. Sitios que no respondieron al agregado de fertilizante.....	51
5. Cantidad y contenido de P en la biomasa por sitio.....	54
6. Comparación del contenido de P (%) de los diferentes rastrojos del cultivo antecesor a través del métodos de comparación de medias LSD Fisher.....	55
7. Comparación del volumen de rastrojo ( $\text{kg MS/ha}$ de los diferentes rastrojos del cultivo antecesor a través del método de comparación de medias LSD Fisher.....	55
 Figura No.	
1. Ubicación de los sitios en que se realizaron los ensayos .....	28
2. Ubicación de los sitios experimentales en mapas INIA-Gras: (a) precipitaciones acumuladas desde diciembre 2010 a febrero 2011, (b) ocurrencia de precipitaciones para el mismo período, en comparación con la media histórica 1961-2000.....	34
3. Rendimiento potencial según precipitaciones (mm) en el total del período total del cultivo (siembra-R8).....	35
4. Distribución de las precipitaciones a lo largo del ciclo del cultivo, incluyendo el período crítico R3-R6.....	37

5. Relación entre el rendimiento del cultivo de soja y precipitaciones en el período crítico R3-R6 (a), y en el final del ciclo R7-R8 (b).....	38
6. Rendimiento promedio por tratamiento para cada sitio de investigación, incluyendo el resultado de comparación de medias de LSD Fisher al 5 % (a, b, c) y el error estándar (E.E).....	40
7. Rendimiento en función del número de granos (a), en función del Peso de Grano (b) y PG en función del número de granos (c).....	42
8. Organigrama de Clasificación de los Factores que explican los rendimientos potenciales con su respectivo impacto individual (%).	43
9. Rendimiento potencial en función del nivel de Potasio a la siembra.	44
10. Relación entre años de Agricultura y Rendimiento Potencial.....	45
11. Efecto conjunto del nivel de potasio a la siembra y la “edad de chacra” en el Rendimiento Potencial. Gráficas de rutina SAS.JMP 8.2, Countour Plot.....	46
12. Relación entre el rendimiento potencial y fecha de siembra.....	47
13. Organigrama de Clasificación de los Factores que explican los rendimientos del testigo, con su respectivo impacto individual (%)..	48
14. Rendimiento del testigo en función del nivel de Potasio a la siembra (a) y la edad de chacra (b).....	49
15. Efecto de la dosis de P a la siembra (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> a la siembra) y rendimiento de soja de 2da.....	50
16. Relación entre RR y P Bray No. 1 (0-20 cm) a siembra, para dos niveles de respuesta, 10% (a) y 15% (b).....	52
17. Relación entre RR y P Bray No. 1 del tratamiento 1(a) 30 dpf, (b) 60 dpf y (c) 90dpf.....	53

18. Niveles de P en hoja según tratamientos. Tratamiento 1: 0, tratamiento 2: 30P, tratamiento 3: 60P. CV%: Coeficiente de variación, n: número total de valores utilizados y n.s.: valores sin deferencia estadísticamente significativa ( $p=0,05$ ).....	56
19. Concentración de P foliar en R2-R3 según contenido de P en suelo (a) al momento de la siembra y (b) 60 días post fertilización dpf.....	57
20. Dinámica del fósforo en el suelo posterior a la siembra para 30, 60 y 90 días, tres tratamientos (cultivo sin fertilizar, sin cultivo/ sin rastreo, sin cultivo/ con rastreo), las barras muestran las precipitaciones acumuladas cada 30 días y precipitaciones totales para el período. Las figuras se presentan agrupados por tendencias a 90 días con respecto a la siembra (bajan los niveles de fósforo (a) , suben (b) , se mantienen(c) . Para los mismos solo se encontró significancia en los sitios 1,2 y 7 (Anexo 3).....	59
21. Dinámica del fósforo en el suelo posterior a la siembra para 30, 60 y 90 días, tres tratamientos (0 P, 30 P, 60P), las barras muestran las precipitaciones acumuladas cada 30 días y precipitaciones totales para el período.....	63
22. Cambios de P en suelo desde la siembra en función del P agregado y variación a los 90 días pos-emergencia, en chacras sembradas con soja de segunda (a y b).....	65
23. Valor estimado de P-Bray I en suelo a 90 días en base al valor original a siembra e incremento teórico por agregado de 30 y 60 unidades de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> y valor real de P-Bray I en suelo a 90 días pos-emergencia (Figura a), y sitios con respuesta significativa a la fertilización en chacras sembradas con soja de segunda.....	66

## 1. INTRODUCCIÓN

A partir del año 2000 comienzan a ocurrir cambios en la agricultura de secano en Uruguay, transformando la estructura productiva y con nuevos actores que pasan a realizar la actividad. Esto se traduce en un aumento del área de cultivos de secano, siendo la superficie sembrada en la zafra 2002/03 548.500 hectáreas, mientras que en la zafra 2010/2011 fue de 1.575.400 hectáreas, según la Dirección de Estadísticas Agropecuarias (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2011).

La expansión de los oleaginosos es el factor principal de este dinamismo basado en cambios del entorno económico doméstico e importantes transformaciones ocurridas en la base productiva. Bajo este contexto, el cultivo de soja, pasa de ser un cultivo marginal a ser uno de los principales productos de exportación, desplazando a otros cultivos tradicionales y extendiéndose rápidamente por la región litoral oeste del país y otras áreas con menos tradición agrícola como el centro, noreste y este del país (Arbeletche et al., 2008).

Por otro lado, los cultivos de invierno también han aumentado el área de siembra en los últimos años, siendo el trigo el más importante, básicamente explicado por los buenos precios internacionales sumado al importante área de verano que auspicia a que se siembre mayor área de invierno. Esta mayor intensificación, sumada a una falta adecuada de reposición de los nutrientes del sistema, ha producido un empobrecimiento progresivo de la fertilidad de los suelos, con lo que esto implica. Trabajos realizados por Hernández et al. (1995), ya indicaron que la disponibilidad de fósforo (P) es el primer factor nutricional en limitar el potencial de producción de pasturas y cultivos.

La realidad de la agricultura en el Uruguay hace que dependiendo del año, gran parte del área de soja se haga de "segunda". Según el Anuario Estadístico de URUGUAY. MGAP. DIEA (2011), el coeficiente soja primera/segunda era 40/60, mientras que para la siguiente zafra, el mismo se invirtió.

En general los cultivos de segunda han recibido tradicionalmente muy poca atención en relación a las necesidades de ajustar la fertilización. Para los mismos se espera que sea aprovechada la residualidad de fertilizaciones previas realizadas al cultivo de invierno inmediato anterior (Vivas et al., 2007).

Como consecuencia ha surgido la posibilidad de manejar la fertilización fosfatada de trigo/soja como un solo cultivo ya que implica ventajas importantes desde el punto de vista operativo al reducirse el número de aplicaciones y

disminuir los tiempos operativos de siembra de soja de segunda al no aplicar fertilizantes en ese momento.

Estos esquemas de fertilización fosfatada parten de la base que existiría un efecto residual de la fertilización de trigo sobre el cultivo de soja y conociendo la dinámica del fósforo se esperaría un incremento del mismo en el corto plazo<sup>1</sup>.

Cordone y Martínez (2001), Salvagiotti et al. (2003) observaron que el manejo nutricional realizado en un cultivo de invierno como trigo afecta los rendimientos de la soja de segunda. Aunque se podría hipotetizar que el comportamiento de la soja siguiendo al cultivo cebada debería asemejarse al de la soja siguiendo al trigo, no se han realizado experiencias concretas en esta secuencia. Las deficiencias inducidas por el cultivo de invierno podrían ser más evidentes en la secuencia cebada-soja, ya que el cultivo de segunda se siembra en forma anticipada si se lo compara con la rotación trigo-soja, y de esta manera alcanzaría mayor potencial de rendimiento y con ello, mayor demanda de nutrientes.

Para soja de primera, el esquema de ajuste de la fertilización fosforada se basa en la estimación de respuesta a la fertilización fosfatada probable, dependiendo del nivel de fósforo disponible en el suelo en relación a niveles o rangos críticos. Los niveles críticos de P en el suelo, por debajo del cual la probabilidad de respuesta al agregado es elevada. Castro et al. (1981) establecieron como suficiente el rango de 12-16 ppm de P Bray 1 a 20 cm de profundidad en suelos de texturas pesadas, y más de 16 ppm para suelos más francos. Estos valores se hicieron en sistemas bajo laboreo convencional. Sin embargo, el número de estudios para confirmar estos valores ha sido muy reducido (Améndola, 1976).

Debido a la escasa información y a la incertidumbre existente a nivel nacional sobre la respuesta a la fertilización fosfatada en el cultivo de soja de segunda, sumado a la importancia creciente de este cultivo que se siembra bajo esta forma surge la necesidad de ajustar los niveles de fertilización y generar las bases de dinámica de este nutriente en suelo y rastrojo, que permitan mejorar la estrategia de uso de los fertilizantes. A lo anterior se suma la sospecha de que actualmente a nivel nacional (especialmente a nivel de empresas de gran escala), la proporción del área de soja de segunda con muestreo de suelo y fertilización basal es baja. Por lo tanto los objetivos de este

---

<sup>1</sup>Hoffman, E. 2011. Com. personal.

trabajo son: evaluar la respuesta a la fertilización con fósforo en cultivos de segunda y estudiar la dinámica del fósforo en el suelo.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. INTRODUCCIÓN

El Fósforo (P) es considerado un nutriente inmóvil, igualmente presenta cierta movilidad dependiendo de la textura del suelo, temperatura y humedad del suelo.

A su vez, su disponibilidad se encuentra condicionada a las propiedades químicas del suelo como: pH del suelo, capacidad buffer y contenido de materia orgánica.

En el año 1995 Melgar y colaboradores presentaron, en Primer Congreso Nacional de Soja y Segunda Reunión Nacional de Oleaginosas (Pergamino, Argentina), una recopilación de numerosos ensayos de fertilización fosforada de soja realizados en la región pampeana desde fines de los 70. El análisis conjunto de estos ensayos mostró una respuesta a la fertilización muy probable cuando el suelo tenía menos de 9 ppm de P y poco probable cuando estaba por encima de 14 ppm, medido por el método Bray 1. Sin embargo, aun cuando el nivel de P disponible era bajo (< 9 ppm) las respuestas eran muy variables. Esta erraticidad planteaba la cuestión de si había otros factores del ambiente o de manejo que estaban condicionando la respuesta a la fertilización fosforada aún en suelos con contenidos muy bajos de P. Además creaba incertidumbre respecto de la respuesta esperada a la hora de decidir una fertilización basada en el análisis de suelo.

Cano et al. (2006), realizaron un relevamiento de chacras sembradas en siembra directa con al menos cinco cultivos continuos en la zona agrícola Litoral Oeste del Uruguay para determinar el balance de P aparente generado por diferentes estrategias de fertilización, largo de rotación y tipo de cultivos que integran. Los autores concluyeron que en promedio hubo un balance positivo de  $P_2 O_5$  (0,8 kg/ha/año). Sin embargo el estudio por agrupamiento, resultó en situaciones desde + 9 a - 20 kg de  $P_2 O_5$  /ha/año. Dentro del grupo donde se obtuvieron balances negativos se encuentran chacras con baja dosis de P, asociada a un mayor número de cultivos/año y alta predominancia de soja.

Si bien Siri y Ernst (2011), sugieren aplicar una Estrategia de Balance para mantener el P en el suelo, por lo menos cuando se está en valores apenas superiores a la referencia, en el caso de los suelos de Uruguay, que son naturalmente deficientes en P para los niveles requeridos por los cultivos, no sería una estrategia válida utilizar el criterio de balance. Según los resultados (Siri y Ernst, 2011) del nivel crítico de fósforo para cada cultivo, era de esperar que las situaciones de baja disponibilidad de P inicial, tuvieron menor

rendimiento por un agregado de  $P_2O_5$  más bajo que el necesario dado que esta estrategia de fertilización por balance no contempla elevar y mantener, sino solo mantener el nivel inicial con un balance aparente neutro. Esto se debe fundamentalmente a que las extracciones de fósforo fueron independientes de los niveles de P Bray N°1 en el suelo.

Por otra parte se podría pensar que la adopción de la siembra directa llevaría a rever las profundidades de los muestreos de suelo, ya que bajo este sistema de laboreo se encuentran mayores concentraciones de P disponible en la capa superficial (0 -10 cm) debido a la acumulación de residuos y a la aplicación superficial de fertilizantes fosfatados (Scheiner et al. 1998, Calviño et al. 2000). Sin embargo, los niveles críticos de P, 14 ppm, para SD coinciden con aquellos para laboreo convencional cuando se muestrea el suelo a profundidad de 0-15 ó 0-20 cm (Calviño et al. 2000, Essington et al. 2000, Zamuner et al. 2004).

Finalmente cabe destacar que a pesar de la importancia que tiene el P en el rendimiento del cultivo, la soja de segunda generalmente no se fertiliza. Las razones de lo antes mencionado podrían basarse en que se espera un efecto residual de la fertilización en invierno, y un menor potencial del cultivo.

## 2.2. DINÁMICA DEL FÓSFORO EN EL SUELO

### 2.2.1. Formas y contenidos de fósforo en los suelos

Los suelos de Uruguay se caracterizan por presentar en general bajos valores de P dentro del rango de 0,013 y 0,089% (Hernández et al., 1995). Dichas variaciones son explicadas fundamentalmente por el material de origen de los suelos y las condiciones de meteorización.

Considerando el material de origen de los suelos, los valores más elevados se encuentran en suelos formados a partir de la alteración de rocas básicas, como Basalto (583 ppm de P total). Le siguen los suelos derivados de sedimentos limo-arcillosos, como los pertenecientes a las formaciones geológicas Fray Bentos (374 ppm P total) y Libertad (386 ppm P total). En el extremo opuesto, se encuentran los suelos derivados de la alteración de rocas ácidas de basamento cristalino y sedimentos de textura gruesa que registran los valores más bajos de P (Hernández et al., 1995).

El fósforo en los suelos se puede separar en tres fracciones, dentro de las cuales podemos encontrar: el P presente bajo la forma de compuestos inorgánicos, el P presente en materiales orgánicos y humus del suelo y el que se encuentra en la solución del suelo. Los compuestos fosfatados presentes

tanto en el pool orgánico como inorgánico se caracterizan por presentar gran heterogeneidad abarcando un gran número de compuestos de diferente naturaleza y estructuras químicas no muy bien definidas (Hernández, 2010).

Dentro del pool de fósforo inorgánico se encuentra la fracción de fósforo no lábil que se caracteriza por la estabilidad de los compuestos que la conforman. En cuanto al fósforo orgánico es posible separar tres fracciones de características diferentes: el P presente en el humus del suelo, el P presente en restos vegetales y excreciones animales; y el P presente en la biomasa microbiana. Las plantas absorben el P de la solución del suelo, el cual resulta del equilibrio con las formas lábiles de P inorgánico y orgánico. Las fracciones minerales contribuyen en una menor proporción al abastecimiento del P soluble. (Ciampitti, 2009). Estos equilibrios dependen de factores como humedad del suelo y temperatura, los cuales afectan el mecanismo de difusión, que es el principal mecanismo por el cual el P llega a las raíces.

En conclusión la disponibilidad de fósforo en el suelo al momento de la siembra del cultivo de soja, está estrechamente relacionada con el efecto año y ambiente de producción. En el caso de soja de segunda el ambiente de producción no es solo la fecha de siembra, sino el efecto dado por la presencia del rastrojo recién cosechado. Siendo el proceso de inmovilización responsable de la disponibilidad de P que tiene la planta en un momento dado, ya que la liberación del P dependerá del antecesor presente según Zamalvide (1995), Morón (1995), Hoffman et al. (2001), Hoffman (2004). Esto además se presume debido a que según Sawchik (2005) el largo de barbecho tiene incidencia en los niveles de P a la siembra de la soja de primera, y por ende es de esperar lo mismo del rastrojo de invierno presente al momento de la siembra de la soja de segunda.

Las transformaciones del fósforo entre formas orgánicas e inorgánicas están estrechamente relacionadas, dado que el fósforo inorgánico es una fuente para los microorganismos y las plantas, y el fósforo orgánico al mineralizarse repone el fósforo de la solución (Boschetti et al., 2003).

#### 2.2.1.1. Fósforo inorgánico

El P inorgánico lábil del suelo se define como aquella fracción del P del suelo que responde rápidamente a un descenso en la concentración de P en el suelo. En cuanto al P no lábil está asociado a aquellos compuestos fosfatados de muy alta estabilidad, con valores muy bajos de solubilidad, estas características determinan una muy baja reactividad química, por lo cual su importancia desde el punto de vista de la nutrición de las plantas es prácticamente nula.

El límite entre las fracciones lábiles y no lábiles es difuso, ya que los compuestos fosfatados que las componen son muy diversos, y de valores de solubilidad muy variados.

Las plantas absorben el P desde la fracción soluble en el suelo, la que a su vez es reabastecida por una fracción lábil de naturaleza orgánica e inorgánica. Esta fracción de P lábil está en equilibrio con fracciones moderadamente lábiles y de muy baja labilidad.

Dada la baja concentración de P soluble, el abastecimiento de P desde la fracción lábil es de extrema importancia para garantizar un adecuado suministro de P a las plantas (Ciampitti, 2009).

El P del suelo está compuesto por fracciones que difieren en su disponibilidad para las plantas, tales como: P asociado a calcio, adsorbido por compuestos de hierro y aluminio en la superficie de las arcillas, acompañado con la materia orgánica y como iones libres en solución, entre otras fracciones (Hedley et al. 1982, Smeck 1985, Stevenson 1986, Tiessen et al. 1993).

Un aspecto importante a considerar son los cambios producidos en las fracciones de P del suelo bajo diferentes condiciones de manejo. La absorción de P por los cultivos genera nuevos equilibrios en el sistema suelo: la disminución del P soluble en la solución del suelo, y la desorción y liberación de P inorgánico y mineralización del P orgánico, para reabastecer en forma constante la fracción absorbida por los vegetales.

Numerosos factores del suelo influyen en la disponibilidad de estas fracciones. La textura afecta particularmente la fracción de P inorgánico lábil, P microbiano y P orgánico lábil (Hoffman et al., 1996). El contenido de estas fracciones varía con la actividad microbiana del suelo (O'Halloran et al., 1987). La presencia de residuos incrementa el pool de P orgánico lábil y P inorgánico lábil. La aplicación de fertilizantes fosfatados provoca incrementos significativos de las fracciones de P inorgánico lábil y P orgánico total pero aparentemente no influye sobre la fracción de P orgánico lábil (O'Halloran et al., 1987).

#### 2.2.1.2. Fósforo orgánico

El contenido de P orgánico de los suelos representa aproximadamente el 50% del contenido total, aunque puede variar entre un 15 y un 80% (Tisdale et al., 1993). En suelos del Uruguay provenientes de diferentes materiales de origen, bajo campo natural sin fertilizar, Hernández (2010) encontró un valor promedio de 51%, con un rango de variación entre 33 y 67%. Estos porcentajes están relacionados con los procesos de formación de los suelos del Uruguay,

los cuales han dado lugar a suelos de pradera, con alto contenido de materia orgánica en el horizonte de mayor desarrollo radicular.

Cuando se trata de suelos pobres en fósforo inorgánico, la mineralización de la fracción orgánica, es importante en el reciclado ya que libera fósforo inorgánico a la solución, contribuyendo a mantener un nivel adecuado de fósforo disponible para las plantas. Algunos investigadores encontraron que la cantidad de P mineralizado en suelos de regiones templadas puede alcanzar valores entre 5 a 20 kg/ha/año, mientras que en los suelos tropicales puede variar desde 67 a 157 kg de P/ha/año. Esto remarca la importancia que puede tener la fracción orgánica del fósforo como fuente de fósforo disponible para las plantas y lo variable de su rol, en función de las diferentes condiciones de suelo, de clima y prácticas de cultivo (Boschetti et al., 2003).

Considerando entonces que la mineralización del P orgánico representa una contribución significativa para las necesidades de P de las plantas, el aporte por mineralización lleva a que exista por tanto dependencia de los factores determinantes de la descomposición de la materia orgánica. Cualquier reducción en los aportes de materia orgánica y la aceleración de la mineralización en un suelo resulta en una mineralización neta de la materia orgánica del suelo.

A medida que los residuos de las plantas se descomponen para formar materia orgánica del suelo, liberan nutrientes. El P es a menudo liberado en cantidades y tasas mayores que aquellas determinadas por las transformaciones inorgánicas de P. Entonces la degradación de la materia orgánica controla la liberación de P orgánico, pero una vez liberado, los sitios de absorción y las reacciones químicas compiten por la disponibilidad del P liberado, de manera que la mineralización de P por sí sola no es una medida del abastecimiento de P para las plantas, y gran parte del P mineralizado rápidamente queda no disponible (Tiessen, 2002).

Un problema para cuantificar los efectos de la degradación del suelo en la liberación de P es que comúnmente la mineralización y la erosión del suelo ocurren al mismo tiempo. Una cobertura vegetal reducida, limita los retornos de materia orgánica y cambia el balance hacia una reducción de la materia orgánica del suelo. La mayor exposición del suelo bajo reducida vegetación y agregación con menores contenidos de materia orgánica incrementa la erodabilidad. La erosión remueve la materia orgánica rica de la capa superficial del suelo y de esta manera tiene un efecto neto similar *in situ* como la mineralización (Tiessen, 2002).

Como se mencionó anteriormente el P orgánico tiende a aumentar y disminuir junto con el contenido de materia orgánica en el perfil; por lo tanto su contenido es relativamente bajo en los subsuelos y alto en los horizontes superficiales. El P orgánico se puede separar en tres fracciones:

- Humus del suelo, en el cual el P se encuentra formando parte de compuestos muy diversos, la mayoría de constitución desconocida, variando en cuanto a su estabilidad frente a mecanismos de degradación química y biológica.
- Restos frescos de cultivos no humificados, donde también se encuentra formando parte de diferentes estructuras.
- Biomasa microbiana del suelo, donde forma parte de las estructuras de los microorganismos del suelo. Esta fracción es la más importante, encontrándose valores que oscilan entre 1 y 4% de P (Brookes et al., 1984).

#### 2.2.1.3. Compuestos de fósforo orgánico

La mayoría de ellos son ésteres del ácido ortofosfórico ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y han sido identificados como inositol fosfatos, fosfolípidos y ácidos nucleicos.

El remanente de los compuestos orgánicos de P de los suelos se piensa que pueden ser originados a partir de los microorganismos, especialmente de las paredes celulares de las bacterias, las cuales presentan en su constitución un número importante de ésteres muy estables (Tisdale et al., 1993).

Según Morón (2002), la fracción P orgánico puede ser subdividida en 3 fases:

- Una fracción activa sujeta a las alternancias de humedad y temperatura del suelo, constituida por la biomasa microbiana y metabolitos con una relación C/P variando de 30 a 80 y con un “turn-over”, es decir tasa de renovación, de 2 a 4 años. Trabajos realizados por García y Morón (1992) mencionan valores entre 8 y 24 ppm P, equivalentes a 20-51 kg P microbiano por hectárea a una profundidad de 20 cm.
- Una fracción protegida física y químicamente que es más resistente a la descomposición. Con descomposición “turn-over” de 20 a 50 años.
- Una fracción protegida física y químicamente y que tiene un “turn-over” de 800 a 1200 años. Con una relación C/N de 20 a 200.

Cabe destacar que según Stewart et al. (1987) la naturaleza dinámica del P orgánico es enmascarada por el hecho que solo una pequeña porción del

total de la materia orgánica puede ser biológicamente activa. Sostienen que el componente central es la biomasa microbiana, y esto implica que por su magnitud y el hecho de ser un componente lábil de la materia orgánica, podría considerarse como un reservorio de nutrientes potencialmente disponibles (Siqueira et al., 1998).

Stewart et al. (1987), describen la actividad microbiana con una rueda que se pone en movimiento en respuesta a las entradas de carbono. La rueda podría pararse o disminuir por una caída en la entrada de carbono o por parcial esterilización del suelo, quedando entonces el suministro para las plantas limitado al P inorgánico lábil. En cambio si la rueda está operando, las plantas tienen una mayor cantidad de P en solución, dado que este está siendo repuesto desde formas inorgánicas y orgánicas lábiles. Estos autores llegaron a la conclusión que en general las cantidades absolutas y relativas de fósforo orgánico mineralizado son mayores en los suelos más meteorizados de los trópicos, que en regiones templadas.

Anderson (1980) sostuvo que el P orgánico en el suelo no debería ser considerado como perdido o indeseable. La evidencia sugiere que se ha visto como un reservorio que aumenta o disminuye según las condiciones. Por ende es importante entender los factores que alteran la disponibilidad del fósforo en el suelo.

### 2.2.2. Retención de fósforo por los suelos

Las diferencias en capacidad de retención de P pueden explicar en gran medida la distinta eficiencia de una misma dosis de fertilizante agregado a distintos suelos a corto plazo. Esto haría pensar que los umbrales críticos son insuficientes para determinar la dosis de fertilizante a aplicar la secuencia trigo-soja. La información sobre umbrales debe ser complementada con modelos que permitan predecir la dosis necesaria en cada suelo particular para evitar que el cultivo presente deficiencias de fósforo.

La capacidad de retención de fósforo por los diferentes suelos está determinada principalmente por las características del material de origen de los suelos

Dentro de los mecanismos de retención se destaca:

- Suelos ácidos
  - precipitación con Fe y Al en solución
  - adsorción en oxi-hidróxidos de Fe y Al
  - adsorción en arcillas aluminosilicatadas

- Suelos calcáreos
  - precipitación como  $\text{CaHPO}_4$
  - adsorción sobre  $\text{CaCO}_3$
  - adsorción en arcillas aluminosilicatadas

En la categoría de alta retención de P se encuentran los suelos derivados o con influencia de materiales de Basamento Cristalino, Basalto, Formación Melo y Devoniano. Los suelos derivados de Basamento presentan altos contenidos de óxidos de Fe y arcilla, mientras que los suelos del Basamento Cristalino presentan altos contenidos de Fe pero su contenido de arcilla es bajo. Presentan minerales del tipo 1:1 en su fracción arcilla, lo que explicaría su alto grado de retención, además de la presencia de Al intercambiable (Cayota et al. s.f., Escudero y Morón 1978, Hernández et al. 1999).

Zamalvide et al. (1999) mediante un estudio de isotermas de retención de P, que permiten predecir la eficiencia del fertilizante agregado, encontraron que la eficiencia era menor en suelos sobre Basamento Cristalino que en los suelos planosoles de Río Branco o arenosos del litoral, como ejemplos extremos. La baja eficiencia del fertilizante en el Basamento Cristalino es atribuida a la alta retención.

Los suelos de baja retención de fósforo, normalmente se caracterizan por tener medios a bajos contenidos de arcillas y/o óxidos de Fe, siendo los minerales predominantes los del tipo 2:1. Por lo general no contienen Al intercambiable. Esto se da en Unidades de Suelo Algorta, Cuchilla del Corralito, Cañada Nieto, Chapicuy, Las Toscas, Trinidad, Fray Bentos, Colonia Palma, Libertad, San Luis, Lascano, Río Branco (Escudero y Morón 1978, Hernández et al. 1999).

De lo anterior se sugiere que se debería agregar más fósforo para elevar los niveles de P lábil en suelos con alta capacidad de retención y que los niveles de suficiencia alcanzados por la fertilización van disminuyendo más rápidamente en el tiempo en suelos con alta capacidad de retención.

Luego de agregado al suelo, el fertilizante fosfatado tiene un efecto de suministro de P que persiste durante más de un ciclo de crecimiento, conocido como efecto residual, y que resulta de la permanencia de P en los compuestos fosfatados metaestables que integran el P lábil.

Hernández et al. (1999) sostienen que la retención de P se cumpliría en los suelos en dos etapas:

- Reacciones rápidas en las cuales el P es fundamentalmente adsorbido superficialmente, conservando por ello alta reactividad.
- Pasos lentos en los cuales el P se va transformando en compuestos precipitados cristalinos estables menos reactivos y muy pocos disponibles para las plantas.

Barrow (1980) cita como datos promedios de varios autores una pérdida de P lábil previamente aumentado por la fertilización, del 40- 50% anual. Estos valores pueden variar por varios factores como pueden ser el tipo de suelo, temperatura, fuente de fertilizante agregado, tamaño de gránulo del fertilizante, etc. La evolución de este P lábil en función del tiempo sería una progresión geométrica, con una pérdida porcentual constante del resto que va quedando lábil, tal como sería, por ejemplo, 1-0.5-0.25-0.125 para una pérdida anual del 50% (Arndt et al., 1963).

En Uruguay, Castro et al. (1981) definió dos parámetros para caracterizar la evolución de la disponibilidad del P luego de su aplicación:

Equivalente fertilizante: para diferentes suelos del país los valores de equivalente fertilizante oscilan entre 5 y 10 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Hernández et al., (1998) encontraron que la relación entre P agregado e incremento asimilable responde a un modelo exponencial, concluyendo que para elevar las primeras partes de P asimilable se consume más fertilizante que el que consume un incremento igual en valores más altos de P asimilable.

Tasa de descenso anual: los coeficientes de este parámetro miden el porcentaje del P lábil aumentado por la fertilización que pasa anualmente a formas fijadas no asimilables. De acuerdo a los datos obtenidos por Castro et al. (1981), estos porcentajes variarían para los suelos del Uruguay entre el 28% y 50%, usando como fuente fertilizante al superfosfato de calcio, aunque trabajos posteriores (Saunders et al., 1984) han mostrado tasas de descenso mucho mayores.

### 2.3. FACTORES QUE DETERMINAN LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO

Según Ciampitti (2009) los principales factores que explican los cambios en la disponibilidad de P para los cultivos se pueden agrupar en dos grandes grupos:

Del suelo:

- Físicos: textura, aireación y compactación, temperatura y humedad.

- Químicos: mineralogía, pH, materia orgánica, capacidad de adsorción, interacción con otros nutrientes.
- Biológicos: residuos, raíces, bacterias, micorrizas.

De la planta:

- desarrollo y distribución de raíces, especie, híbrido o variedad, nivel de rendimiento.

Factores del suelo:

- Físicos:
  - Textura

Los suelos de texturas más finas tienen mayor capacidad de reposición de P que los suelos de textura más gruesa. Sin embargo, la retención de P por adsorción se relaciona positivamente con la presencia de partículas finas de arcilla (Sanyal et al., 1991). Los suelos más pesados requieren una mayor cantidad de P para incrementar el nivel de P extractable.

Por otra parte, las características de retención de P dependen del tipo de arcilla, las arcillas de tipo 1:1 como la caolinita presentan una mayor capacidad de retención que las arcillas tipo 2:1. La presencia de óxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al) y formas de Ca también incrementan la capacidad de retención de P de los suelos.

- Aireación y compactación

En los suelos con falta de oxígeno o compactados, el menor crecimiento de las raíces afecta la absorción y la difusión de P en el suelo (Ferrando et al., 2002).

- Temperatura y humedad

La difusión y absorción de P también son afectadas por bajas temperaturas. Estos efectos son evidentes en siembras tempranas de cultivos de verano y en suelos bajo siembra directa donde la capa de residuos en superficie reduce las temperaturas de suelo. Contenidos bajos de agua del suelo afectan la difusión y absorción del P en solución (Ferrando et al., 2002).

La humedad también está relacionada con condiciones de oxidoreducción que inciden en la disponibilidad del P en el suelo. Cuando en un suelo se establecen condiciones de anaerobiosis, como puede ocurrir por un exceso de agua, la ausencia de oxígeno determina que los microorganismos del suelo deban hacer uso de otros elementos como aceptores de electrones. Uno

de ellos es el Fe, el cual pasa de su forma oxidada ( $\text{Fe}^{+3}$ ) a la forma reducida ( $\text{Fe}^{+2}$ ). Los compuestos que forman el Fe con el P en condiciones normales de oxidación tienen la característica de ser altamente insolubles, en tanto que la reducción del Fe trae como consecuencia la liberación de fosfato a la solución (Ferrando et al., 2002).

Esto es lo que determina que al establecerse las condiciones de anaerobiosis en un suelo aumenten los niveles de P.

El proceso de anaerobiosis puede aumentar los niveles de fósforo a través de otros mecanismos:

Cuando se da un proceso de reducción en un suelo ácido, se produce un aumento en el pH. Este aumento genera un incremento en la solubilidad de los compuestos fosfatados con Al a través de su hidrólisis y precipitación de Al y posterior liberación de P a la solución.

En condiciones de anaerobiosis existe una importante mineralización de la materia orgánica. Esto traería como consecuencia la liberación de P a partir de formas orgánicas como los filatos.

Se daría la liberación de fosfatos adsorbidos a óxidos e hidróxidos de Fe y Al, por parte de aniones orgánicos.

En suelos calcáreos, la anaerobiosis determina una disminución del pH, por disolución de  $\text{CO}_2$  y formación de  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , lo cual aumenta la solubilidad de los compuestos fosfatados con el Ca, los cuales predominan en estos suelos.

Cuando retornan las condiciones de oxidación en un suelo que previamente estuvo sujeto a condiciones reductoras, ocurre la oxidación del Fe solubilizado durante la reducción, y precipitación bajo forma de óxidos de gran superficie específica y baja cristalinidad, y con elevada reactividad por el P. Esto determina que los fosfatos presentes en forma soluble del suelo reaccionan con estas superficies, disminuyendo su solubilidad y por consiguiente, su disponibilidad para la planta.

La ocurrencia de períodos cortos y frecuentes de anaerobiosis en los suelos conduce a variaciones en la disponibilidad de P. Durante el período de exceso de agua de los suelos se establecen condiciones reductoras, las cuales determinan un aumento en los contenidos y proporciones de óxidos de Fe de baja cristalinidad (Fe ox). Luego de la oxidación del suelo, dichos niveles se mantienen altos, lo que indicaría su permanencia bajo formas poco cristalinas durante las condiciones de oxidación posteriores. En la etapa de reducción del

suelo, se observó un aumento en los niveles de P asimilable de los suelos, en relación con el aumento de solubilidad de los compuestos con Fe por reducción a  $Fe^{+2}$ . El retorno de las condiciones de oxidación, determinó una disminución en dichos niveles, a valores aún por debajo de los iniciales antes de inundar. Esto surge como consecuencia de la re-adsorción del P en superficies de óxidos de Fe recientemente precipitados. El aumento en el IA del Fe estuvo asociado a esta disminución en los niveles de P asimilable de los suelos. Esta menor disponibilidad de P fue también evidenciada en menores contenidos de P en planta, respecto a las situaciones donde no hubo exceso de agua previo (Ferrando et al., 2002).

El agregado de un fertilizante fosfatado a posteriori de un período de exceso de agua mostró una pérdida de asimilabilidad del P agregado por adsorción del P del fertilizante en las superficies altamente reactivas de óxidos de Fe recientemente precipitados. Esto fue constatado por una menor absorción de P por las plantas (Ferrando et al., 2002).

Los resultados obtenidos confirmarían la importancia de los cambios en la reactividad del Fe de los suelos, frente a oscilaciones periódicas en las condiciones de oxidación-reducción. La disponibilidad de P en los suelos puede mostrar variaciones a lo largo del año, las cuales no sólo estarán restringidas a suelos de posiciones topográficas planas (Ferrando et al., 2002).

- Químicos:
  - Materia orgánica

La materia orgánica, además de proveer P vía mineralización del P orgánico, provee sitios de baja energía de adsorción contribuyendo a la fracción lábil.

- pH:

En general, se considera que la disponibilidad de P es óptima a pH de 6-7.

Presenta un efecto en diferentes mecanismos tales como retención de P, formas químicas en solución, mineralización del P orgánico, solubilización de compuestos fosfatados que afectan la disponibilidad de P en el suelo.

La concentración de P en la solución está controlada por la solubilidad de los compuestos inorgánicos de P en el suelo. En la medida que el pH aumenta, ocurre un aumento en la concentración  $H_2PO_4^-$  proveniente de la disolución de la variscita y strengita (Ferrando et al., 2002).

En la medida que la concentración de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  en la solución disminuye por la absorción de un cultivo, la strengita en el suelo puede disolverse para lograr mantener dicha concentración. Por lo tanto, los minerales específicos de P en los suelos, y la concentración de P en la solución mantenida por estos minerales es altamente dependiente del pH de la solución (Ferrando et al., 2002).

La solubilidad de los minerales de tipo fosfatos de Ca (P-Ca) presentan un comportamiento contrario al de los minerales de tipo fosfatos de Al y Fe (P-Al y P-Fe). A medida que el pH aumenta, la concentración de  $\text{HPO}_4^{2-}$  disminuye por su precipitación bajo forma de P-Ca.

Existe una tendencia a la acumulación de fosfatos de Fe y Al en las fracciones más finas. Como resultado de la alteración de la apatita (fosfato de calcio), los productos de dicha meteorización tienden a acumularse en la fracción arcilla, bajo la forma de fosfatos de Fe y Al (Scheffer et al., citados por Black, 1975).

A medida que el pH del suelo es mayor, hay una predominancia de los fosfatos de Ca, disminuyendo en importancia los fosfatos de Fe y Al, mientras que los ocluidos permanecen aproximadamente iguales (Schaschtschabel et al., 1964).

Con un aumento en el pH o actividad de ion  $\text{OH}^-$ , los fosfatos de Al y Fe liberan fosfato en forma soluble, y el Al y el Fe permanecen en forma insoluble como hidróxidos. A la inversa, con una disminución en el pH o actividad del ion  $\text{OH}^-$ , o con aumento en la actividad del ion fosfato, aumenta la tendencia de los hidróxidos de Fe y Al a reaccionar con el fosfato para formar fosfatos de Fe y Al.

Hay evidencia de que un exceso de Al en solución de suelos fuertemente ácidos induce una deficiencia de P en las plantas. Por lo tanto, el Al penetra en las raíces lo que inactiva parte del P absorbido por las mismas. A medida que el pH va aumentando, el Al precipita en el suelo pero no ocurre la inactivación del P en la planta. Al mismo tiempo, la disminución en la toxicidad del Al reduce la inhibición del crecimiento de la raíz, por lo que un incremento en la disponibilidad de P sería entonces seguida de una mayor extensión del sistema radicular (Ferrando et al., 2002).

Es muy importante considerar el pH del suelo, dado que ha sido indicado como el factor más importante en la regulación del P disponible (Sharpley, 2000).

- Interacciones con otros nutrientes

Las interacciones de P con otros nutrientes pueden ser de naturaleza antagónica como el caso de zinc (Zn) o positivas como con N, S, K, y otros nutrientes. Altas disponibilidades de P de suelos resultan en deficiencias de Zn para los cultivos (Ciampitti, 2009). Por otra parte, deficiencias de nutrientes como por ejemplo N o S, limitan la respuesta a P. Por otra parte, Vivas et al. (2010) concluyen que el P y el S, aunque con funciones diferentes en la planta, fueron independientes en su incidencia para la producción de granos. Ellos encontraron que en ningún cultivo se observó interacción significativa P y S indicando la independencia de ambos factores. Mientras hubo buenas condiciones hídricas el P tuvo efectos significativos sobre los rendimientos pero careció de importancia ante condiciones de estrés hídrico como el ocurrido con el maíz y la soja deprimera. Por el contrario, el S tuvo un comportamiento más estable, a través de las variadas condiciones ambientales, y su respuesta fue significativa en todos los cultivos. Las respuestas, tanto en magnitud como en porcentajes, siempre fueron superiores con S que con P. Los resultados indicaron claramente que la doble fertilización con P y S y las aplicaciones sucesivas de 40 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> permitieron optimizar los rendimientos de la rotación (Vivas et al., 2010).

Los suelos ácidos y el encalado alteran la disponibilidad de nutrientes para las plantas en crecimiento. Un buen encalado puede mejorar la disponibilidad de P en muchos cultivos. El mal encalado o sobre encalado, puede reducir la disponibilidad de P y micronutrientes tales como el hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn) o boro (B) y aumentar la disponibilidad de molibdeno (Mo).

- Biológicos:

- Presencia de residuos, raíces y actividad biológica:

La presencia de residuos y raíces incrementa la actividad biológica del suelo y puede resultar en la inmovilización del P disponible. Este proceso de inmovilización tiene su contraparte en la mineralización del P orgánico que aporta P para los cultivos (Ciampitti, 2009).

La fuente inicial de P orgánico son los residuos de plantas y animales, los cuales son degradados por los microorganismos para producir otros compuestos orgánicos y liberar P inorgánico. Algo del P orgánico es resistente a la acción microbiana y está más relacionado con los ácidos húmicos del suelo (Ciampitti, 2009).

En la mayoría de los suelos el contenido total de P mineralizado está altamente correlacionado con el contenido de C orgánico. Además existe otra serie de factores que afectan los procesos de mineralización/inmovilización de P, los cuales fueron explicados anteriormente, como temperatura, humedad, aireación, pH, intensidad de laboreo y fertilización fosfatada (Ciampitti, 2009).

Por otra parte es importante remarcar que el P producido a través de la mineralización puede ser removido de la solución, ya sea por adsorción a arcillas y otras superficies de minerales, o precipitar bajo forma de minerales secundarios con Fe, Al o Ca. Esto bajaría la cantidad de fósforo que puede tener disponible el cultivo durante sus etapas de crecimiento (Hernández, 2010).

Luego de roturar un campo existe una importante mineralización de P orgánico, lo que repercute en un aumento en la disponibilidad del mismo. Esto generaría un incremento en los niveles de P que estarán disponibles para el cultivo posterior (Hernández, 2010).

Otro aspecto importante a considerar es el reciclaje de P que ocurre en las rotaciones de cultivos y pasturas. En la etapa de cultivos existe reciclaje a partir de los restos del cultivo cosechado, los cuales son devueltos al suelo. En los sistemas convencionales, estos restos son incorporados al suelo, con lo cual su descomposición se ve estimulada en función de otras características relativas al tipo de materia, estado del mismo al enterrar, condiciones del clima y tiempo. Sin embargo en los sistemas de siembra directa, el manejo de rastrojo en superficie no permite una tasa de descomposición muy elevada. La incorporación de los productos de esa descomposición, particularmente P, se dará en los primeros cm de suelo (Bordoli, 2001).

- Efectos del cultivo:

Se relacionan con el desarrollo y distribución de raíces, las diferencias entre especies y variedades en lo que hace a requerimientos de P, capacidad de adsorción de P del suelo, y el nivel de rendimiento que afecta la cantidad total de P absorbido.

## 2.4. EL FÓSFORO EN LA PLANTA

### 2.4.1. Mecanismos de aporte de fósforo a las plantas

Las plantas absorben el P que está disuelto en la solución del suelo. A su vez la cantidad de P absorbido por una planta por unidad de tiempo es función de su volumen de raíces, la tasa de absorción por unidad de raíz, y la

concentración de P en la solución del suelo donde se encuentra la raíz (Hernández, 2010).

En condiciones de crecimiento de las plantas el nivel de P en la solución del suelo para mantener una determinada tasa de absorción de P, es menor en un suelo pesado que en un suelo liviano (Olsen et al., 1963).

El hecho de que una concentración de P en la solución en equilibrio signifique más P para la planta en un suelo arcilloso que en uno arenoso, puede explicarse por dos factores:

El suelo arcilloso tiene más capacidad para reponer el P retirado por la planta en la solución, es decir, mayor poder buffer (Hernández, 2010).

El P puede difundir hacia la raíz a través del agua con más facilidad en un suelo arcilloso que en uno arenoso, debido a la mayor capacidad de retención de agua del primero (Hernández, 2010).

La difusión aparece como el mecanismo principal por el cual el P de la solución del suelo llega a la raíz. Según Barber (1994) este mecanismo opera por diferencias de concentración a pequeñas distancias (0.1 a 15mm). Los principales factores que afectan dicho mecanismo son:

- Temperatura. Con bajas temperaturas el coeficiente de difusión en agua disminuye, por un aumento en la viscosidad del agua (Ciampitti, 2009).
- Contenido de agua. Un mismo suelo presenta más facilidad para la difusión con mayor contenido de agua. Existe una mayor continuidad de los films de agua en los poros del suelo (Ciampitti, 2009).
- Factor tortuosidad. En un suelo con bajo contenido de humedad la tortuosidad es mayor por una discontinuidad en los films de agua. Con respecto a la textura, en un suelo pesado el camino se presentará más tortuoso que en un suelo liviano, pero el contenido de agua es mayor por lo que mejorará la difusión (Hernández, 2010).

Por otro lado, la siembra directa permite la acumulación de fósforo en los primeros centímetros del suelo, y podría resultar en deficiencia para el cultivo cuando el suelo está seco y con baja temperatura ya que la difusión del nutriente sería menor. Teóricamente, la concentración de nutrientes cerca de la superficie también podría inducir sistemas radiculares más superficiales lo que aumentaría la susceptibilidad a la sequía (Mallarino, 2005).

Esto implica una baja disponibilidad del nutriente para el cultivo, sumado a etapas tempranas del mismo van a ocasionar efectos negativos en el crecimiento vegetal.

En el caso de la soja, el objetivo es desarrollar un cultivo con óptimo estado a floración (R1-2 según Fehr et al., 1977) que permita interceptar eficientemente toda la radiación incidente y maximizar la tasa de acumulación de materia seca durante el período de llenado de granos (Vasilas et al., 1995).

Para alcanzar este objetivo, entre otros factores, el cultivo debe cubrir sus necesidades nutricionales.

En general, el cultivo de soja presenta requerimientos nutricionales por kg de grano producido e índices de cosecha de nutrientes mayores que los cereales. La soja requiere absorber 80 kg de nitrógeno, 33 kg de potasio, 8kg de fósforo, 16 kg de calcio, 9 kg de magnesio y 7 kg de azufre para producir una tonelada de grano. Si comparamos estas demandas con las de un cultivo de trigo (30 kg de nitrógeno, 19 kg de potasio, 5 kg de fósforo, 3 kg de calcio, 4 kg de magnesio y 5 kg de azufre), las demandas de un cultivo de soja son superiores a las de trigo, En cuanto a la extracción, la soja exporta 80-85% y 55-60% del P y K que absorbe, mientras que trigo y maíz exportan 70-75% y 20-25% del K absorbido (García s.f., Melgar 1995, Ferrando et al. 2001).

En cuanto a los nutrientes secundarios, la soja presenta requerimientos de S superiores a los de trigo y maíz, y para una eficiente fijación biológica de nitrógeno (FBN) requiere de micronutrientes tales como molibdeno (Mo), cobalto (Co), níquel (Ni), boro (B), hierro (Fe) y manganeso (Mn) (Baigorri 1999, Yamada 1999).

#### 2.4.2. Efectos sobre el crecimiento vegetal

Si la disponibilidad de P es alta las plantas absorben P rápidamente. Cuando han acumulado 25% de materia seca total han absorbido ya el 75% del P total. La absorción rápida del fósforo en las primeras etapas de vida de las plantas conduce a un rápido desarrollo. El tiempo requerido por las plantas para alcanzar la máxima velocidad de absorción de P disminuye a medida que aumenta la concentración de P en el medio (Williams, 1948).

Debido a la diferencia en las relaciones de desarrollo, las plantas que son deficientes en P maduran tarde en comparación con las plantas que están bien provistas de P (Glover, 1953).

En condiciones muy limitantes de fósforo, las plantas desarrollan un pobre sistema radicular, resultando en una exploración insuficiente del perfil del suelo y, por lo tanto, en menores eficiencias de uso del agua y nutrientes (Schwartz et al., 1878).

La caída en los rendimientos producto de una deficiencia de fósforo se debe en general a una disminución en el número de granos. El peso individual de los granos en general se ve menos afectado. En casos de deficiencias muy severas éste también puede disminuir aunque lo hace en una magnitud muy inferior al número de granos (Jaing et al., 1995). Según Ferraris (2004), esto no ocurriría para todos los ambientes ya que en situaciones con deficiencias nutricionales muy severas los suelos francos a franco-limosos tienen mayor capacidad para liberar fosfatos ante la demanda del cultivo que los suelos franco-arenosos, por lo que las deficiencias nutricionales para estas situaciones serían de menor magnitud.

A pesar de las pérdidas en el ambiente, la extracción por los cultivos representa la mayoría de las pérdidas de P de un suelo. Dado la pequeña fracción de P disponible durante el desarrollo de un cultivo, el factor de mayor significancia que controla la nutrición de la planta es la capacidad del suelo de mantener un adecuado abastecimiento de fósforo disponible durante períodos críticos de demanda del cultivo. La cantidad de fósforo de la solución del suelo es muy limitada y debe ser repuesta hasta dos veces al día o cientos de veces a lo largo del ciclo del cultivo (Roberts, 1995).

A pesar que antiguamente se consideró que la soja poseía baja respuesta a la fertilización, la investigación ha demostrado que si bien presenta menor respuesta que gramíneas como maíz y trigo, en general crece y se desarrolla mejor en suelos fértiles y en muchos casos responde a la fertilización directa (Baigorri, 2001). Los mayores rendimientos obtenidos en Argentina en los últimos años han resultado en una mayor demanda de P con respuestas en rendimiento en suelos de mayor nivel de P disponible (Parra 1997, Avellaneda et al. 1999, Melgar et al. 1999, Sánchez et al. 1999, Scheiner et al. 1999, Vivas 1999).

En los casos en que se ha observado una respuesta positiva a la fertilización, el aumento en el rendimiento no se debió a un aumento en el índice de cosecha, sino simplemente a un mayor crecimiento (Gutiérrez Boem et al., 2001).

En soja de 2<sup>o</sup> para la zafra 2000/2001 (Pergamino, Argentina) se observó que con dosis de 20 y 40 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> la producción fue 7,1 y 17 %, respectivamente, superior al testigo sin agregado de P (Irigoyen, 2001). Sin

embrago para las zafra 2003/2004 estas diferencias en rendimientos fueron superiores, del orden de 14,8 y 20,1 % en rendimiento para los mismos tratamientos. Para la zafra 2006/07 las diferencias fueron inferiores, en el entorno a 1,5 y 6,7 %, respectivamente (Irigoyen, 2001).

Una buena cobertura del suelo por el cultivo de soja a floración va a depender, entre otros factores, de la disponibilidad de P del suelo. Gutiérrez Boem et al. (2001) encontraron que una soja no fertilizada creciendo en un suelo con baja disponibilidad de P a floración capturó un 25% menos de la radiación. Los autores atribuyeron esto a que la deficiencia de P disminuyó tanto la velocidad de aparición de hojas como su tamaño.

En síntesis, una deficiencia de P en soja podría provocar una caída en los rendimientos por su efecto sobre la formación de área foliar y, por lo tanto, sobre la cantidad de radiación capturada y también por su efecto sobre la eficiencia de conversión de esta radiación en materia seca. La suma de estos efectos provoca un menor crecimiento entre floración y comienzo de llenado de grano, lo que genera un menor número de granos y por lo tanto un menor rendimiento (Gutiérrez Boem et al., 2001).

## 2.5. INDICADORES DE RESPUESTA EN SUELO Y PLANTA

### 2.5.1. Indicadores en suelo

En el mundo existen varios métodos de análisis de fósforo que a menudo dan resultados diferentes. Aún frente a un mismo análisis de suelos el resultado puede ser variable debido a que los suelos son de propiedades físicas y mineralógicas muy diferentes. Esto se debe a que los análisis de P en el suelo no miden la cantidad de P disponible para los cultivos, sino cierta cantidad que es proporcional a la cantidad disponible. Por lo tanto los métodos de análisis de suelos deben calibrarse para diferentes suelos de una región o país (Dahnke et al., 1990).

El proceso de calibración incluye la determinación del valor crítico del análisis o el rango de valores que separan suelos donde hay respuesta probable a la fertilización de los suelos donde la respuesta es poco probable (Dahnke et al., 1990).

La respuesta de los cultivos a la fertilización fosfatada depende del nivel de P disponible en el suelo, pero también es afectada por factores del suelo, del cultivo y de manejo del fertilizante. Entre los factores del suelo, se destacan la textura, la temperatura, el contenido de materia orgánica y el pH; mientras que entre los del cultivo deben mencionarse los requerimientos y el nivel de

rendimiento. El diagnóstico de la fertilización fosfatada se basa en el análisis de muestras de suelo del horizonte superficial utilizando un extractante adaptado a los suelos del área en evaluación.

La profundidad de muestreo está determinada por el nutriente o propiedad del suelo que se pretende cuantificar. Para fósforo se ha recomendado la profundidad de 0-20 cm. La profundidad de 20-40 cm no mejora la correlación con el crecimiento y la respuesta a la fertilización. Tampoco el muestreo 0-5 cm mejora dicha correlación (Zamuner et al., 2003), y tiene más variabilidad.

Una característica de la dinámica de P en los sistemas de SD es la estratificación a profundidad. Se encuentran mayores concentraciones de P disponible en la capa superficial (0 -10 cm) debido a la acumulación de residuos y a la aplicación superficial de fertilizantes fosfatados (Scheiner et al. 1998, Calviño et al. 2000).

A pesar de las diferencias en la distribución del P extractable a diferentes profundidades por efecto de la estratificación, los niveles críticos de P para SD coinciden con aquellos para LC cuando se muestrea el suelo a profundidad de 0-15 ó 0-20 cm (Calviño et al. 2000, Essington et al. 2000, Zamuner et al. 2004b). En el sudeste de Buenos Aires (Argentina) y en Uruguay se ha observado que los niveles críticos de P Bray 1 en el suelo para decidir la fertilización fosfatada de trigo y maíz son similares bajo SD y LC (García et al. 1997, Calviño et al. 2000, Bordoli et al. 2004).

El contenido de P disponible es utilizado para realizar la recomendación de la fertilización fosfatada del cultivo. No obstante, otras características del sitio deben ser consideradas para mejorar la precisión de la recomendación, como son el contenido de materia orgánica, la presencia de capas compactadas, la textura, la historia de fertilización con P, etc.

La soja se caracteriza por presentar niveles críticos (10-12 ppm) de P en suelo, por debajo de los cuales se observan respuestas significativas a la fertilización, menores a los de otros cultivos tales como alfalfa (20 a 25ppm en implantación y 18ppm para mantenimiento), trigo (12-14ppm) y maíz (12-13ppm). Datos extraídos del Curso de Fertilidad Facultad de Agronomía (Hernández, 2009).

Esta diferencia ha sido atribuida, entre otras causas, a cambios generados en el ambiente rizosférico del cultivo y al alto costo energético de los granos de soja (García, 2005).

Según información de INTA, Proyecto INTA Fertilizar y FA-UBA se ha demostrado que la respuesta del cultivo al agregado de fertilizante disminuye cuando el P disponible aumenta. Es decir que a medida que aumenta la disponibilidad de P en el suelo, la eficiencia de utilización del fertilizante por las plantas disminuye. El mismo señala una eficiencia de uso de 11 kg de soja por kg de P agregado y un nivel crítico estimado de 12-13 ppm de P Bray en suelo para soja de primera. Sin embargo otros autores señalan que es posible esperar un incremento de hasta 15 kg de soja por kg de P agregado (Echeverría et al., 2002).

Se han realizado diferentes trabajos en la Región Pampeana y Extra Pampeana los cuales han evaluado la respuesta a P en relación a la disponibilidad de este nutriente en el suelo. En el sudeste bonaerense, Echeverría y García (1998) indican como disponibilidad media de P Bray niveles entre 8-11 ppm, mientras para Tucumán, Sánchez y Lizondo (1999) determinaron respuestas positivas a la fertilización fosfatada en suelos con disponibilidades inferiores a 13 ppm. Estas diferencias se deben a diferentes tipos de suelos.

Los cultivos del proyecto FERTILIZAR del INTA han alcanzado un rendimiento relativo del 90-95% con niveles de P del suelo de 8-13 ppm. Por encima de este rango de disponibilidad (>13ppm) la probabilidad de respuesta es muy baja y se considera que la disponibilidad del nutriente para el cultivo de soja es alta. Por debajo del rango medio (<8ppm) la probabilidad de respuesta a la fertilización es alta.

Si se compara este rango medio de disponibilidad de P con los obtenidos en el medio-oeste norteamericano se observa que es similar o ligeramente inferior. La disponibilidad de P para el cultivo de soja, de acuerdo a los servicios de extensión públicos de varios estados del medio-oeste norteamericano muestran rangos medio de 16-20 ppm en Iowa (Voss et al., 1999), 11-15ppm en South Dakota (Gerwing et al., 1998) y 8-13 ppm en Wisconsin (Kelling et al., 1998).

De acuerdo con bibliografía nacional, los niveles críticos para soja por los cuales se esperaría respuesta vegetal al agregado de P se ubican en 10-12 ppm P Bray en suelos pesados, y 14-15 ppm P Bray en suelos arenosos (Hoffman, 2010). Estos indicadores fueron determinados para sojas de primera, no encontrándose información que cite niveles de referencia en sojas de segunda (Améndola, 1976).

Los estudios de respuesta al agregado de fertilizante fosfatado (superfosfato) realizados en INIA La Estanzuela cuantifican importantes

incrementos de producción cuando se parte de niveles bajos de disponibilidad de P en el suelo. Contabilizando el fertilizante utilizado durante un período de 4 años y el incremento de producción de alfalfa producido por esos tratamientos, la eficiencia fue de un mínimo de 47 kg de materia seca/ kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para la dosis más elevada (160 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> / ha/ año) a un máximo de 70 kg de materia seca/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tanto para las dosis de 40 como la de 80 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha/año. La rentabilidad del uso del fertilizante fosfatado parece contundente.

Por otra parte la capacidad buffer de P o poder amortiguador del suelo tiene un efecto directo sobre la cantidad de fertilizante que pasará a formas no disponibles para las plantas. En suelos de media a alta capacidad buffer, como los suelos rojos de Misiones o norte Corrientes, un 70% del P aplicado puede pasar rápidamente a formas no lábiles y poco disponibles para las plantas. Suelos franco limosos a franco arcillosos tienen baja capacidad de retención de P quedando un 40 a 50 % del P aplicado fácilmente disponible para las plantas, mientras que en los suelos de texturas gruesas, solo un 30 a 40 % pasa a formas no lábiles (Boschetti, s.f.).

En una experiencia realizada en la UBA, se encontró que alrededor del 50 % del P absorbido por plantas de soja, creciendo en un suelo muy deficiente, provenía del fertilizante; mientras que las que crecieron en suelos bien provistos, más del 80 % del P absorbido provino del suelo. Sin embargo las cantidades absorbidas proveniente del fertilizante, en términos absolutos, fueron en todos los casos similares. Esto pone en evidencia también que los estimadores de la disponibilidad de P en el suelo son muy eficientes para evaluar la capacidad de aprovisionamiento desde el suelo a las plantas pero no nos dicen nada del aprovechamiento del P proveniente del fertilizante (Quintero et al., s.f.).

Se puede decir finalmente que los métodos Bray u Olsen resultan apropiados para valorar la disponibilidad de P para las plantas, pero no son eficientes por si solos para orientarnos acerca de cuánto fertilizante aplicar. Son métodos de gran versatilidad mostrando muy buenas relaciones con el rendimiento y el P absorbido por las plantas para un conjunto de suelos y rendimientos muy diferentes. Sin embargo para hacer recomendación es de fertilización requieren de alguna determinación o índice que evalúe el poder de retención de fósforo p capacidad amortiguadora de suelo (Boschetti, s.f.).

#### 2.5.2. Indicadores foliares

Estos indicadores son de escasa importancia ya que el cultivo absorbe la mayor cantidad de fósforo en etapas tempranas de su crecimiento, por lo que el indicador de referencia es la disponibilidad de fósforo en el suelo antes de la

siembra.

Trabajos de Hanway et al. (s.f.) realizados en Iowa, Estados Unidos, citan que el 79 % del fósforo total se absorbió en los primeros 46 días después de la emergencia del cultivo. Esto determina la gran importancia del nutriente en etapas tempranas del cultivo.

La concentración de P así como la de otros nutrientes decrece con la madurez de la planta. La mayor concentración de P en la planta se encuentra en las hojas, siendo menor su concentración en las hojas basales (Lanyon et al., 1988).

Casanova y Gómez (s.f.) mostraron según análisis foliar de tallos, raíces y granos que la mayor concentración de fósforo se encuentra en raíces seguida de hojas, tallos y granos. A su vez marcan que la concentración de fósforo en la hoja trifoliada ubicada en lo más alto de la planta se correlacionaba significativamente con el aumento de la dosis de fósforo y en niveles considerados de suficiencia.

En general, los síntomas de deficiencia de P no son particularmente llamativos o característicos. Las deficiencias de P es difícil de diagnosticar por examen visual de plantas individuales son más notables en el campo como áreas de crecimiento más reducido.

Una deficiencia de P da como resultado plantas pequeñas, de escaso crecimiento con reducido sistema radicular y tallos delgados. El P se moviliza rápidamente en la planta y cuando ocurre una deficiencia, el P es transferido de los tejidos viejos a las partes en más activo crecimiento. Los síntomas de deficiencia se observan al principio generalmente en hojas viejas (IPNI, s.f.).

Las deficiencias de fósforo reducen el crecimiento de las plantas, hojas pequeñas, de color verde oscuro y de mayor grosor (Gutiérrez Boem et al., 2001). En la mayoría de las plantas estos síntomas aparecen cuando la concentración del fósforo en las hojas es inferior al 0,2%.

Aunque una deficiencia extrema de P puede ocasionar un amarillamiento foliar, la apariencia más común es un color azulado oscuro que puede estar acompañado con tintes de color bronce o púrpura, a menudo con pequeñas lesiones internervales (IPNI, s.f.).

Generalmente, el P inadecuado deprime los procesos de utilización de carbohidratos, aun cuando continúa la producción de estos compuestos por medio de la fotosíntesis. Esto resulta en una acumulación de carbohidratos

y el desarrollo de los colores mencionados anteriormente (IPNI, s.f.).

## 2.6. NECESIDADES DE AGUA POR EL CULTIVO DE SOJA

El consumo de agua de un cultivo es el valor de la transpiración acumulada a lo largo de su ciclo (Enrico et al., 2010). Las necesidades de agua del cultivo de soja de primera y segunda varían de 500 a 600 mm y de 400 a 500 mm, respectivamente (Enrico et al., 2010).

Andriani et al. (1991) señala que el período reproductivo es el más sensible a la falta de agua. La intensidad de la deficiencia va a depender de la disponibilidad del agua existente en el suelo, capaz de ser explorado por las raíces, y de la capacidad de las mismas para extraerla. Internacionalmente se ha establecido, para la mayoría de las plantas cultivadas y diferentes ambientes, el 50% de agua útil en el suelo como límite por debajo del cual comienzan a producirse deficiencias hídricas que afectan la producción (Andriani et al., 1991).

## 2.7. COMPONENTES DEL RENDIMIENTO EN GRANO

El rendimiento en grano consta de en dos grandes componentes: número de granos/m<sup>2</sup> y peso de grano (PG). El primero de ellos es el que está más influenciado por las prácticas de manejo que se apliquen mientras que el segundo tiene un gran componente genético que rige sus variaciones frente a cambios en el ambiente. Por lo tanto, estos componentes del rendimiento pueden ser modificados por el genotipo, el ambiente y el manejo afectando el rendimiento final. El grado de sensibilidad de cada componente a los factores ambientales varía con el estado de desarrollo del cultivo (Andrade et al., 2000).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos fueron realizados en la zafra de verano 2010/2011, en 20 sitios pertenecientes a chacras comerciales de productores. Se reportaron 14 sitios debido a que los restantes fueron descartados por problemas de emergencia del cultivo, como consecuencia de déficit hídrico.

Las chacras se seleccionaron en base a niveles de P en el suelo al momento de la siembra de la soja de segunda. Se optó por chacras que preferentemente tuvieran niveles bajos de P ya que se evaluó el rendimiento frente al agregado de 2 dosis de P en forma conjunta con el agregado de K.

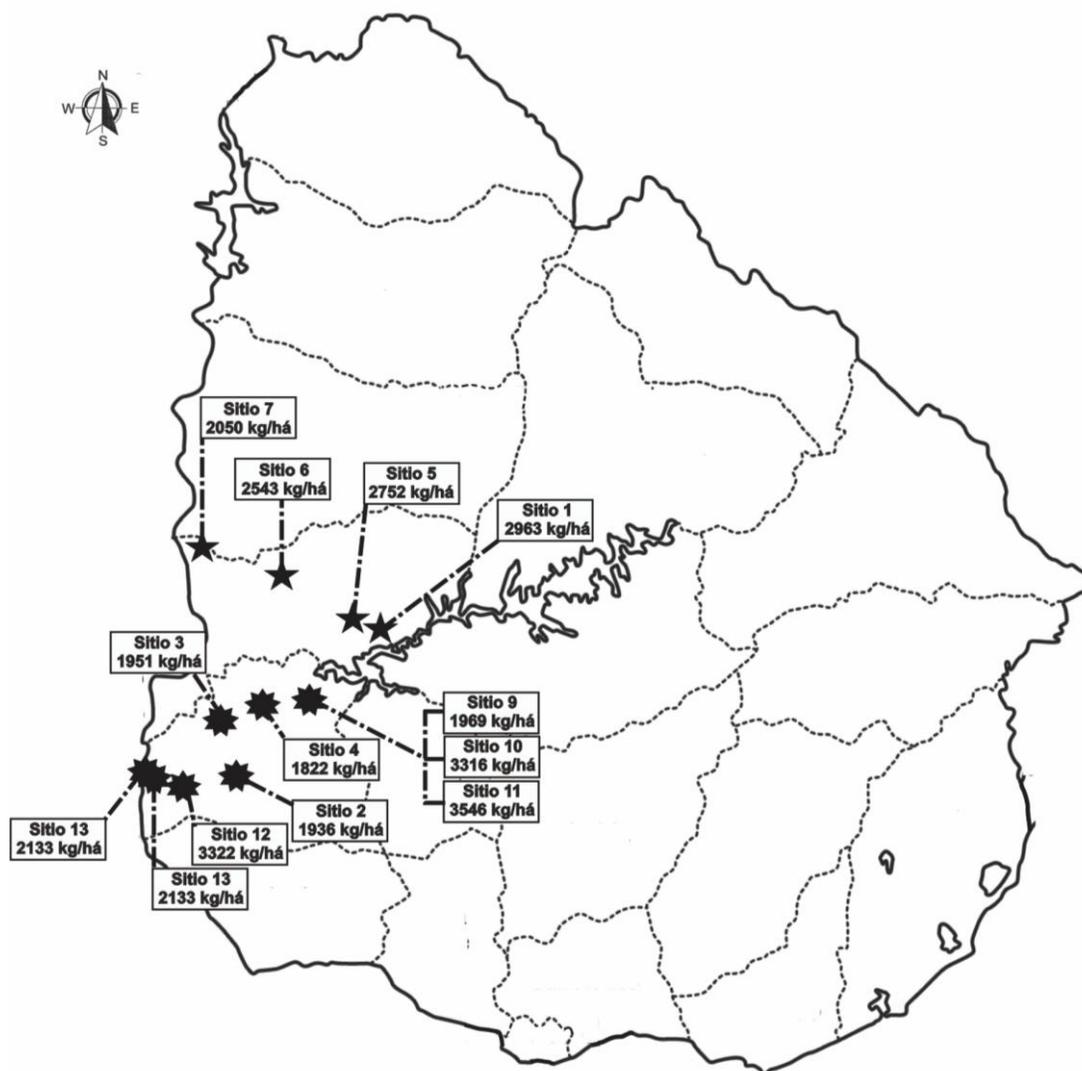


Figura 1: Ubicación de cada sitio experimental.

Cuadro 1: Caracterización de sitios.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S9	S10	S11	S12	S13	S14
<b>Zona</b>	Young Sur	Mercedes	Soriano, Noreste	Soriano Noreste	Young Sur	Young Norte	Young Norte	Palmitas	Palmitas	Palmitas	Dolores	La Concordia	La Concordia
<b>CONEAT</b>	11,5	11,5	11,5	10,1	11,5	11,4 y 11,5	10,9	10,2 y 9,1	10,2 y 9,1	10,2 y 9,1	11,2	11,2	11,2
<b>Unidad de suelo</b>	Young	Fray Bentos	Bequelo	Bequelo	Young	Young	San Manuel	Bellaco	Bellaco	Bellaco	Fray Bentos	Fray Bentos	Fray Bentos
<b>Años en agricultura</b>	1	+8	+8	+8	7	2	2	4	4	4	+8	+8	+8
<b>Nros de cultivos</b>	2	5	7	8	11	4	3	6	6	6	14	14	15
<b>Nro Sojas previas</b>	1	7	5	6	6	1	2	3	3	3	5	6	6
<b>Antecesor inmediato</b>	Cebada	Raigras	Raigras	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo	Cebada	Trigo	Trigo
<b>Fecha de siembra</b>	20-nov	15-dic	16-dic	17-dic	17-dic	14-dic	21-dic	18-dic	21-dic	19-dic	15-dic	12-dic	14-dic
<b>VARIEDAD</b>	DM 5.1i	A 6411	A 6411	DM 6.2i	DM 5.5i	A 5009	A 5009	A 5909	A 5909	A 5909	DM 6.2i	DM 5.5i	DM 5.5i
<b>P (ppm)*</b>	12,2	4,9	8,5	5,6	8	15,3	19,7	16,9	11	7,6	15,9	24,8	9,3
<b>K (meq/100 g)*</b>	0,74	0,50	0,47	0,74	0,53	0,87	0,32	0,59	0,53	0,58	0,61	0,55	0,35
<b>% MO*</b>	5,6	3,7	5,1	5	5,6	5,7	4,6	3,9	4,8	3,7	3,7	4,3	4,3
<b>pH H<sub>2</sub>O*</b>	5,98	5,5	5,48	5,38	5,55	5,74	5,3	5,3	5,7	6,1	5,7	5,78	5,8
<b>Ca (meq/100g)*</b>	26,6	20,1	22,6	13,4	14,8	15,9	12,4	22,6	23,8	25,4	27,7	14,8	11,7
<b>Mg (meq/100g)*</b>	1,72	1,96	2,68	1,2	2,43	3,79	2,16	1,61	3,41	2,3	2,54	1,76	2,14

\*Dato promedio para el lugar de intalación del ensayo a siembra – S. Sitio

Todos los sitios se cultivaron bajo siembra directa, y el manejo recibido fue el aplicado por el productor a excepción de la fertilización.

Al momento de la instalación de los ensayos se realizó un muestreo de suelo por bloque de 0 a 20 cm de profundidad. Las muestras fueron secadas con estufa durante 48 horas a 60°C y luego molidas hasta un tamaño menor a 2 mm.

En cada muestra se midió pH en agua y KCl, materia orgánica (MO) por el método de Walkley y Black (1982), P extractable por el método de Bray-1 (Bray y Kurtz, 1945) y bases intercambiables (Ca, Mg, K y Na) por el método de extracción simple con acetato de amonio al 1 M. El contenido de Ca y Mg se determinó por espectrometría de absorción atómica y el de K y Na por espectrometría de emisión (Isaac y Kerber, 1971).

### 3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS

Los tratamientos fueron un total de seis, con tres repeticiones por sitio, siendo el diseño experimental de bloques completos al azar. El tamaño de las parcelas fue de 4 x 8 m.

Los tratamientos consistieron en: dos testigos (uno sin agregado de fertilizante con presencia de cultivo y otro sin fertilización sin cultivo con y sin rastrojo), y cuatro con diferentes dosis y nutrientes agregados (P, K y S) en superficie.

Cuadro 2: Características de los ensayos

Tratamiento		P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /há)	K (kg K <sub>2</sub> O/há)	S (kg SO <sub>4</sub> /há)	Fuente
1	Con cultivo	0	0	0	--
2	Con cultivo	30	0	0	0-46-46-0
3	Con cultivo	60	0	0	0-46-46-0
4	Con cultivo	60	60	0	0-46-46-0 y 0-0-60
5	Con cultivo	60	60	10	0-23-0 5S y 0-0-60
6*	Sin cultivo	0	0	0	--

\*A los 30 días post-fertilización se le quitó el rastrojo al 50% de la parcela.

Para el resto de los muestreos de suelo (30, 60, 90 días post fertilización (dpf) y a la cosecha) se realizaron solo análisis de P Bray No. 1 y K a 0-20 cm.

Por su parte se extrajeron muestras de rastrojo a la siembra y 60 dpf para estimar el aporte de K por parte de este al suelo. Éstas se realizaron extrayendo la paja del cultivo antecesor (trigo, cebada o raigrás) que quedaba dentro de un cuadrado de 30 cm de lado lo cual permitió inferir la cantidad de K que el rastrojo devolvió al suelo en ese lapso de dos meses.

Para hacer las estimaciones de aporte de K del rastrojo, se calculó como la diferencia entre el K final (a los 60 días) menos el inicial (a la siembra). Por lo tanto se asumió que esta diferencia fue lo que aportaron de K los residuos.

En el estadio R2-R3 del cultivo se midió el contenido de P y K en hoja (la última hoja completamente desarrollada), tomándose 20 hojas por parcela.

En todos los ensayos, se cosecharon 2,28 m<sup>2</sup> en forma manual para cada tratamiento donde también se contaron las plantas a cosecha. La cosecha consistió en colocar una cinta métrica de 2 m de longitud entre la fila y cortar las dos filas de plantas. Este método se repitió 3 veces en cada tratamiento.

El rendimiento de grano se ajustó a un 13% de humedad.

## 3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

### 3.2.1. Modelo estadístico

El modelo estadístico corresponde al diseño experimental en bloques completos al azar, el cual se presenta a continuación.

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$ : Rendimiento en grano (kg ha<sup>-1</sup>)

$\mu$ : Media general del ensayo

$\alpha_i$ : Efecto del tratamiento

$\beta_j$ : Efecto del bloque

$\varepsilon_{ij}$ : Error experimental

$i$ : 1, 2, ..., 5.

$j$ : 1, 2, 3.

Se consideraron los siguientes supuestos:

- Material experimental heterogéneo en un sentido, agrupable en bloques.
- Bloques homogéneos y diferentes entre ellos.

- Se asignan, por bloque, todos los tratamientos en un proceso completamente aleatorio.
- Igual número de repeticiones por tratamiento.

### 3.2.2. Análisis de la varianza

Se utilizó el test de LSD Fisher al 5% para la comparación de medias de los rendimientos de todos los tratamientos y por otra parte las medias de los rendimientos de los tratamientos sólo con fertilizante potásico. También se compararon los niveles de K en suelo entre momentos de muestreo y entre diferentes tratamientos, cantidad de rastrojo en superficie según cultivo y contenido de K en los residuos.

### 3.2.3. Análisis de los factores en determinar el rendimiento.

Con el fin de analizar qué factores pudieron estar asociados con la variación del rendimiento observada (en la medida que el agua total durante el ciclo y el período crítico no fue relevante), se utilizó la rutina Partitioning del SAS JMP 8.2. Esta rutina realiza particiones recursivas de datos de acuerdo a una relación entre los valores X (factores) e Y (rendimiento), para la creación de un árbol de particiones o divisiones. Mediante una búsqueda exhaustiva de todas las agrupaciones de valores posibles, se encuentra aquella agrupación de valores (X) que mejor predicen el valor (Y).

Estas divisiones se realizan de forma recursiva hasta generar un árbol de particiones que permite detectar en qué orden se ubican los factores de producción y variables de mayor peso relativo. Los factores y variables de cada sitio (valores X) incluidas en el análisis fueron: Localidad, Grupo CONEAT, Unidad de Suelos, Años de Agricultura, No. de Cultivos y Sojas Previas, Sistema de Laboreo, Topografía, Antecesor, Fecha de Siembra, Variedad, Población, P Bray No. 1 (ppm) siembra, K (meq/100g) siembra, Fertilización Basal, Lluvias totales y por período (R3-R6, R6-R8), P Bray No. 1 (ppm) invierno anterior, etc.

Como valor Y, se tomó el rendimiento potencial general de todos los sitios. Éste se realizó tomando en cuenta 38 valores (n=38), los cuales se corresponden con el tratamiento de máximo rendimiento de cada bloque para cada sitio (a excepción del Bloque 2 del sitio 14 el cual presentó problemas de implantación y por ende fue eliminado). A medida que el árbol desciende de categoría, el valor “n” disminuye, ya que el número de datos que cumplen con la clasificación estipulada es menor.

### 3.3. HIPÓTESIS DEL TRABAJO

El cultivo de soja de segunda responde al agregado de P, cuando los niveles en suelos están por debajo de los niveles críticos de referencia.

### 3.4. OBJETIVOS DEL TRABAJO

Analizar la respuesta al agregado de P a la siembra y su relación con el nivel de P en suelo de soja de segunda.

Generar información que permita conocer y describir la evolución del P en el suelo y su relación con el aporte de P por los residuos.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

#### 4.1.1. Escenario climático verano 2010/2011

El verano 2010/2011 se caracterizó por presentar condiciones más secas respecto a lo normal para la totalidad del territorio nacional (fenómeno “La Niña”) (URUGUAY. MDN. DNM, 2010).

A continuación se ubican los sitios, donde se encontraban los ensayos, en un Mapa de Precipitación Acumulada INIA GRAS (Figura 2a), para el período diciembre 2010 - febrero 2011. Como puede observarse, en forma general al norte del país, las precipitaciones acumuladas en dicho período fueron mayores. Las chacras ubicadas en Soriano Norte y Río Negro son aquellas que recibieron mayor cantidad de precipitaciones acumuladas en el período mencionado.

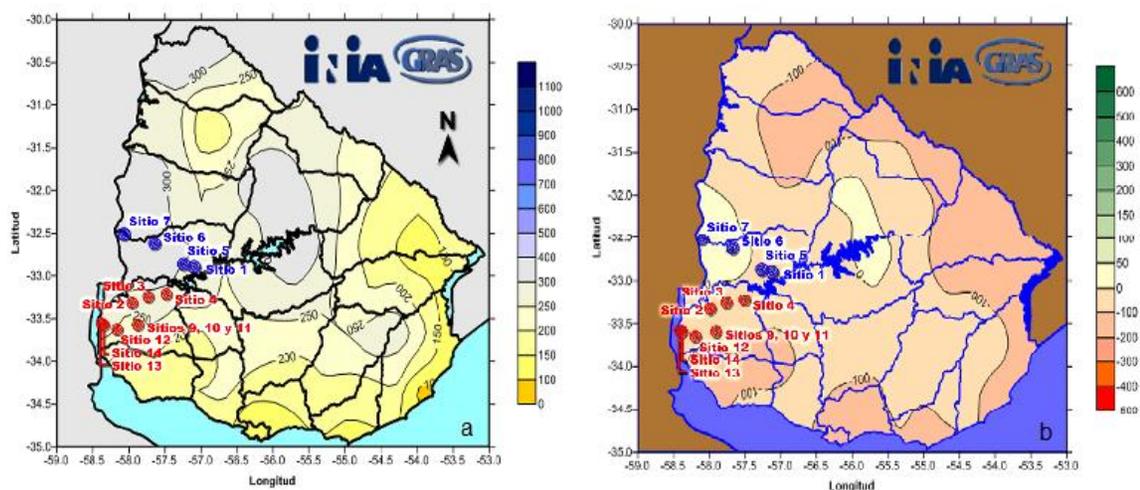


Figura 2: Ubicación de los sitios experimentales en mapas INIA-GRAS: (a) precipitaciones acumuladas desde diciembre 2010 a febrero 2011, (b) ocurrencia de precipitaciones para el mismo período en comparación con la media histórica 1961-2000.

En azul se indican los sitios ubicados al norte del Río Negro y en rojo los que se encuentran al sur del mismo.

Asimismo se puede realizar una comparación de las precipitaciones ocurridas en el período diciembre 2010 - febrero 2011 (Figura 2b), con el mismo período pero para la serie histórica 1961-2000. Esto se presenta a modo de desvío de las precipitaciones en el período y permite “cuantificar” el déficit o

exceso del año en particular, con respecto a la media histórica. Para este caso en particular se puede ver que en 11 de las 13 chacras se encuentran ubicadas en zonas donde llovió menos que la media histórica 1961-2000. El déficit para el período en cuestión fue entre 0 y 100 mm en Soriano. En cambio, para los sitios ubicados en el norte de Rio Negro (Sitios 1, 5, 6 y 7) las precipitaciones se encontraron entre 0 y 50 mm por encima de la media. Esto afirma lo anteriormente mencionado, es decir, en general, los sitios ubicados hacia el norte del país recibieron mayor cantidad de lluvias.

#### 4.1.2. Caracterización climática de los ensayos

Si bien es importante haber descripto el panorama general de la situación climática de la zafra de verano 2010/2011, es necesaria la discusión de la situación particular de cada sitio y evaluar su impacto en el rendimiento.

En base a Gil et al. (1998), Enrico et al. (2010) se podría esperar que exista una correlación entre las precipitaciones acumuladas durante el ciclo del cultivo y el rendimiento potencial de la chacra. Es importante mencionar que el concepto de rendimiento potencial refiere, en este caso, al rendimiento del tratamiento de máximo rendimiento en cada sitio experimental.

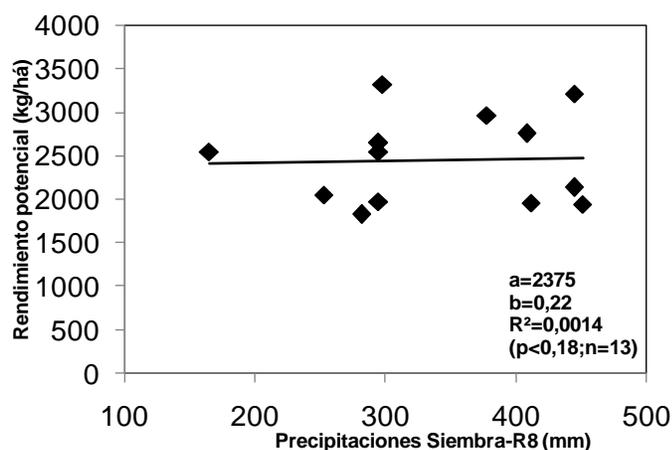


Figura 3: Rendimiento potencial según precipitaciones (mm) para el total del período del cultivo (siembra-R8).

A nivel de rendimientos potenciales obtenidos en los ensayos, se observa que existe una variabilidad muy alta, y en ausencia de relación con el total de precipitaciones durante el ciclo del cultivo, evidenciado por el bajo valor de  $R^2$  (Figura 3). Igualmente en casos donde las precipitaciones totales no fueron una limitante para el cultivo (450-500 mm en el período), la variabilidad

en rendimiento fue muy alta, por lo que hay otras variables que explican la variación de rendimiento observada.

Podría pensarse que la información anterior esté condicionada por la distribución de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo, ya que si bien en términos absolutos las lluvias no fueron escasas, podrían no haber ocurrido cuando el cultivo realmente las necesita para construir y concretar rendimiento. En la figura 5 se presenta con mayor detalle la distribución de las precipitaciones, y el total de agua durante el período crítico (R3-R6).

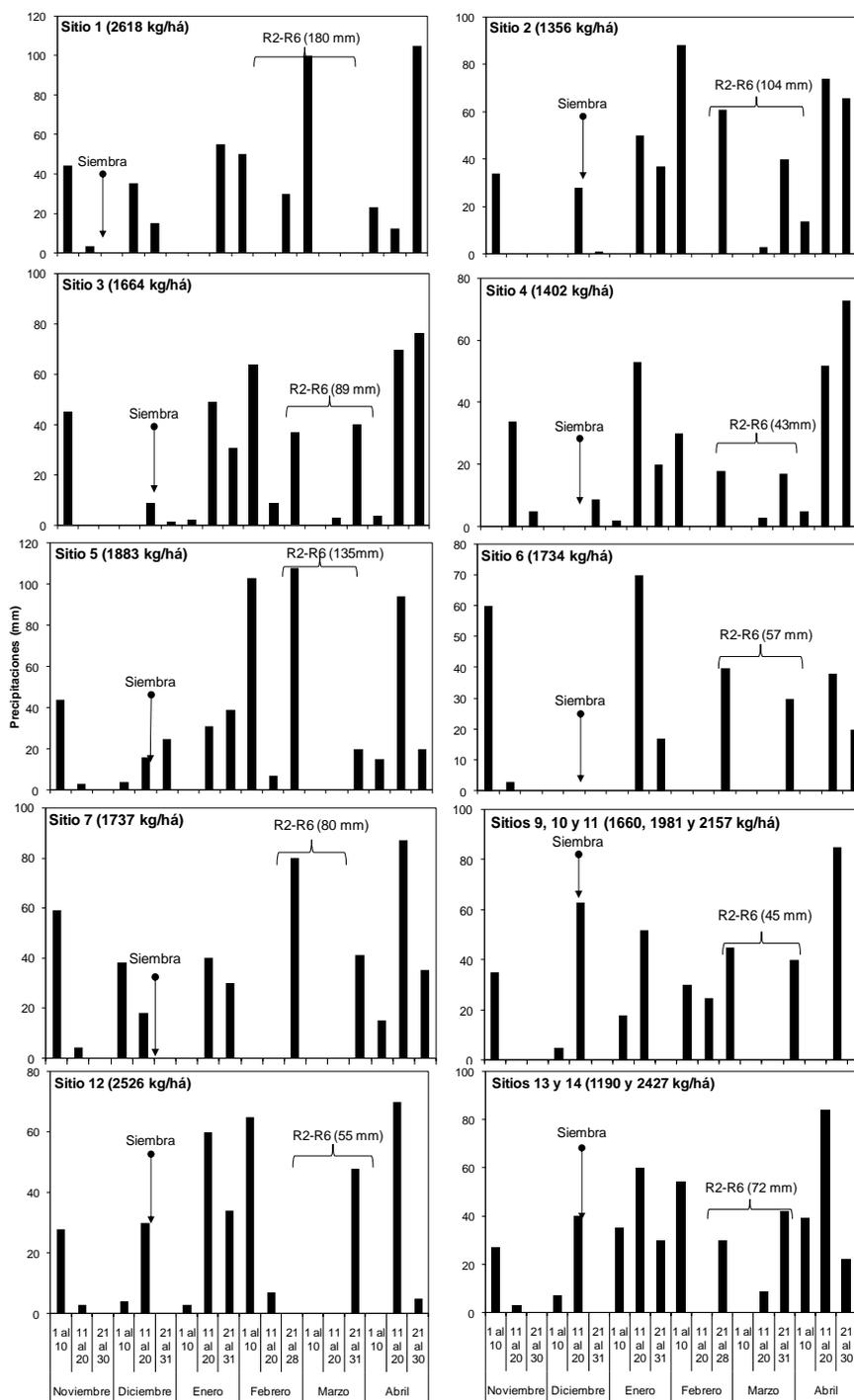


Figura 4: Distribución de las precipitaciones a lo largo del ciclo del cultivo, incluyendo el período crítico R3-R6.

En primer lugar se puede ver que existe amplia variabilidad en las lluvias sitio a sitio. Por otra parte hay sitios en donde no se diferencia la lluvia total y por ende fueron representados en un mismo grafico. Tal es el caso de los sitios 9, 10 y 11 que se encuentran dentro del establecimiento “Santa Maruja” y del sitio 13 y 14 que ambos se encuentran muy próximos.

En la Figura 5 se muestra la relación entre la lluvia en el período crítico y fase final de llenado de grano, con el rendimiento en grano.

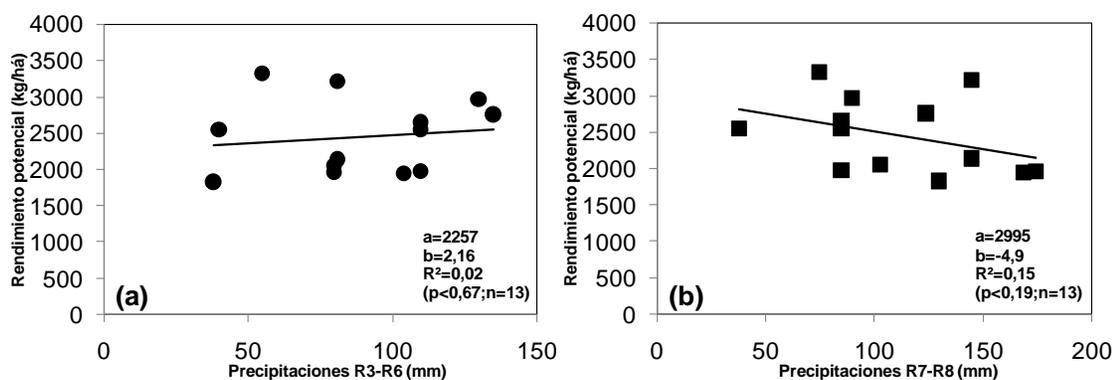


Figura 5: Relación entre el rendimiento del cultivo de soja y precipitaciones en el período crítico (PC) R3-R6 (a), y en el final del ciclo R6-R8 (b).

Como se puede ver (Figura 5a), si bien la correlación es levemente mejor, si comparamos con la correlación que existía entre el rendimiento con las lluvias en el período siembra-R8, ésta es demasiado baja y no significativa como para catalogarla como un factor importante asociado a la variación de los rendimientos en este trabajo.

En la Figura 5b se observa una amplia dispersión ( $R^2 = 0,15$ ), sin embargo existe cierta tendencia negativa del exceso de lluvias a fin de ciclo sobre el rendimiento. Por encima de 150 mm en fin de ciclo los rendimientos no superan los 2000 kg. Esto podría deberse a que mayores lluvias se asocian a mayor nubosidad, menor radiación, menor TCC (Tasa de Crecimiento del Cultivo) y menor rendimiento (Andrade et al., 2000).

En resumen y para este año en particular, se puede ver que la correlación que existe entre el rendimiento del cultivo, con las lluvias totales en el cultivo y en el período crítico son bajas. Ello lleva a suponer que pueden existir otros factores más importantes en cuanto a la variación de rendimiento observada y no a cuestionar la relación entre el agua disponible en el PC y rendimiento en grano (Andrade et al., 2000).

## 4.2. RENDIMIENTO Y COMPONENTES

### 4.2.1. Rendimiento en grano

El rendimiento promedio de soja de segunda varió entre 3322 y 786 kg ha<sup>-1</sup>, a través de todos los sitios. Estos valores promediaron en 1880 kg ha<sup>-1</sup>, posicionándose cercanos a los rendimientos obtenidos a nivel nacional para soja de segunda 1960 kg ha<sup>-1</sup>. A continuación se presentan los resultados obtenidos para los diferentes tratamientos en cada sitio experimental.

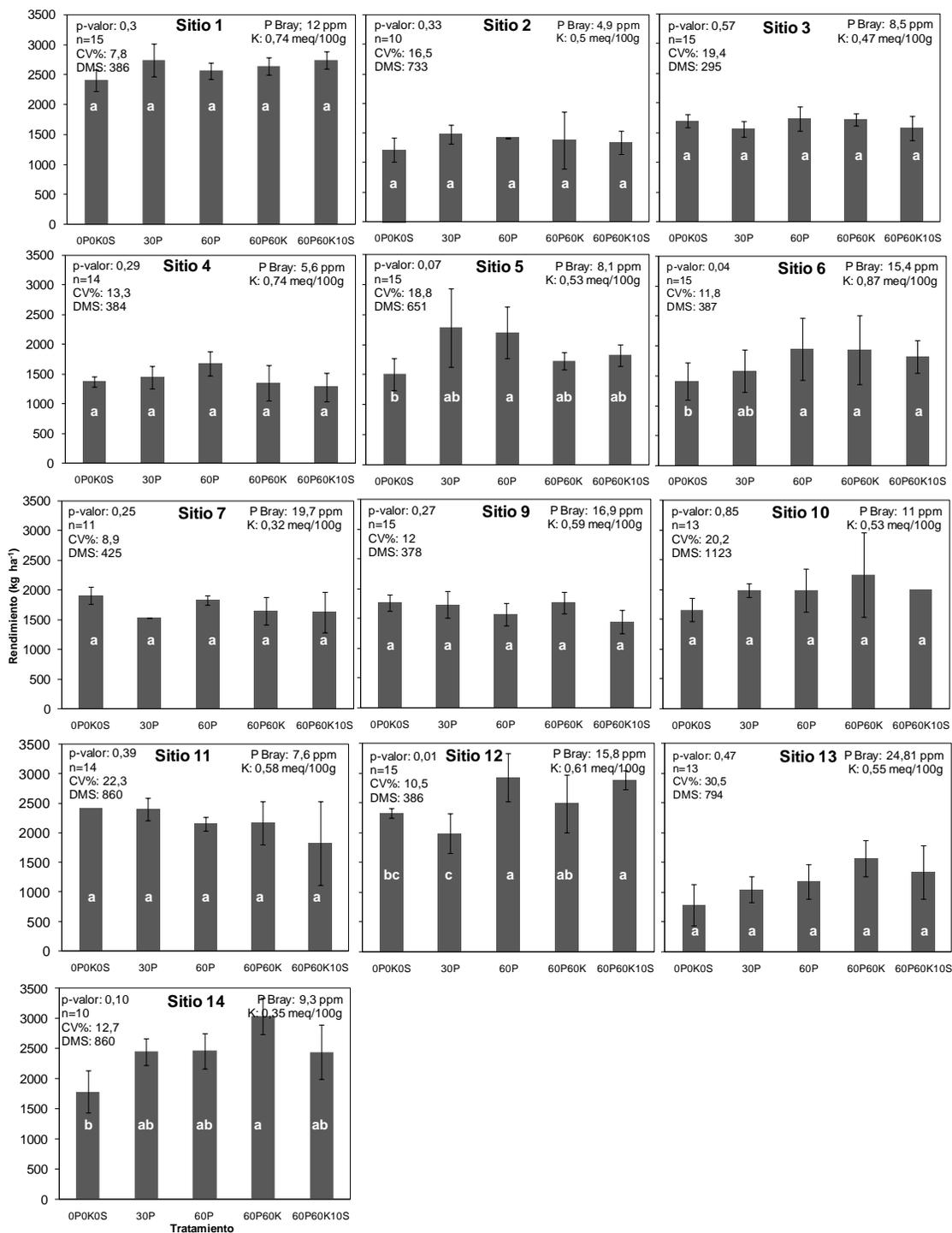


Figura 6: Rendimiento promedio por tratamiento para cada sitio de investigación, incluyendo el resultado de comparación de medias de LSD Fisher al 5 % (a, b, c) y el desvío estándar ( $\delta$ ).

En primer orden se puede apreciar que en ninguno de los sitios se obtuvo respuesta al Azufre (S).

Por otra parte, en sólo 4 sitios se observó respuesta a la fertilización con P, siendo la significancia de esta diferencia menor del 5% ( $p$ -valor $<0,05$ ) para dos sitios, 6 y 12, y menor del 10% ( $p$ -valor $<0,10$ ) para los dos restantes, 5 y 14 (ver sección 4.3.).

Se puede observar en el Cuadro 3 que en ninguno de los sitios en estudio hubo diferencias significativas entre el tratamiento 60P y 60P60K, es decir que no hubo diferencias entre los tratamientos frente al agregado de K. Cabe destacar que en este caso el  $p$ -valor del análisis de medias de LSD Fisher tiene en cuenta la variabilidad de todos los tratamientos, por ende se deben analizar sólo los tratamientos 0P0K, 60P0K y 60P60 K (Arcaus et al., 2012).

Cuadro 3. Rendimiento promedio por tratamiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) según sitio experimental.

Sitio	Rendimiento medio por tratamiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ )			p-valor	CV (%)
	0P0K	60P0K	60P60K		
1	2406	2562	2641	0,0013	1
2	1223	1418	1382	0,87	29
3	1704	1739	1721	0,83	4
4	1363	1676	1342	0,25	11
5	1507	2203	1729	0,03	11
6	1401	1947	1935	0,09	15
7	1909	1829	1648	0,21	5
9	1772	1569	1771	0,4	11
10	1660	1990	2251	0,33	16
11	2410	2151	2168	0,71	11
12	2331	2928	2494	0,18	12
13	792	1183	1571	0,58	47
14	1774	2457	3028	0,15	47

#### 4.2.2. Componentes del rendimiento

Como se puede observar en la Figura 7a hay una estrecha relación entre el número de granos y el rendimiento, es decir, a medida que el número de granos aumenta también lo hace el rendimiento, esto coincide con trabajos de Kantolic (2003). A su vez se puede ver una zona de “outliers” que presenta una línea de tendencia diferente, de mayor rendimiento y con una pendiente mayor. Es importante señalar que estos valores no se consideran en la regresión. Esto último ocurre en el sitio 12 (“Media Lucha”) pudiendo asociarse

a la variedad utilizada (DM 6.2i) dado que a un mismo número de granos presenta un PG mayor, Figura 7c.

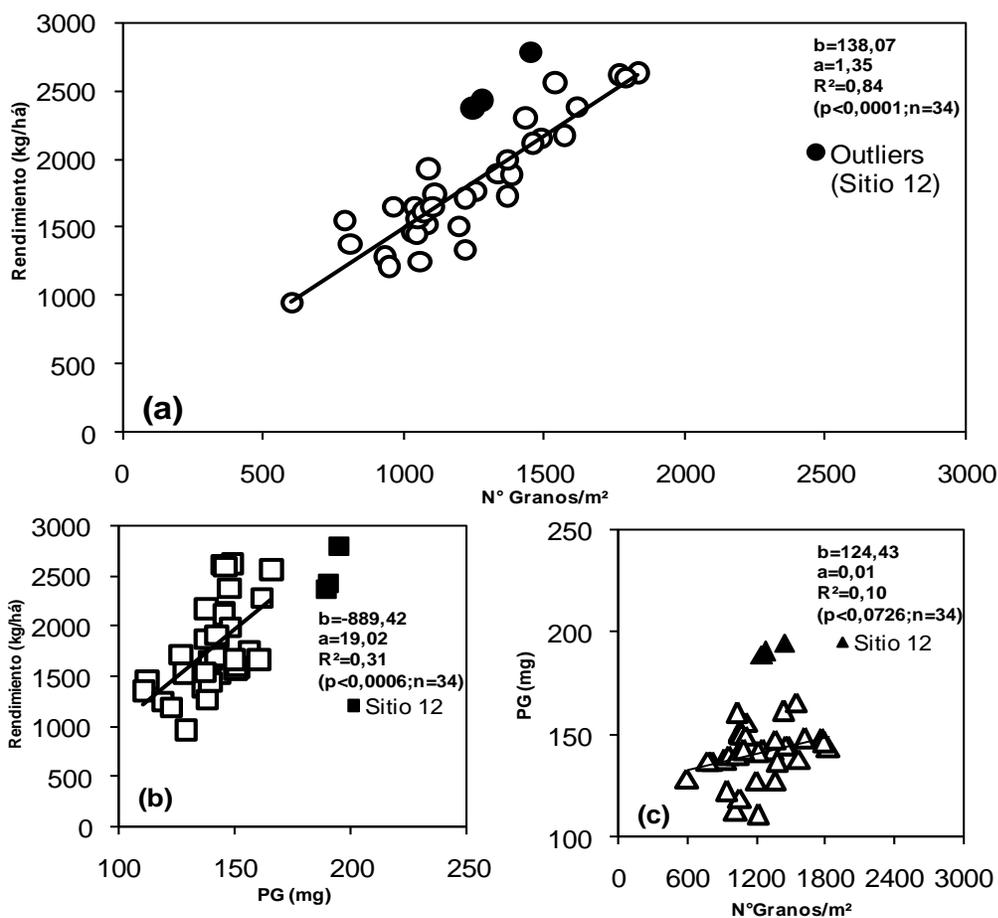
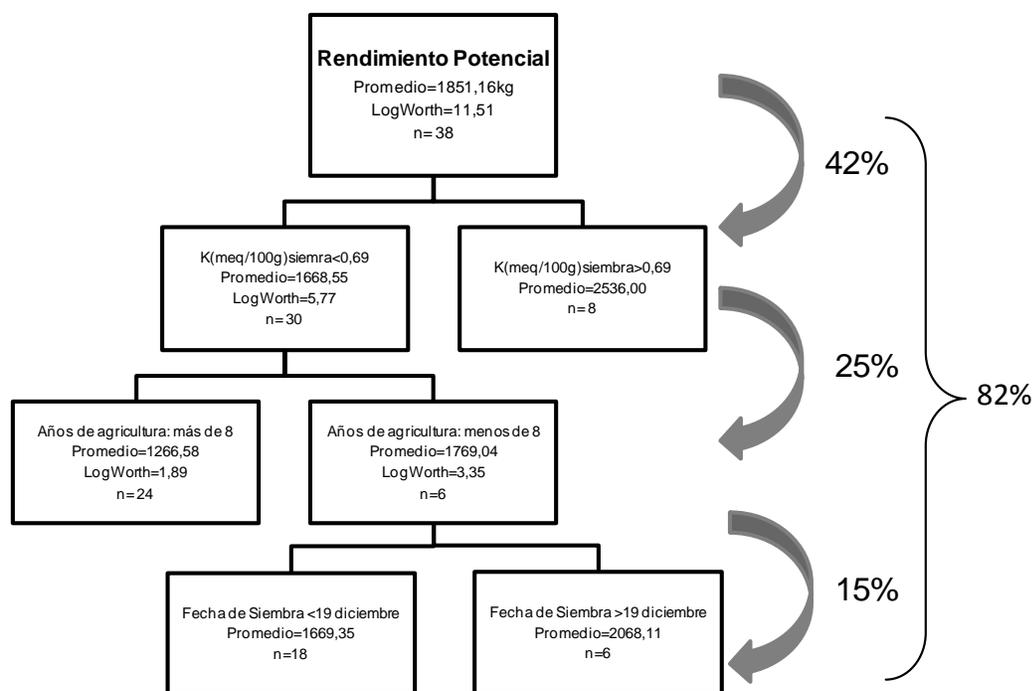


Figura 7: Rendimiento en función del número de granos (a), en función del PG (b), y PG en función del número de granos (c). Outliers (símbolos rellenos) no fueron considerados al momento de realizar las regresiones.

La Figura 7b muestra la relación existente entre el PG y el rendimiento, si bien el coeficiente de correlación es bajo ( $R^2= 0,31$ ) la tendencia marca que en los sitios de bajo número grano se asociaron a los menores rendimientos, los cuales también presentaron menor PG (Figura 7c). Por tanto el ambiente que limitó al número de granos también imposibilitó la compensación por PG.

#### 4.2.3. Factores determinantes del rendimiento

La agrupación de los factores que explicaron el rendimiento, se presenta en un árbol en la siguiente figura.



\*Cabe destacar que el LogWorth sería el  $-\log_{10}$  de p valor (0,05), siendo en este caso 1,3. Valores mayores a este último indican que la significancia es superior al 5% por ende justifica otro agrupamiento en el nivel inferior.

Figura 8: Árbol de partición de los factores que explican los rendimientos potenciales, siendo las flechas y los porcentajes el impacto individual de cada factor.

Como puede observarse en la Figura 8, el 82% de la variación en rendimiento potencial fue explicado por 3 factores ( $R^2 = 0,82$ ). Es importante mencionar que factores que a priori se hubiera esperado que estén en mayor correlación con el rendimiento, tales como Población ( $\text{pl m}^{-2}$ ) y precipitaciones en el período crítico resultaron no tener significancia para este año en particular.

El primer factor que se destaca como más importante explicando el 42% de la variación del rendimiento, es el nivel de K a la siembra. Según este análisis el nivel de K a la siembra que determina la agrupación en dos grandes grupos es 0,69 meq/100g suelo. El rendimiento promedio en chacras con más de 0,69 meq/100g es de 2536  $\text{kg ha}^{-1}$ , el cual se destaca por ser el rendimiento promedio más elevado dentro de las agrupaciones obtenidas, mientras que el rendimiento promedio de chacras que está por debajo de 0,69 meq/100g a la siembra es de 1668  $\text{kg ha}^{-1}$ , lo cual es una diferencia muy importante entre ambos grupos (34%).

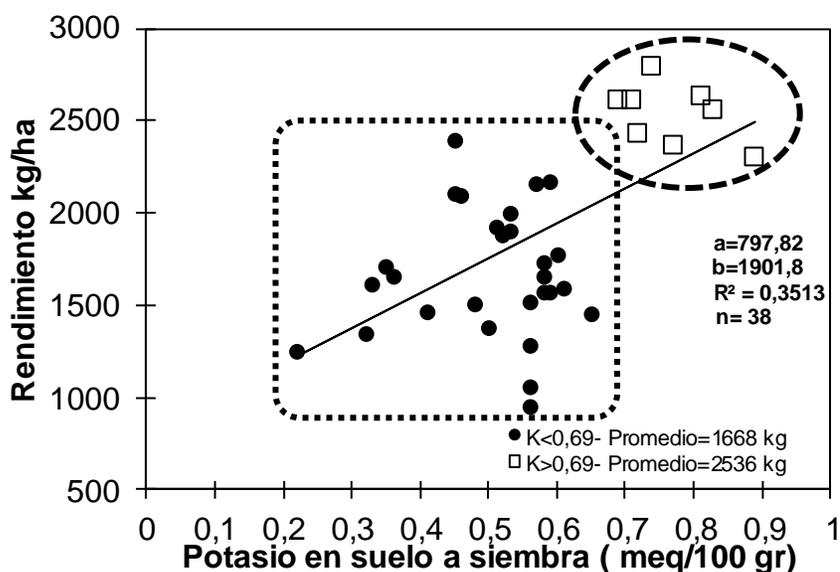


Figura 9: Impacto del nivel de K a la siembra, en el rendimiento potencial.

En la Figura 9 se puede observar que 0,69 meq/100g a la siembra, sería el nivel que separa ambos grupos, con un rendimiento promedio mayor del grupo de chacras con más de 0,69 meq/100g, el cual es muy similar al rendimiento superior del grupo de chacras que presenta menos de 0,69 meq/100g suelo.

Las chacras que para este caso se destacaron teniendo mayores niveles de K y mayor rendimiento, son el Sitio 1 (Young), 12 (Dolores) y 14 (La Concordia). Es importante aclarar que si bien el factor que separa altos y bajos rendimientos en este caso es el nivel de K a la siembra, puede ser que no todo se deba a este factor sino por otras características edáficas asociadas. De las variables incluidas en este tipo de análisis, el K fue la más relacionada al tipo de suelo, lo cual se vincula no sólo con características químicas sino también físicas (profundidad, compactación, contenido de materia orgánica, estructura, drenaje, etc).

Por otra parte para aquellos sitios que presentaban menos de 0,69 meq/100g suelo a la siembra, destacó como segundo factor de importancia en la variación del rendimiento, la historia de chacra o edad de la chacra. Con el mismo criterio subclasificó a aquellas chacras que tenían menos de 8 años de agricultura, y por fecha de siembra, explicando el 82% del rendimiento potencial (Figura 10).

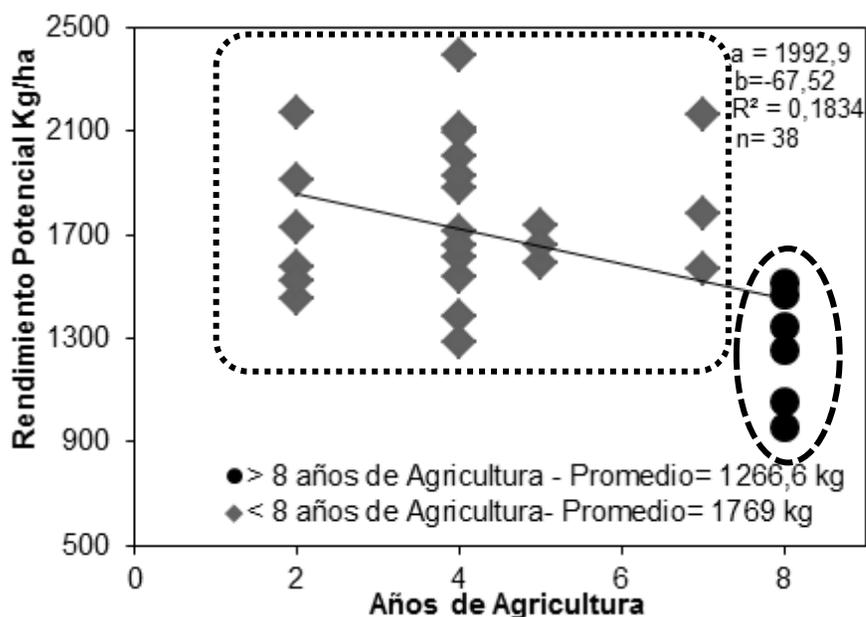


Figura 10: Partición del rendimiento potencial en función de los años de agricultura.

A mayor cantidad de años de agricultura los rendimientos potenciales son menores ( $900 \text{ kg ha}^{-1}$ ), siendo el promedio para estas chacras  $1266 \text{ kg ha}^{-1}$ , esto dado porque conjuga rendimientos máximos y mínimos muy bajos. Por otra parte se puede observar que con menos de 8 años de agricultura el promedio de los rendimientos potenciales aumenta  $500 \text{ kg}$ , situándose en  $1769 \text{ kg ha}^{-1}$ . Esta tendencia reafirma lo comentado por Mazzilli<sup>2</sup>, para una serie de chacras de trigo de productores CREA en Uruguay, en donde sostiene que luego de cuatro años de agricultura continua se pierde el “efecto pastura” y los rendimientos máximos caen. Esta depresión del rendimiento podría estar asociada al “empeoramiento” de las propiedades físicas y químicas del suelo lo que limitaría el desarrollo radicular, capacidad de almacenaje de agua, CIC (menor disponibilidad de K, entre otras bases), etc.

<sup>2</sup> Mazzilli, S. 2011. Com. personal.

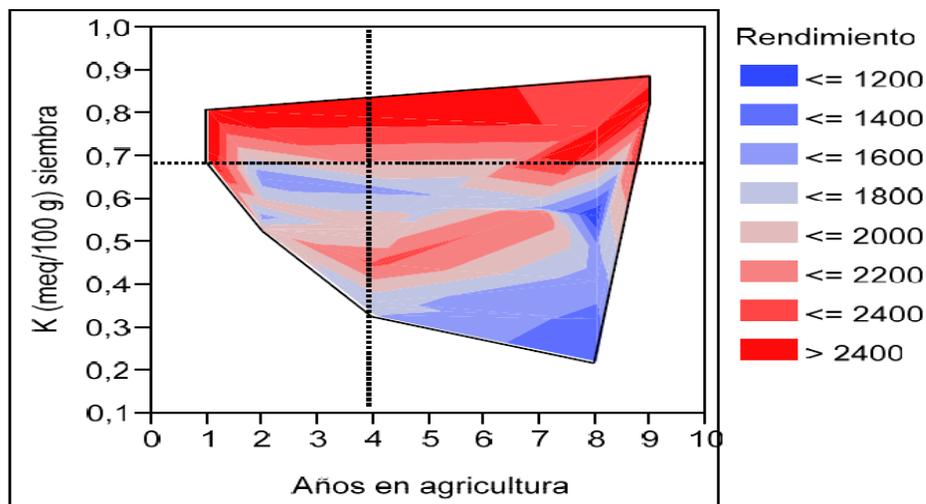


Figura 11: Efecto conjunto del nivel de K a la siembra y “edad de chacra” en el rendimiento potencial. Gráficas de rutina SAS. JMP 8.2, Contour Plot.

Independientemente de los años de agricultura, en la medida que el nivel de K a la siembra se encuentra por encima de 0,69 meq/100g los rendimientos tienden a ser elevados ( $>2000 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Puede observarse una relación entre los años de agricultura y el nivel de K a la siembra. En la medida que los sitios presentan menos años bajo el sistema de agricultura continua baja la frecuencia de sitios con bajos niveles de K. Además puede apreciarse que la edad de chacra tiene un efecto individual sobre los rendimientos potenciales dado que en la medida que aumentan los años bajo agricultura continua caen los rendimientos potenciales. Los mínimos rendimientos potenciales se obtienen con la combinación de bajos niveles de K a la siembra y mayor cantidad de años en agricultura continúa.

A posteriori el SAS. JMP 8.2 destacó como tercer variable en explicar los rendimientos a la fecha de siembra. Se puede observar que en siembras posteriores al 19 de diciembre se obtuvieron rendimientos potenciales mayores ( $2068 \text{ kg ha}^{-1}$ ) en comparación con las sembradas previo a esa fecha de siembra ( $1669 \text{ kg ha}^{-1}$ ).

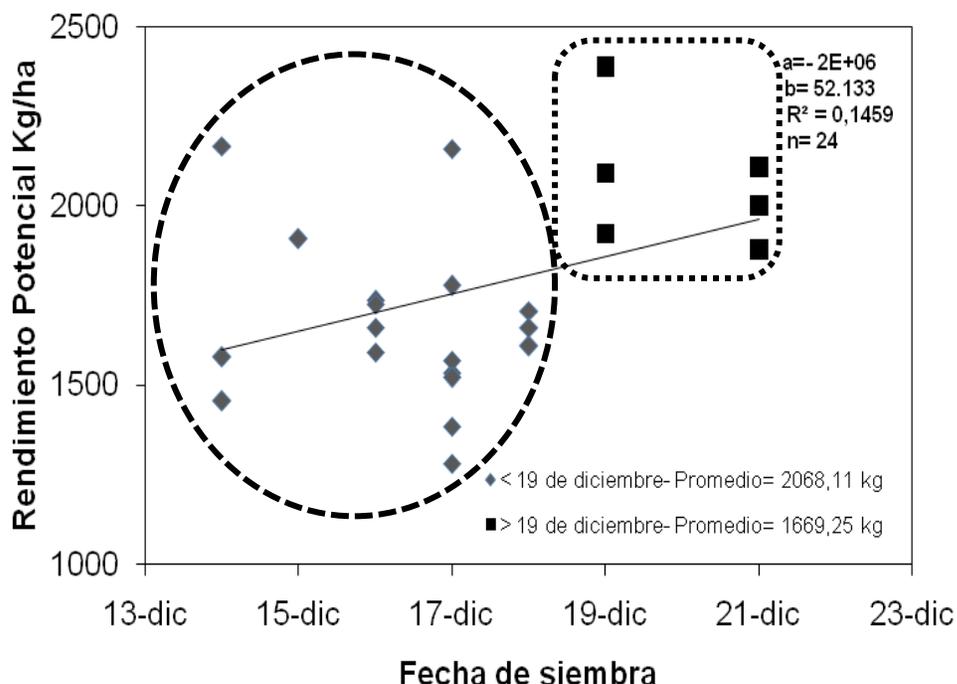


Figura 12: Efecto de la fecha de siembra en el rendimiento potencial.

Para este año en particular, puede verse que en siembras tardías (sobre el final de la estación de siembra) se obtuvieron rendimientos elevados. Este efecto estaría relacionado con las lluvias en las diferentes etapas fenológicas.

Si comparamos el promedio de lluvias para el ciclo del cultivo (siembra-R8), en fechas de siembra previas al 19 de diciembre vs. fechas de siembra posteriores al 19 de diciembre, se puede ver que no existieron diferencias importantes (423 vs. 431 mm, respectivamente) en el período mencionado (Figura 13).

Por otra parte para siembras posteriores al 19 de diciembre, en donde los rendimientos fueron superiores, las lluvias promedio en el período crítico R3-R6 fueron mayores (130 vs. 90 mm). A su vez para ese mismo conjunto de fechas de siembra las lluvias promedio para el período R6-R8 fueron menores (76 vs. 104 mm). Esto reafirma lo explicado en la caracterización climática, en donde se encontró que a mayor cantidad de lluvias en el período R6-R8 los rendimientos tendían a ser menores.

Este mismo análisis se hizo con el rendimiento del testigo, con el objetivo de corroborar si los factores que explican la variabilidad de rendimientos son los mismos que para los rendimientos potenciales.

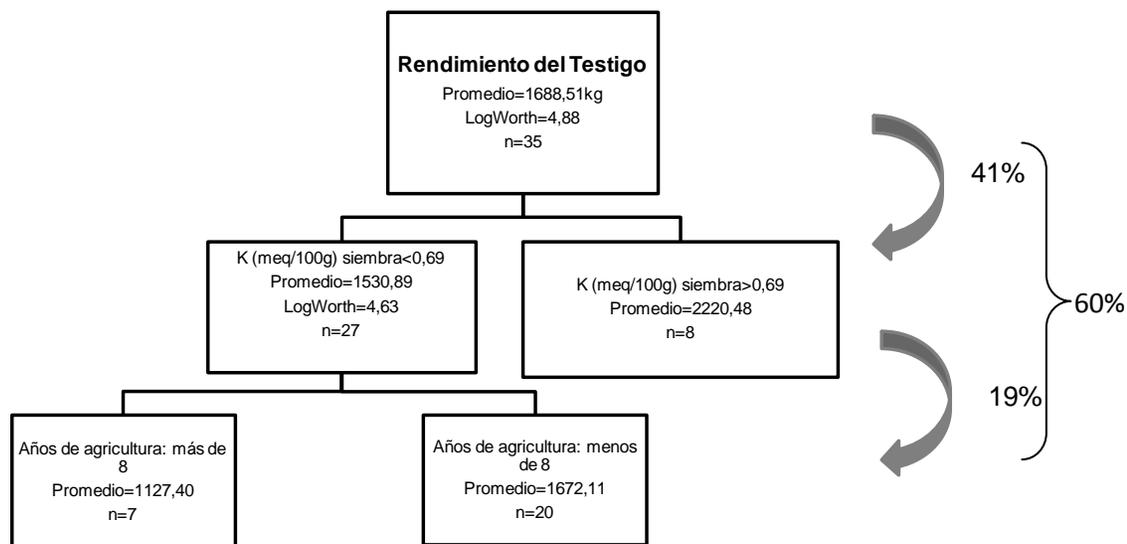


Figura 13: Árbol de partición de los factores que explican los rendimientos del testigo, siendo las flechas y los porcentajes impacto individual de cada factor.

Como se puede observar, los mismos dos factores que en el otro caso explicaban el 67%, acá explican el 60% de la variación de rendimiento observada, es decir que no varió la importancia relativa de ambos factores a pesar de la fertilización.

Se podría deducir que el agregado de P o K, si bien tiene un efecto de respuesta sitio a sitio, que más adelante se discutirá, no levantaría restricciones impuestas tales como años de agricultura y condiciones de suelo separado por el nivel de K a la siembra.

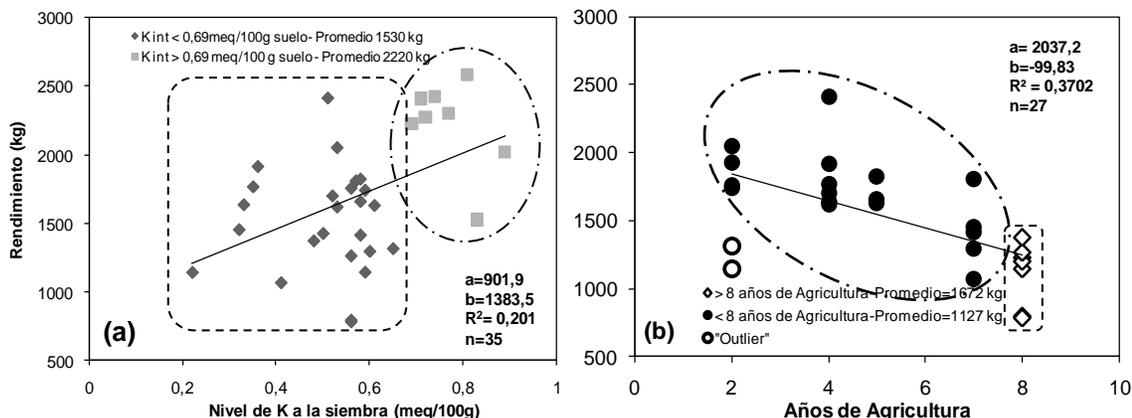


Figura 14: Impacto del nivel de K a la siembra (a) y la edad de chacra (b), en el rendimiento del testigo.

La primera variable que explica los rendimientos del testigo, al igual que el rendimiento potencial, es el nivel de K a la siembra (Figura 14a). A su vez puede observarse que el mismo nivel de K a la siembra que separaba dos grupos contrastantes de rendimiento potencial (0,69 meq/100g), es el que separa dos grupos de rendimiento testigo. Es importante destacar como niveles de K a la siembra por encima de 0,69 meq/100g suelo, sitúan los rendimientos del testigo aproximadamente un 42% por encima de aquellas chacras que poseen menores niveles de K a la siembra.

Por otra parte de aquellas chacras que se encuentran por debajo de 0,69 meq/100g suelo, se generan dos subgrupos teniendo como criterio de clasificación la edad de chacra.

Al graficar el rendimiento del testigo según años de agricultura (Figura 14b), si bien se puede observar amplia variabilidad, se pudo determinar que la tendencia es similar a lo que ocurre con el rendimiento potencial, es decir a medida que aumentan los años de agricultura el rendimiento tiende a disminuir. En aquellos sitios con más de 8 años de agricultura el rendimiento promedio se encuentra en  $1127 \text{ kg ha}^{-1}$ , mientras que en aquellos con menos de 8 años de agricultura es de  $1672 \text{ kg ha}^{-1}$ , habría dos sitios que si bien tienen poca historia de chacra (2 años), el rendimiento del tratamiento testigo es bajo, por lo que fueron considerados como "outliers", pudiendo explicarse este comportamiento por un error en la información proporcionada por el arrendatario del sitio, dado que seguramente presentaban más años bajo agricultura continua.

### 4.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los niveles de rendimiento en grano para cada sitio, en función del P agregado a la siembra, para visualizar los efectos de la fertilización fosfatada en el rendimiento obtenido.

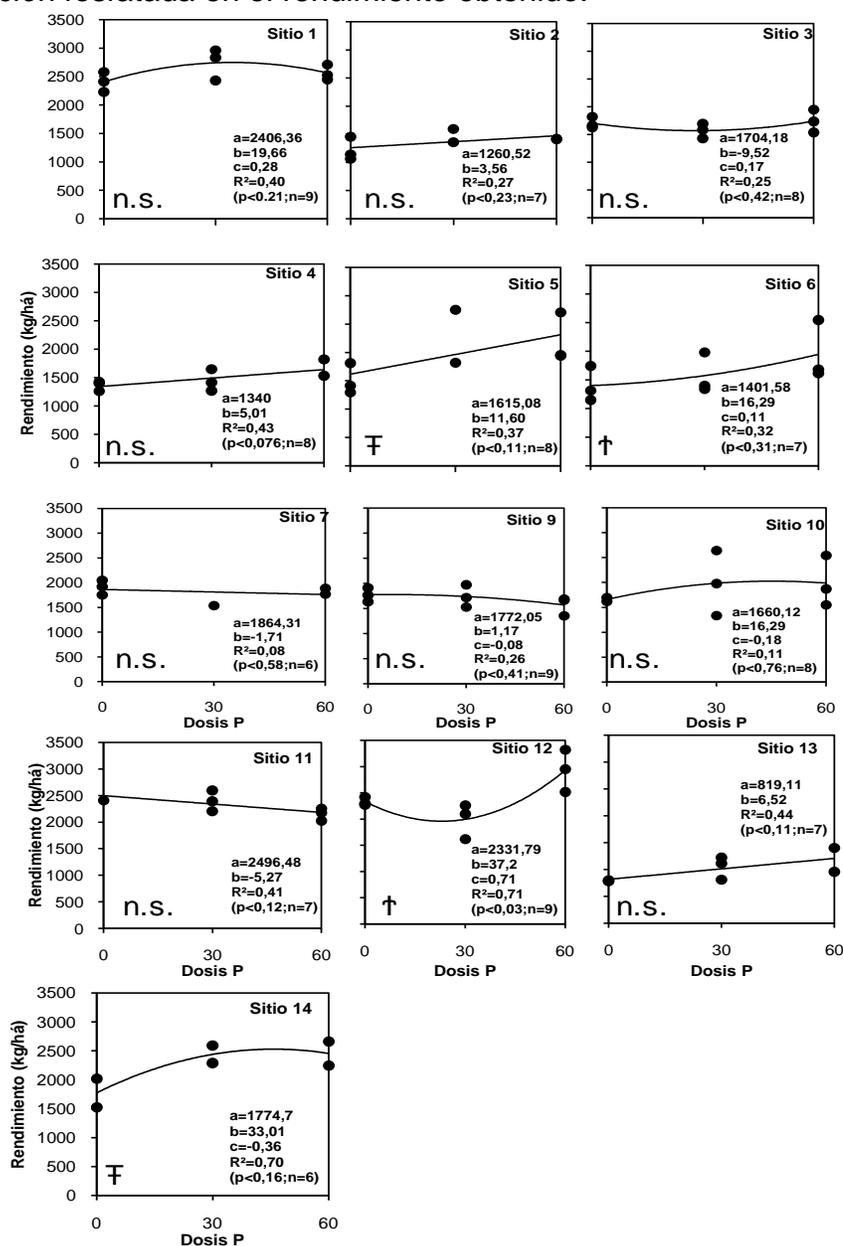


Figura 15: Efecto de la dosis P a la siembra (kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) y rendimiento de soja de segunda. El p valor corresponde al ANAVA regresión (Anexo 9).

El criterio de decisión para decidir si la respuesta es igual entre los diferentes tratamientos, es a través del p valor del ANAVA. Se constató respuesta significativa en cuatro sitios, siendo la significancia de esta diferencia menor del 5% (p-valor < 0,05) para dos sitios (†), 6 y 12, y menor del 10%

Dentro de las respuestas obtenidas, existieron dos tipos:

- Respuesta al agregado de 30 Unidades de  $P_2O_5$ , siendo no significativa las diferencias entre los tratamientos 2 y 3. (Sitio 5 y 14). En estos el incremento de rendimiento por unidad de  $P_2O_5$  agregada fue de 23 kg y 22 kg respectivamente.
- Respuesta al agregado de 60 Unidades de  $P_2O_5$ , siendo no significativo las diferencias entre los tratamientos 1 y 2. (Sitio 6 y 12). En estos el incremento de rendimiento por unidad de  $P_2O_5$  agregada fue de 9 y 16 kg de producto/UP, respectivamente.

En los restantes nueve sitios no se observó ningún tipo de respuesta al agregado de fertilizante (ver Anexo 10). Es importante destacar que de estos sitios sin respuesta, hubo tres que a priori se hubiera esperado que respondieran, si se toma en cuenta los niveles críticos de referencia para soja de primera (10-12 ppm) (Morón, 2003).

Cuadro 4: Sitios que no respondieron al agregado de fertilizante

Sitio	P a la siembra (ppm)	N.C. de referencia para soja 1 <sup>era</sup> (ppm)	Rendimiento promedio (kg/ha)
2	5	10-12	1356
3	8	10-12	1664
4	6	10-12	1402

Probablemente en estos sitios existieron otras limitantes que no son la fertilización, dado que no respondieron al agregado, a pesar de encontrarse por debajo del Nivel Crítico de referencia de soja de 1era. Esto se deduce dado que los rendimientos obtenidos en todos los tratamientos son muy bajos en comparación con los otros sitios. Esto permite concluir a priori que existieron otras limitantes diferentes al P. A su vez en estos sitios no se encontró respuesta al agregado K y S, lo que determina la existencia de otras limitantes para la obtención de altos rendimientos.

Por otra parte en los sitios con respuesta, hubo dos sitios (sitios 6 y 12) en los que no se hubiera esperado, dado que se encontraban con 16 ppm de P a la siembra.

#### 4.4. INDICADORES DE SUELO

Con el objetivo de analizar si el indicador de respuesta al agregado de P reportado para cultivos de primera, permite separar los sitios anteriormente mencionados como diferentes, se relacionó la respuesta al agregado de P a la siembra en términos relativos con el nivel de P a la siembra de 0 a 20 cm de profundidad. Se tomó la profundidad de 0-20 cm, dado que es la que mejor se correlaciona con las necesidades del cultivo. La profundidad de 20-40 cm no mejora la correlación con el crecimiento y la respuesta a la fertilización. Tampoco el muestreo 0-5 cm mejora dicha correlación (Zamuner et al., 2003), y tiene más variabilidad.

Para obtener los rendimientos relativos, como forma de estudiar en conjunto a todos los sitios, independiente de su potencial de rendimiento absoluto, se construyó el cociente entre el rendimiento promedio del testigo sin fertilización para las tres repeticiones y el rendimiento promedio del tratamiento fertilizado para los tres bloques. Para los casos en que hubo diferencias significativas entre los tratamientos, se tomó el rendimiento promedio del tratamiento con significancia sobre el testigo.

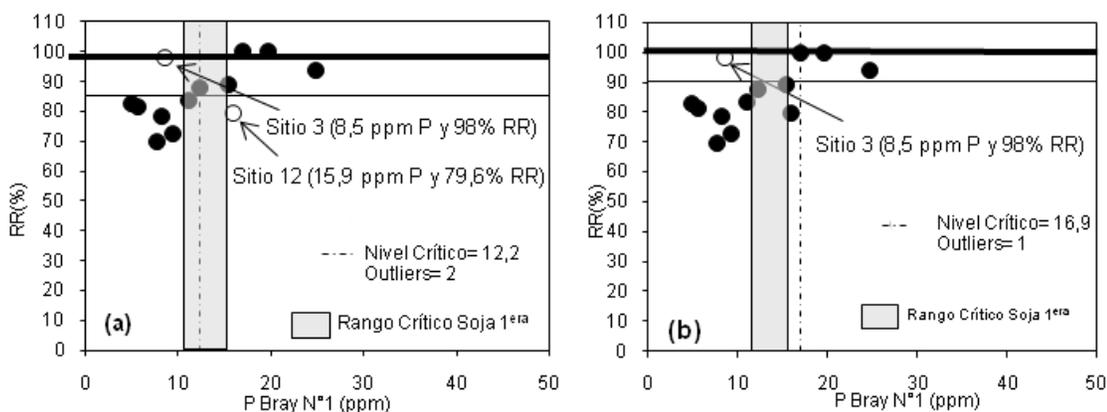


Figura 16: Relación entre rendimiento relativo (RR) y P Bray No. 1 (0-20 cm) a la siembra, para dos niveles de respuesta, Cate y Nelson 90% (a) y 85% (b).

Para el caso de 85% de referencia, el NC fue de 12 ppm P Bray No. 1, por debajo del cual es esperable obtener un incremento de 15% o más en el rendimiento frente al agregado de P. Por otra parte para el caso de 90% de referencia, el NC fue de 16,9 ppm P Bray No. 1, por debajo del cual es esperable obtener un incremento mínimo de 10% en el rendimiento frente al agregado de P.

Por lo tanto es esperable tener entre un mínimo de 10 y 15% de respuesta a la fertilización, cuando los niveles iniciales en suelo se ubican por

debajo de 17 y 12 ppm respectivamente. Sin embargo para el caso del sitio 3, con un 2% de respuesta, a pesar de que el nivel de P en suelo a siembra fue de 8,5 ppm de P Bray No. 1, contrariamente el sitio 12 presentó una respuesta de 21,4% frente al agregado de fertilizante (60 kgP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) cuando el análisis de suelo arrojó el dato de 15,9 ppm de P. Los niveles establecidos anteriormente son iguales o mayores a los niveles establecidos para soja de primera en la bibliografía nacional, que sugiere que se esperaría respuesta vegetal con valores de 10-12 ppm P Bray en suelos pesados, y 14-15 ppm P Bray No. 1 en suelos arenosos (Morón, 2003).

Se analizó la relación entre rendimiento relativo (%RR) y nivel de fósforo a los 30, 60 y 90 días post-fertilización.

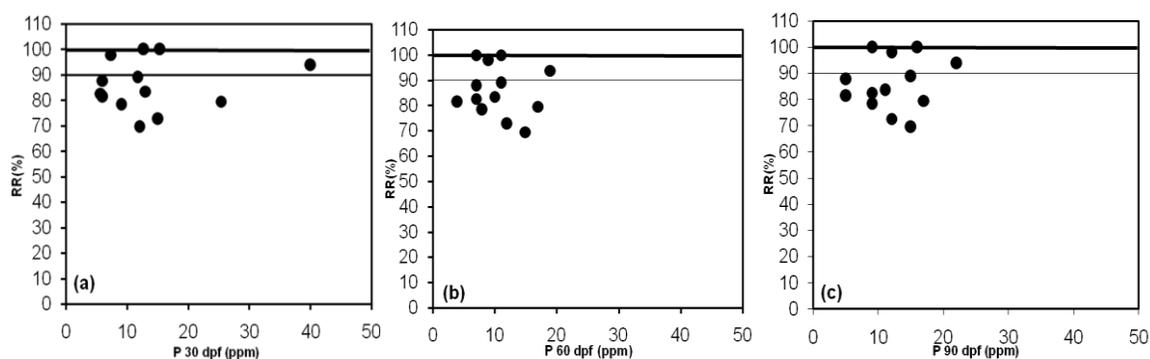


Figura 17: Relación entre RR y P Bray No. 1 del tratamiento 1 (a) 30 dpf, (b) 60dpf y (c) 90 dpf.

Claramente se desprende de la Figura 17 que no se puede establecer un rango crítico de referencia a los 30, 60 y 90 días de que el cultivo fue instalado, ya que la respuesta no se correlacionó con el P en pos-emergencia.

#### 4.5. CANTIDAD DE RASTROJO Y CONCENTRACIÓN DE P EN EL MISMO.

Al momento de la instalación de los ensayos (siembra) se determinó la cantidad de rastrojo, y luego se analizó la concentración de P en la materia seca (% MS) del rastrojo en cada sitio (Cuadro 3). Esto se hizo con el objetivo de evaluar potencialidad del rastrojo como fuente de fósforo para el cultivo.

Cuadro 5: Cantidad y contenido de P en la biomasa de rastrojo por sitio.

Sitio	Antecesor	MS kg/ha	P (%)	kg de P ha <sup>-1</sup>
1	Cebada	6400	0,04	2,56
2	Raigrás	6991	0,07	4,89
3	Raigrás	4426	0,04	1,77
4	Trigo	5548	0,02	1,11
5	Trigo	6900	0,03	2,07
6	Trigo	6689	0,03	2,01
7	Trigo	7546	0,03	2,26
9	Trigo	1939	-*	-
10	Trigo	8481	-*	-
11	Trigo	8481	-*	-
12	Cebada	7256	0,01	0,73
13	Trigo	2474	-*	-
14	Trigo	3135	0,03	0,94

\*el espectrofotómetro del laboratorio no llegó a leer P en el análisis, debido a la baja concentración de P en la MS.

Independientemente del tipo de rastrojo, el rastrojo como potencial fuente de aporte de fósforo fue muy bajo. Esto está en concordancia con lo concluido por Rodríguez (1992), que destaca que el rastrojo como fuente de fósforo es muy bajo dado que este nutriente se concentra en el grano, determinando que la exportación del sistema sea alta. La absorción total de P que presentan los cultivos de trigo y cebada es de 5 y 4 kg de P/ton respectivamente, siendo lo extraído en grano 4 y 3 kg/ton (IPNI, s.f.), considerando un Índice de Cosecha de 0,80 y 0,75 respectivamente.

Como puede verse en el Cuadro 3, existe gran variabilidad en las cantidades de rastrojo estimadas (CV=40,4%) al igual que con los contenidos de P que presentan (CV=71,5%).

Considerando el CV del % de P, para los residuos de trigo y cebada, este coeficiente se incrementa a 97% y 84,9% respectivamente, mientras que el contenido de raigrás fue más estable entre sus estimaciones (CV=38,6%).

Posiblemente esto sea explicado por la partición que presenta el nutriente una vez comenzada la senescencia de la planta a partir de madurez fisiológica. La mayor concentración de P en la planta se encuentra en las hojas, siendo menor su concentración en las hojas basales (Lanyon et al., 1988).

A su vez un cultivo que rinde más absorbe mayor cantidad de fósforo que uno que rinde menos. Fixen (s.f) destaca que en un cultivo de trigo con un rendimiento de 2700 kg/há absorbe 30 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/há siendo la remoción de 22 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/há, mientras que un rendimiento de 5400 kg/há duplica la absorción y remoción de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/há.

Cuadro 6: Comparación del contenido de fósforo (%) de los diferentes rastrojos del cultivo antecesor a través del método de comparación de medias LSD Fisher Alfa=0,05 con un DMS=0,029.

Cultivo	Medias	n	E.E.	
Raigrás	0.06	2	0.01	A
Cebada	0.03	2	0.01	Ab
Trigo	0.02	9	0.01	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ )

Analizando la comparación de las medias del contenido de P en el rastrojo extraído, se ve que el raigrás es que el presenta significativamente una mayor concentración respecto al trigo, mientras que no mantiene significancia en las diferencias con el rastrojo de cebada.

Cuadro 7: Comparación del volumen de rastrojo (kg MS/ha) de los diferentes rastrojos del cultivo antecesor a través del método de comparación de medias LSD Fisher Alfa=0,05 con un LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=4107,39.

Cultivo	Medias	n	E.E.	
Cebada	6828	2	1674,86	A
Raigrás	5708	2	1674,86	A
Trigo	5688	9	789,54	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ )

De esta manera analizando ambas comparaciones de las medias se puede decir con un 95% de confianza que el raigrás presenta la mayor capacidad de aportar P al suelo por parte de sus rastrojos. Tal afirmación es posible de hacer ya que no se encontró significancia entre las medias de cantidad de rastrojo para los 3 tipos.

#### 4.6. DINÁMICA DE P EN PLANTA

En el siguiente conjunto de gráficos se muestra el contenido de P foliar expresado como porcentaje de tejido seco en función de los diferentes tratamientos (1, 3, 4 y 5). De los trece sitios en estudio, tan solo se pudo evaluar los niveles de P en hoja en ocho de estos (1, 6, 9, 10, 11, 12, 13 y 14).

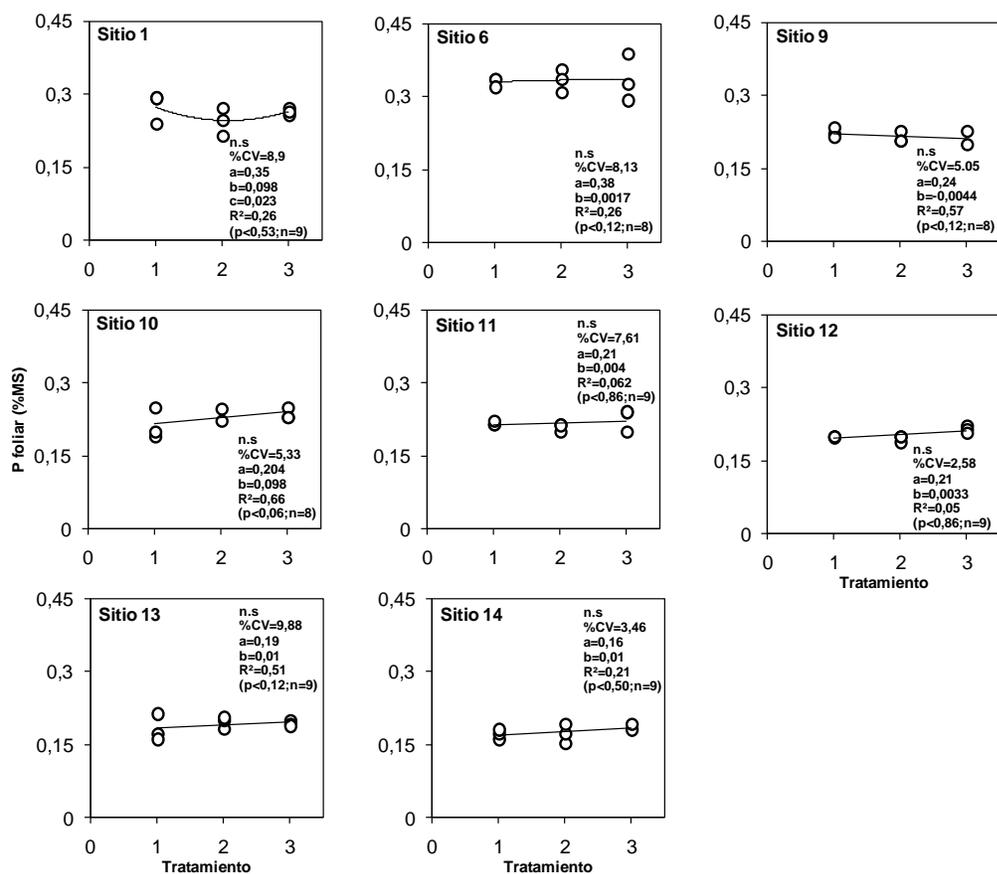


Figura 18: Niveles de P en hoja según tratamientos. Tratamiento 1: 0, tratamiento 2: 30P, tratamiento 3: 60P. CV%: Coeficiente de variación, n: número total de valores utilizados y n.s.: valores sin diferencia estadísticamente significativa ( $p=0,05$ ).

El contenido de P (%) en hoja varía dependiendo del sitio ( $p$ -valor $<0,0001$ ), sin que el agregado de P cambiara en forma significativa ésta condición. A su vez el contenido de P en planta fue independiente del agregado de P no encontrándose diferencias significativas en ningún sitio para tres tratamientos de fertilización diferentes.

Finalmente se podría concluir que en este estudio el porcentaje de P en planta-hoja no fue un buen indicador, dado que la variación no estuvo relacionada con el agregado de fertilizante, el nivel de P en suelo, ni con la respuesta.

Por su parte se realizó la relación entre P en suelo y el % de P foliar, la cual se presenta a continuación (Figura 19).

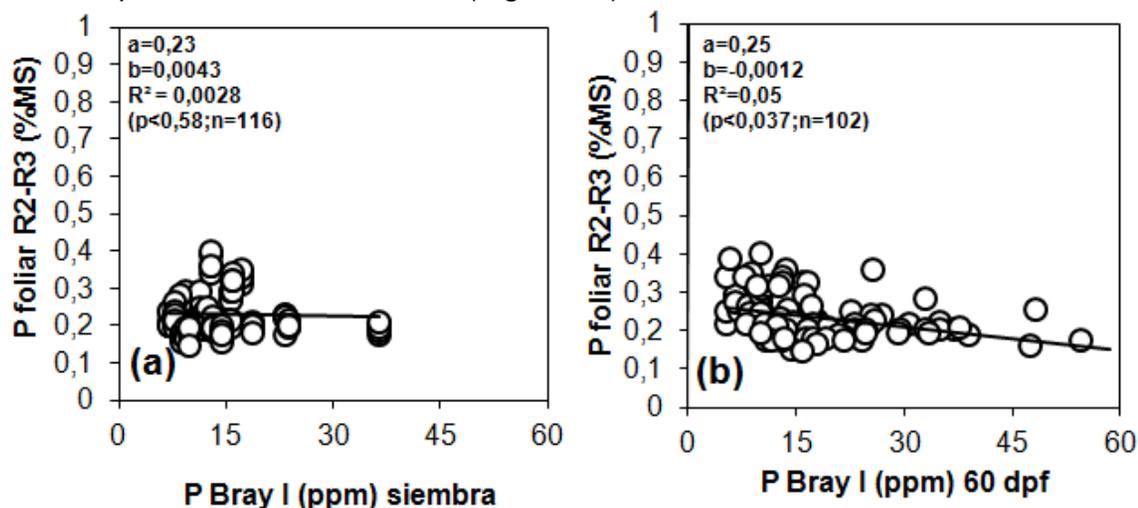


Figura 19: Concentración de P foliar en R2-R3 según contenido de P en suelo (a) al momento de la siembra y (b) 60 días post fertilización dpf.

La Figura 19 demuestra claramente que no existe una relación entre el contenido de P en planta (%) y el contenido de P en el suelo (ppm) para ninguno de los dos momentos en estudio (siembra y 60 dpf).

Esto concuerda con lo mencionado por otros autores (Hanway y Weber, s.f.), quienes consideran que estos indicadores son de escasa importancia ya que el cultivo absorbe la mayor cantidad de P en etapas tempranas de su crecimiento, por lo que el indicador de referencia es la disponibilidad de fósforo en el suelo antes de la siembra.

Trabajos de Hanway et al. (s.f.) realizados en Iowa, Estados Unidos, citan que el 79 % del P total se absorbió en los primeros 46 días después de la emergencia del cultivo.

#### 4.7. VARIACIONES DE P EN SUELO POSTERIOR A LA SIEMBRA.

A continuación se tratará de describir y analizar como el comportamiento del P en suelo para un período de 90 días posteriores a la

siembra. Este tipo de información en general es escasa en soja, y más aun cultivos de segunda

Esta información permitiría analizar la validez de cálculo del equivalente fertilizante, en términos de cantidad de  $P_2O_5$  necesaria para elevar 1 ppm de P en suelo o en términos de respuesta al P, por cada 1 ppm por debajo del nivel crítico.

Los datos de precipitación acumulada para 30, 60, 90 días así como el total para el periodo siembra- 90 días intentan sumar información que permita interpretar mejor lo ocurrido con la variación del nutriente en suelo observada, dado que según Ferrando et al. (2002), la dinámica del P en el suelo varía con los cambios en la humedad del suelo.

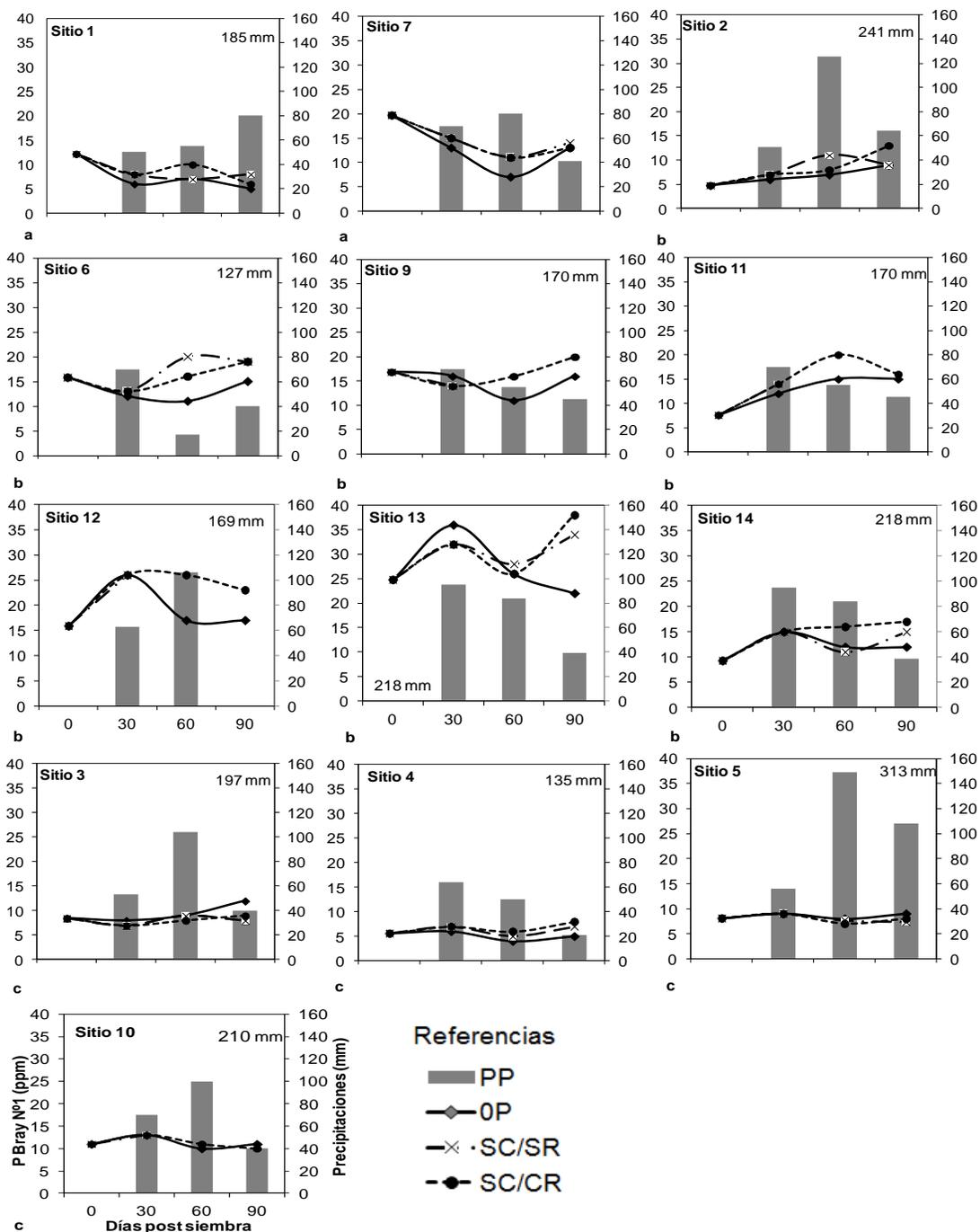


Figura 20: Dinámica del fósforo en el suelo posterior a la siembra para 30, 60 y 90 días, tres tratamientos (cultivo sin fertilizar, sin cultivo/ sin rastrojo, sin cultivo/ con rastrojo), las barras muestran las precipitaciones acumuladas cada 30 días y precipitaciones totales para el período. Las figuras se presentan

agrupados por tendencias a 90 días con respecto a la siembra (bajan los niveles de fósforo (a), suben (b), se mantienen (c). Para los mismos solo se encontró significancia en los sitios 1,2 y 7 (Anexo 11).

Los sitios 1 y 7, muestran una disminución de los niveles de fósforo a 90 días de 6 y 7 ppm respectivamente (promedio para los dos tratamientos) con respecto a la siembra. El tratamiento con cultivo en ambos casos registra los menores niveles de P en el suelo en comparación con los tratamientos sin cultivo/ sin rastrojo y sin cultivo/ con rastrojo, si bien las diferencias no son marcadas entre los mismos.

Según Ferrando et al. (2001) dentro del cultivo de soja, el fósforo alcanza tasas elevadas de acumulación en planta a partir de los 35-40 días después de la emergencia. Sin embargo para el sitio 1 luego de los 30 días la extracción del cultivo es repuesta por el suelo ya que los niveles tienden a mantenerse, no ocurriendo lo mismo para el sitio 7 ya que los mismos siguen disminuyendo bruscamente. Esto podría influir en el rendimiento final ya que en el sitio 1 el testigo rinde 2400 kg/ha y en el sitio 7 rinde 1900 kg/ha. Si bien esta tendencia podría explicar en parte lo ocurrido con el rendimiento para estos dos sitios en particular, no se podría afirmar que existe una relación entre el rendimiento y la evolución de fósforo ya que el cultivo puede extraer mucho en un determinado momento y no llegar a traducirlo en rendimiento. Esto se debe a que el rendimiento final va a estar determinado por una acumulación de factores.

A su vez Ferrando et al. (2001) mencionan que si la disponibilidad de P es alta a la siembra el cultivo absorbe P rápidamente, esto genera una disminución brusca del nutriente ya que la tasa de extracción del mismo supera ampliamente la tasa de aporte del suelo. En este sentido se debe considerar que las cantidades de P absorbidas pueden variar sensiblemente con el P en suelo y factores asociados al crecimiento vegetal.

Hernández (2010) concluye que la cantidad de P absorbido por una planta por unidad de tiempo es función de su volumen de raíces, la tasa de absorción por unidad de raíz, y la concentración de P en la solución del suelo donde se encuentra la raíz.

Además el sitio 1 tiene mayor contenido de materia orgánica que el sitio 7 (5,6 vs 4,6), además de proveer P vía mineralización del P orgánico, podría proveer sitios de baja energía de adsorción contribuyendo a incrementar la fracción lábil. Además el pH es levemente superior (6 vs 5,3 para los suelos 1 y 7, respectivamente), según Sharpley (2000), se considera que la disponibilidad de P es óptima a pH de 6-7. Estos factores podrían explicar en

parte las diferencias encontradas ya que ambos sitios tienen similares características en cuanto a tipo de suelo y años de agricultura.

Según lo mencionado por Sanyal et al. (1991) los diferentes tipos de suelo serían un factor importante en explicar la dinámica del nutriente ya que los suelos de texturas más finas tienen mayor capacidad de reposición de P que los suelos de texturas más gruesas. Sin embargo, la retención de P por adsorción se relaciona positivamente con la presencia de partículas finas de arcilla, los suelos más pesados requieren una mayor cantidad de P para incrementar el nivel de P extractable.

Según Sanyal et al. (1991), las características de retención de P dependen del tipo de arcilla. Las arcillas de tipo 1:1 como la caolinita presentan una mayor capacidad de retención que las arcillas tipo 2:1. La presencia de óxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al) y formas de Ca también incrementan la capacidad de retención de P de los suelos.

Al analizar lo que ocurre con el P, para las Figuras 1 y 7, en el tratamiento sin cultivo/ sin rastrojo, se observa una disminución a medida que transcurre el tiempo aunque esta tendencia no ocurre para todos los sitios. Esto podría deberse a la presencia de raíces del cultivo de invierno incrementa la actividad biológica del suelo y puede resultar en la inmovilización del P disponible (Ciampitti, 2009). Para ambas situaciones se observa un leve incremento de fósforo a los 60 días debido a que la mineralización incrementa los niveles de P en la solución del suelo.

Por otra parte es importante remarcar que el P producido a través de la mineralización puede ser removido de la solución, ya sea por adsorción a arcillas y otras superficies de minerales, o precipitar bajo forma de minerales secundarios con Fe, Al o Ca (Hernández, 2010). Esto bajaría la cantidad de fósforo y podría explicar porqué en el sitio 1 caen los niveles del nutriente a 60 días, luego de que se incrementaran a 30 días para el tratamiento sin cultivo/con rastrojo.

El sitio 2 muestra un incremento de los niveles de P a medida que transcurre el tiempo con respecto a la siembra para el testigo sin fosforo. El rendimiento del mismo es de 1200 kg/ha por lo que es de suponer que la tasa de extracción es inferior a la tasa de reposición del suelo. El cultivo creció menos probablemente por otros factores como edad de chacra (8 años), cultivos previos (7), pH (5,6), materia orgánica (3,7 %) lo que determinaría un bajo uso del nutriente.

Si se analizan los sitios en los cuales los niveles de P se mantienen constantes (3, 4, 5 y 10), se puede ver que los mismos parten con niveles bajos de P a siembra y terminan con niveles de P bajos a 90 días. Para ese lapso de tiempo no manifiestan grandes fluctuaciones. Los sitios 4 y 5 tienen 7 y 8 años de agricultura, esto sumado a otros factores determina que los rendimientos del testigo no superen los 1500 kg. El efecto principal que explicaría esta tendencia podría ser el suelo ya que por diversos factores como compactación, carbono orgánico (5-5, 6% para los suelos 4 y 5, respectivamente), generan que el aporte de P a la solución del suelo sea bajo.

Al comparar lo que ocurre con el tratamiento sin cultivo/con rastrojo y el sin cultivo/ sin rastrojo, se observa que el aporte de P del rastrojo no fue significativo. Estos tratamientos para la mayoría de los sitios (1, 2, 4, 5, 6, 9,11, 12,13 y 14 llegan a los 90 días con mayores niveles de fósforo (en torno a 12-14 ppm). Esto sería directamente la consecuencia de la ausencia de extracción.

A continuación se muestra la evolución de fósforo en suelo posterior a la siembra en función del fosforo agregado a la siembra.

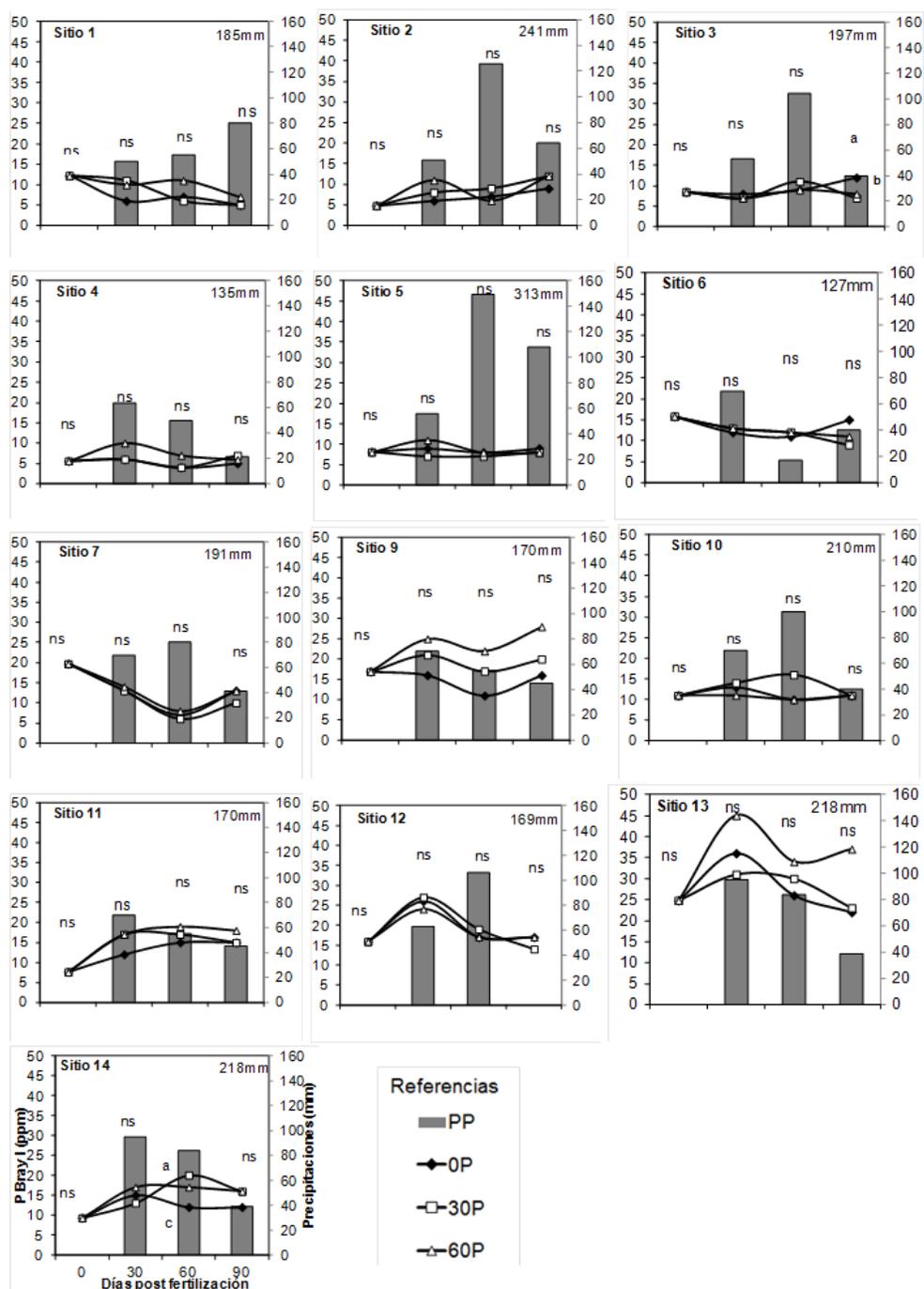


Figura 21: Dinámica del fósforo en el suelo posterior a la siembra para 30, 60 y 90 días, tres tratamientos (0 P, 30 P, 60P), las barras muestran las precipitaciones acumuladas cada 30 días y precipitaciones totales para el período.

Para la mayoría de las figuras podemos observar que no hay diferencias significativas (ns), en los niveles de P en suelo, entre tratamientos para un mismo día post fertilización, encontrándose diferencias significativas solamente en dos sitios (3 y 14). Sitio 3 el tratamiento 0 P (a) es significativo en comparación con los demás tratamientos (b) para 90 días post fertilización (5 y 4 ppm más que el tratamiento 30 y 60 unidades de P, respectivamente). Si comparamos los rendimientos de cada tratamiento vemos que son similares (0P: 1704 kg/ha, 30P: 1570 kg/há y 60P: 1740 kg/há), esto podría deberse a que los tratamientos que recibieron fertilización crecieron más en un determinado momento por lo que absorbieron mayor cantidad de P pero no llegaron a traducirlo en mayores rendimientos y por ende terminaron con menores niveles de P a 90 días con respecto al tratamiento sin P.

Por el contrario en el sitio 14 el tratamiento 30 P es significativo en comparación con 0 P para 60 días post fertilización (8 ppm mas con respecto al 0 P). Los mayores niveles de P podrían deberse a que no se encontraron diferencias significativas en rendimiento entre los tratamientos por lo que se incremento el nivel de P en suelo en el tratamiento que recibió fertilización.

Si a las gráficas de evolución de P las relacionamos con las precipitaciones acumuladas a los 30, 60 y 90 días podemos observar una leve tendencia donde en los períodos de mayor precipitación los niveles de fósforo en suelo son menores o tienden a disminuir, sucediendo lo contrario en los períodos de menores precipitaciones. Esto podría explicarse por un mayor crecimiento vegetal, no necesariamente mayor rendimiento, y por ende mayor absorción de P.

A continuación se puede sintetizar la dinámica de P en el suelo, a través de las figuras, que relacionan el P en suelo a la siembra con la variación a los 90 días post-siembra (Figura 20a) y la variación existente entre P a la siembra y 90 días vs la diferencia que existe en el período 90 días entre los tratamientos 0P y 60P (Figura 20b).

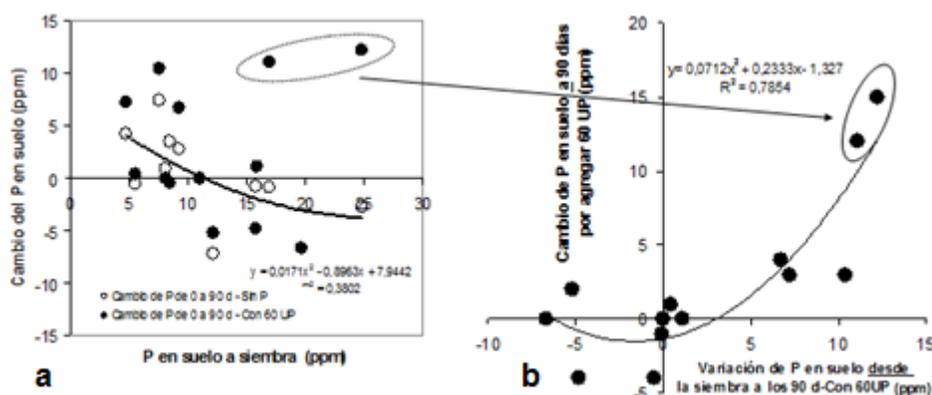


Figura 22: Cambios de P en suelo desde 0-90 dpf para el tratamiento 0 y 60 P agregado (a) y relación entre la evolución del P durante el período 0-90 días para el tratamiento 60P (eje X) con la diferencia de P a los 90 días pos-emergencia entre el tratamiento 0 y 60 P (eje Y), (b).

Como se observa en la figura 20a cuanto más P inicial a la siembra, mayor la caída absoluta de P a los 90 días de ciclo, independientemente del agregado de P a la siembra. Esto coincide claramente con lo citado por Ferrando et al. (2001), el mismo menciona que si la disponibilidad de P es alta a la siembra el cultivo absorbe P rápidamente, esto genera una disminución brusca del nutriente ya que la tasa de extracción del mismo supera ampliamente la tasa de aporte del suelo. De lo contrario cuando se parte de poco P a la siembra sería de esperar que permanezca igual o aumente. Cabe destacar que existen dos sitios que presentan un comportamiento diferente (S 9 y S 13), dado que presentan a la siembra altos niveles de P e igualmente aumentan los niveles a los 90 días. Esto último podría deberse a la condición de sequía extrema que atravesaron los cultivos que atentó contra el rendimiento (1700 y 1080 kg respectivamente), pudiendo incidir en la dinámica de nutriente.

Por otra parte en la figura 20 b se observa que existen 3 comportamientos posibles en cuanto a la variación del P disponible para el período 0-90 días para el tratamiento 60P, es decir que el P en el suelo aumenta, disminuya o de lo contrario se mantenga igual. Esto último permite a priori destacar que el equivalente fertilizante no sería fijo (levantar una ppm con 10 kg  $P_2O_5$ ), dado que por ejemplo en aquellos casos que no varió el P en el suelo entre el período 0 y 90 días con el agregado de 60P se hubiera esperado que incrementen 6 ppm si se tomara como referencia el equivalente fertilizante antes mencionado (10 kg  $P_2O_5$ / 1 ppm). Esto permitiría deducir que el equivalente fertilizante no es un valor fijo, es decir oscila dependiendo de los tipos de suelo, entre otros, coincidiendo con la bibliografía: Castro et al. (1976), Hernández (1998).

A continuación se muestra el valor estimado de P-Bray I en suelo a 90 días en base al valor original a siembra y el incremento teórico por agregado de 30 y 60 unidades de  $P_2O_5$  y valor real de P-Bray I en suelo a 90 días (figura a), y la separación de los sitios con respuesta significativa de aquellos que no mostraron respuesta en rendimiento al agregado de P (figura b). Para la confección de dichas graficas se tomaron en cuenta 2 niveles de fertilización (30 y 60 unidades de  $P_2O_5$ ) por sitio, dando un total de 26 valores.

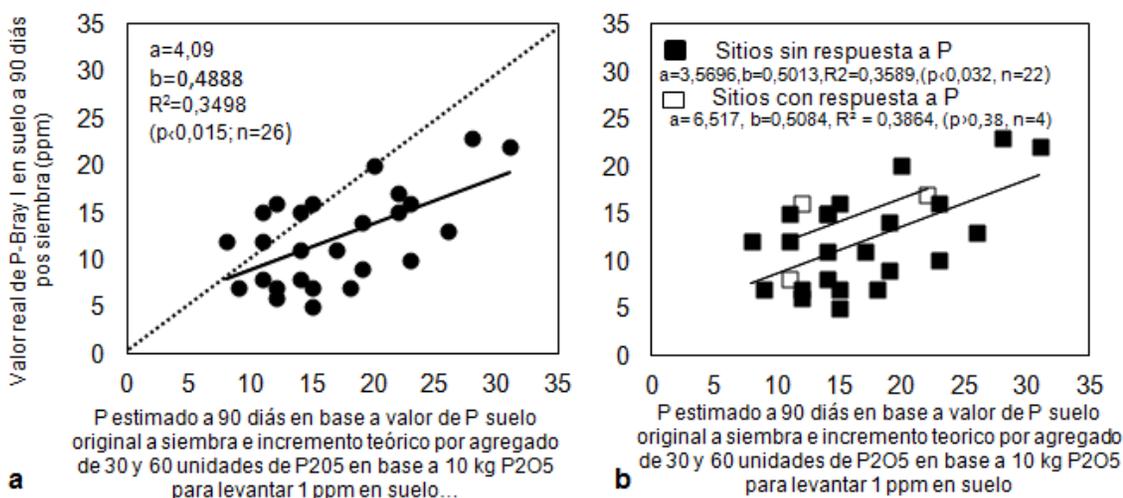


Figura 23: Valor estimado de P-Bray I en suelo a 90 días en base al valor original a siembra e incremento teórico por agregado de 30 y 60 unidades de  $P_2O_5$  y valor real de P-Bray I en suelo a 90 días pos-emergencia (Figura a), y sitios con respuesta significativa a la fertilización en chacras sembradas con soja de segunda (Figura b, cabe aclarar que un punto que no presentó respuesta quedo superpuesto a uno que si presentó).

En la figura 23(a) se puede observar que el valor de  $R^2$  es bajo (0,35), por lo que el agregado de 30 y 60 unidades de  $P_2O_5$  a la siembra no determinó que los niveles de P a 90 días incrementaran de forma proporcional a lo esperado. Es decir para la mayoría de ellos el P disminuyó o se mantuvo igual, esto determinaría que el agregar 10 unidades de  $P_2O_5$  no incrementó 1 ppm de P en suelo. En este caso en el coeficiente de correlación es bajo, sumado a que el p valor es mayor a 0,05, indicando que el modelo es no significativo. Por ende se puede observar una amplia variabilidad en el equivalente fertilizante, confirmando lo antes concluido en la figura 22b.

La línea teórica de tendencia ( $b=1$ ) estaría indicando un equivalente de fertilizante 10 kg  $P_2O_5$  / 1ppm, la cual asume según Hernández (1998), que el promedio de  $P_2O_5$  para elevar 1 ppm de P en el suelo son 10 kg. Todos los puntos que se encuentren por debajo de esta línea indican que el equivalente

de fertilizante para ese caso es mayor a 10 kg de  $P_2O_5$ , mientras que los que se encuentran por encima de esta indican un equivalente menor.

En la figura b se presentan individualizados los sitios que mostraron respuesta significativa al agregado de,  $P_2O_5$  sitios 5 y 14 respondieron al agregado de 30 unidades y sitios 6 y 12 respondieron al agregado de 60 unidades de  $P_2O_5$ .

En conclusión, en este caso en que el  $b < 1$  se puede concluir que el equivalente fertilizante promedio sería  $> 10$  kg  $P_2O_5$ . A su vez se pudo observar que este es variable, y depende entre otras cosas del suelo y del nivel de P a la siembra.

## 5. CONCLUSIONES

1. Considerando las particularidades del año en donde las precipitaciones estuvieron por debajo de la media histórica nacional, es importante destacar que la variabilidad de rendimientos potenciales estuvo explicada en primer orden por el nivel de potasio intercambiable a la siembra (0,69 meq/100g de suelo y  $R^2=0,42$ ). Los niveles de K int a la siembra seguramente sean coincidentes con otras propiedades de los suelos que en este trabajo no fueron evaluadas, tales como propiedad física del suelo, contenido de materia orgánica y años de agricultura.
2. En segundo lugar aparece la historia de chacra, siendo el efecto conjunto de esta y el nivel de K int. en el suelo de 67% ( $R^2$  de K int. a la siembra =  $0,42 + R^2$  de edad de chacra=0,25). En la medida que aumentan los años bajo agricultura continua caen los rendimientos potenciales. A su vez pudo constatarse una relación entre los años de agricultura y el nivel de K a la siembra. En la medida que los sitios presentan menos años bajo el sistema de agricultura continua baja la frecuencia de sitios con bajos niveles de potasio, siendo este un indicador de calidad de suelo dado que esta correlacionado con las propiedades físicas del suelo.
3. La variabilidad de rendimientos estuvo explicada mayoritariamente por los mismos factores: nivel de potasio a la siembra y edad de chacra, por ende se puede concluir que la fertilización tiene un efecto de respuesta diferencial sitio a sitio, pero no levanta restricciones impuestas tales como años de agricultura, etc.
4. En la mayoría de los sitios no se obtuvo respuesta significativa, es decir que no hubo diferencia entre el agregado de 0UN vs. 30UN y 60UN. En los sitios que no hubo respuesta existen 2 situaciones diferentes: altos niveles de P a la siembra o limitantes de otra índole, dado que los rendimientos fueron demasiado bajos. Si bien la disponibilidad de fósforo (P) es el primer factor nutricional en limitar el potencial de producción de pasturas y cultivos, este no soluciona todos los problemas, y no sería todo lo necesario para obtener altos rendimientos.
5. Por otra parte se pudo establecer un nivel crítico de P a la siembra, siendo esperable encontrar un 10 y 15% de respuesta a la fertilización, cuando los niveles iniciales en suelo se ubican entre 17 y 12 ppm respectivamente.
6. Al tratarse de una soja de segunda, se buscó el efecto del rastrojo en el aporte de P, constatándose que independientemente del tipo de rastrojo, el aporte nutricional en fósforo es muy bajo (2-4 kg de P/ha).

7. No se encontró correlación entre el P a 30, 60 y 90 días y el rendimiento relativo.
8. El porcentaje de P en planta no es un buen indicador, dado que éste puede variar pero no relacionado con agregado de fertilizante, nivel de P en suelo, ni con la respuesta, por ende las correcciones deben realizarse en base a los niveles de P en el suelo.
9. La dinámica del P en suelo es muy variable ya que existieron sitios donde aumentó, disminuyó o permaneció igual. Esto se debió principalmente a las características físico-químicas propias de cada sitio (pH, carbono orgánico, compactación, textura, tipo de suelo, etc). Dichas variaciones también se pudieron explicar por la inmovilización del rastrojo del cultivo inmediato anterior, así como también por la demanda del cultivo en pleno crecimiento.
10. El agregado en base a 10 kg de  $P_2O_5$  al suelo para elevar 1 ppm de P-Bray I no incrementó los niveles de forma proporcional. Esto se debe a que el cultivo se encuentra creciendo y por lo tanto demanda P de la solución del suelo. Además existirían diferentes mecanismos de retención de P que lo dejarían no disponible para el cultivo en el mediano y corto plazo.

## 6. RESUMEN

Históricamente en Uruguay los cultivos de segunda han recibido muy poca atención en relación a las necesidades de ajustar la fertilización. Para los mismos se espera que sea aprovechada la residualidad de fertilizaciones previas realizadas al cultivo de invierno anterior. Como consecuencia ha surgido la posibilidad de manejar la fertilización fosfatada de la rotación trigo/soja como un solo cultivo, ya que implica ventajas importantes desde el punto de vista operativo. Sin embargo, dado la escasa información y la incertidumbre existente a nivel nacional sobre la respuesta a la fertilización fosfatada en el cultivo de soja de segunda, sumado a la importancia creciente de este cultivo que se siembra bajo esta forma, surge la necesidad de ajustar los niveles de fertilización y generar las bases de dinámica de este nutriente en suelo y rastrojo, que permitan mejorar la estrategia de uso de los fertilizantes. Durante la campaña 2010/2011 se realizaron 14 ensayos en sitios ubicados en el litoral agrícola, los cuales presentaban bajos niveles de fósforo al momento de la siembra de la soja de segunda. En ese período las lluvias estuvieron por debajo de la media histórica, resultando en una baja correlación entre el rendimiento del cultivo y las lluvias totales; El 82% de los rendimientos potenciales fueron explicados por tres factores. Sólo en 4 de los 14 sitios en estudio se encontró respuesta al agregado de P. De los sitios que no tuvieron respuesta, hubo tres que a priori se hubiera esperado que respondieran, dado que presentaban valores de P disponible por debajo de los niveles críticos de soja de primera (10-12 ppm). En éstos existieron otras limitantes no atribuidas a la fertilización, dado que los rendimientos obtenidos en todos los tratamientos fueron muy bajos en comparación con los otros sitios. En lo que respecta a los indicadores de referencia para la fertilización fosfatada, se confirmó como un buen indicador el análisis de P en el suelo. El % de P en la hoja, en cambio, no se relacionó con el agregado de fertilizante, nivel de P en suelo, ni con la respuesta del cultivo. El aporte de P del rastrojo fue muy bajo, por lo cual, a pesar de tratarse de un cultivo de segunda, el rastrojo no jugaría un papel importante en la dinámica del P en el suelo.

Palabras clave: P en suelo; P en planta; Fertilización en soja de segunda; Respuesta vegetal a la fertilización; Historia de chacra.

## 7. SUMMARY

Historically in Uruguay summer crops following a winter crop for grain, have received little attention in relation to the needs adjusting fertilization. For the same is expected to be utilized for fertilizing the residuality of previous winter cultivation. As a result it has become possible to manage P fertilization on the rotation wheat/soybean as a single crop as it involves important advantages from the operational point of view. However, given the lack of information and uncertainty about the national response to P fertilization in soybean following a winter crop, coupled with the increasing importance of this crop is planted in this form, there is a necessity to adjust the levels of fertilization and generate the bases for studies of the dynamic of this nutrient in soil and crop residues, to improve the strategy of fertilizer use. During the season 2010/2011 field trials were conducted in 14 sites located in the coastal setting, which had low levels of phosphorus at planting the soybean following a winter crop. The total rainfall, were below the historical average, and the correlation between crop yield and total rainfall was low. The 82% of the potential variability in yield was explained by three factors. Only in 4 of the 14 study sites there were response to P application. Of the sites with no response, a priori would be expected to respond in three of them, given the low available P (below the critical levels of soybean as a first crop (10-12 ppm). On these sites there were another non-limiting fertilization factors, since yields obtained in all treatments were very low compared to other sites. In regard to indicators for fertilization, it was confirmed as a goof indicator the soil P The% P in leaf, on the other hand, was not related to the addition of P fertilizer, soil P level, or crop response. The P input from the crop residues was very low, therefore despite being a second crop, residues may play no important role in the dynamics of P in soil.

Keywords: P in soil; P in plant; Fertilization in soybean following a winter crop; Plant response to fertilization; History farm.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. ALBERCHT, R.; VIVAS, H.; FONTANETTO, H. 2000. Resultados preliminares de la fertilización compuesta de trigo sobre diferentes cultivos antecesores. In: INTA. Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información técnica de trigo; campaña 1999-2000. s.p. (Publicación Miscelánea no. 92). Consultado sept. 2011. Disponible en [http://rafaela.inta.gov.ar/publicaciones/misc\\_92\\_6.htm](http://rafaela.inta.gov.ar/publicaciones/misc_92_6.htm)
2. ANDRADE, F.; SADRAS, V. 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. In: Andrade, F.; Sadras, V. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Balcarce, INTA/Facultad de Ciencias Agrarias UNMP. pp. 89-193.
3. AMÉNDOLA, L. 1976. Soja. Montevideo, s.e. pp. 1-22 (Publicación Miscelánea no. 15).
4. BERARDO, A.; REUSSI, N. 2009. Pautas para el manejo de la fertilización en soja. (en línea). Mar del Plata, s.e. s.p. Consultado sept. 2011. Disponible en <http://www.laboratoriofertilab.com.ar/Trabajos/2009.Manejo%20de%20la%20fertilizacion%20en%20Soja.pdf>
5. BORGHI, E.; WORNICOV, G. 1998. Evaluación de la capacidad predictiva de distintos indicadores de suelo y planta para el ajuste de la refertilización nitrogenada en el cultivo de maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 53 p.
6. CANO, J.; ERNST, O.; GARCIA, F. 2006. Balance aparente de fósforo en rotaciones agrícolas del litoral oeste del Uruguay. (en línea). INPOFOS. Informaciones Agronómicas. no. 32:8-11 Consultado sept. 2011. Disponible en [http://www.ipni.net/ppiweb/iaarg.nsf/\\$webindex/0C2A3F3D6648275703257242006ADA77/\\$file/2.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/iaarg.nsf/$webindex/0C2A3F3D6648275703257242006ADA77/$file/2.pdf)
7. CASTRO, J.; DE ZAMUZ, E.; OUDRI, N. 1981. Guía para la fertilización de pasturas. (en línea). In: Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger. Estación Experimental Agropecuaria La Estanzuela. Fertilización en pasturas. Montevideo. pp. 1-15 (Publicación Miscelánea no. 37). Consultado sept. 2011. Disponible en

<http://www.inia.org.uy/sitios/lesis/fertilizacion/UY.CIAAB.MISC.1981.no.37.GuiaCastro.pdf>

8. CIAMPITTI, I.; RUBIO, G. 2005. Mejores prácticas de manejo de fósforo. (en línea). s.l., IPNI Cono Sur - UBA/IBYF CONICET. 30 p. Consultado sept. 2011. Disponible en [http://www.ipni.net/ppiweb/pltams.nsf/2c7b019d46c9bda485256a6d006d777d/521369993ad5da1a032575b200578909/\\$FILE/Ciampitti%20PNI-2009.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/pltams.nsf/2c7b019d46c9bda485256a6d006d777d/521369993ad5da1a032575b200578909/$FILE/Ciampitti%20PNI-2009.pdf)
9. \_\_\_\_\_. 2009. Dinámica del fósforo del suelo en rotaciones agrícolas en ensayos de nutrición a largo plazo. (en línea). Tesis MSc. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 116 p. Consultado sept. 2011. Disponible en [http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/37270eea1c31d1f90325726c006c86ee/\\$FILE/Ciampitti2009-MasterScience.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/37270eea1c31d1f90325726c006c86ee/$FILE/Ciampitti2009-MasterScience.pdf)
10. DIAZ, M.; GARCÍA, F.; MELGAR, R. 2002. Fertilización en soja y trigo-soja; respuesta a la fertilización en la región pampeana. Resultados de la red de ensayos del Proyecto Fertilizar INTA campaña 2000/2001 y 2001/2002. (en línea). Pergamino, INTA. 19 p. Consultado sept. 2011. Disponible en <http://www.google.com.uy/url?sa=t&rct=j&q=fertilizaci%C3%B3n%20e n%20soja%20y%20trigo%20-%20soja%3A%20respuesta%20a%20la%20fertilizaci%C3%B3n%20e n%20la%20regi%C3%B3n%20pampeana&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ipni.net%2Fppiweb%2Fltams.nsf%2F87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70%2F6284f3d5b866266403256c470056a246%2F%24FILE%2FInforme%2520Red%2520de%2520ensayos%2520TRIGO%2520SOJA2001.doc&ei=GgLmTojJCIfUgAf4tZz1BQ&usg=AFQjCNE9yhH7I6rOyocU3ud3vN0vXVvw6w>
11. ERNST, O; SIRI, G. 2011 Fertilización con fósforo ¿por balance o por suficiencia? In: Simposio Nacional de Agricultura (2°, Paysandú, 2011). No se llega, si no se sabe a dónde ir. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 35-44.
12. FERRARIS, G.; GUTIERREZ, F.; ECHEVERRÍA, H. 2002. Soja; respuesta a la fertilización en el área sojera Argentina. (en línea). In: INTA. Estación Experimental Agropecuaria Pergamino. Resultados

campañas 2000-01 y 2001-02 de la red de ensayos del proyecto Fertilizar-INTA. Pergamino. 43 p. Consultado sept. 2011. Disponible en [http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/6284f3d5b866266403256c470056a246/\\$FILE/Ferraris%20et%20al.-Informe%20Fertilizar%20Soja%201a.%202001.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/6284f3d5b866266403256c470056a246/$FILE/Ferraris%20et%20al.-Informe%20Fertilizar%20Soja%201a.%202001.pdf)

13. \_\_\_\_\_.; COURETOT, L. 2004. Fertilización fosforada en soja. Diagnóstico y tecnología de aplicación. (en línea). In: INTA. Estación Experimental Agropecuaria Pergamino. Ensayos del proyecto Regional Agrícola, campaña 2003-04. Pergamino. s.p. Consultado sept. 2011. Disponible en <http://www.elsitioagricola.com/articulos/ferraris/Fertilizacion%20Fosforada%20en%20Soja%20-%20Diagnostico%20y%20Tecnologia%20Aplicacion.asp>
14. FIXEN, P. 2008. Dinámica del fósforo en el suelo y en el cultivo en relación al manejo de los fertilizantes fosfatados. (en línea). s.n.t. pp. 1-10. Consultado sept. 2011. Disponible en [http://www.ipni.net/ppiweb/ltamn.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/b8153a5e80e11d9c05256d58005bb04a/\\$FILE/Dinamica%20del%20f%F3sforo.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/ltamn.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/b8153a5e80e11d9c05256d58005bb04a/$FILE/Dinamica%20del%20f%F3sforo.pdf)
15. FONTANETTO H.; VIVAS, R.; ALBRECHT, R.; HOTIAN, J. 2003. La Fertilización con N, P y S y su residualidad en una secuencia agrícola de la región central de Santa Fe; efecto sobre el rendimiento de granos. In: Simposio El Fósforo en la Agricultura (1°, Santa Fe, 2003). Trabajos presentados. Rosario, INPOFOS Cono Sur. p. 91-92.
16. \_\_\_\_\_.; KELLER, O. 2005. Consideraciones sobre el manejo de la fertilización de la soja. (en línea). In: INTA. Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información técnica cultivos de verano; campaña 2006. pp. 45-79 (Publicación Miscelánea no. 106). Consultado sept. 2011. Disponible en <http://agrolluvia.com/wp-content/uploads/2009/09/r-consideraciones-manejo-fertilizacion-soja.pdf>
17. GARCIA, F. 2005. Soja; criterios para el manejo de la fertilización del cultivo. (en línea). INPOFOS Cono Sur. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. no. 27:1-6. Consultado sept. 2011. Disponible en <http://www.ipni.net/publication/ia->

lacs.nsf/0/44AD4905A950D15E85257999005FB9C2/\$FILE/IA27.pdf

18. \_\_\_\_\_. 2006. La nutrición de los cultivos y la nutrición de los suelos. (en línea). *Informaciones Agronómicas*. 29:13-16. Consultado sept. 2011. Disponible en [http://oil-palm.net/ppiweb/iaarg.nsf/\\$webindex/7569E9F03D249172032571300069CACC/\\$file/FGarcia+-+La+nutrici%C3%B3n+de+los+cultivos+y+la+nutrici%C3%B3n+de+los+suelos.pdf](http://oil-palm.net/ppiweb/iaarg.nsf/$webindex/7569E9F03D249172032571300069CACC/$file/FGarcia+-+La+nutrici%C3%B3n+de+los+cultivos+y+la+nutrici%C3%B3n+de+los+suelos.pdf)
  
19. GERSTER, G.; NOVELLO, O. 2003. Fertilización con nitrógeno, fósforo, azufre y micronutrientes en la secuencia trigo – soja. (en línea). *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. no. 18:1-9. Consultado sept. 2011. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/37248B8C8DC91E60852579990061D5BC/\\$FILE/Gerster%20Trigo-Soja.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/37248B8C8DC91E60852579990061D5BC/$FILE/Gerster%20Trigo-Soja.pdf)
  
20. HERNANDEZ, C.; SOSA, F.; SANZANO, G.; MORANDINI, M.; ROJAS, H.; DEVANI, M. 2009. Efecto de distintas alternativas de fertilización fosfatada en la secuencia trigo-soja sobre el fósforo asimilable y los rendimientos en la Provincia de Tucumán, Argentina. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*. 86 (2): 31-36.
  
21. KANTOLIC, A. 2003. Bases funcionales de la determinación del rendimiento y manejo del cultivo de soja. In: Satorre, E. ed. *El libro de la Soja*. Buenos Aires, Argentina, Servicios y Marketing Agropecuario. pp. 31-44.
  
22. MALLARINO, A. 2001. Manejo de la fertilización con fósforo y potasio para maíz y soja en el centro-oeste de los Estados Unidos. (en línea). Ames, Iowa, USA, Iowa State University. Department of Agronomy. 9 p. Consultado sept. 2011. Disponible en [http://oil-palm.info/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/3631e1cebd8638420325700d0061609b/\\$FILE/Mallarino-PKEEUU1.pdf](http://oil-palm.info/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/3631e1cebd8638420325700d0061609b/$FILE/Mallarino-PKEEUU1.pdf)
  
23. MARELLA, G.; CROSA, A.; BORDABERRY, J. 1981. Respuesta de la soja a la fertilización fosfatada y potásica. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 300 p.
  
24. MINTEGUIAGA, J.; FIRPO, L.; MARIN, G.; POZZI, R.; LAS ROSAS, S.; BERARDO, A. 2006 Red de ensayos en nutrición de cultivos región

CREA sur de Santa Fe. Resultados de la campaña 2005/06; Soja de Segunda. (en línea). INPOFOS. Informaciones Agronómicas. no. 30:22-25. Consultado sept. 2011. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/E5CA39AD2713DAA685257995007A4804/\\$FILE/6.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/E5CA39AD2713DAA685257995007A4804/$FILE/6.pdf)

25. MORON, A. 1992. El Fósforo en el sistema suelo-planta. Revista INIA. no. 1: 45-60.
26. SALVAGIOTTI F.; GERSTER, G.; BACIGALUPPO, S.; CASTELLARÍN, J.; GALARZA, C.; GONZÁLEZ, N.; GUDELJ, V.; NOVELLO, O.; PEDROL, H. VALLONE, P. 2005. Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. (en línea). Ciencia del Suelo. 22(2):92-101. Consultado sept. 2011 Disponible en [http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol\\_22n%202/salvagiotti\\_92-101.pdf](http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_22n%202/salvagiotti_92-101.pdf)
27. TIESSEN, H. 2003. Ciclado y disponibilidad de fósforo; manejando procesos y cantidades. (en línea). s.l., INPOFOS Cono Sur. 11 p. Consultado sept. 2011. Disponible en [http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/d7076c36d5c118460325726c00581d15/\\$FILE/Tiessen.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/d7076c36d5c118460325726c00581d15/$FILE/Tiessen.pdf)
28. VIVAS, H. 1999. Residualidad de la fertilización fosfatada y su Influencia en la producción de soja y en la rotación. (en línea). Rafaela, INTA. 4 p. Consultado sept 2011. Disponible en <http://agroestrategias.com/pdf/Nutricion%20-%20Residualidad%20de%20la%20Fertilizacion%20Fosfatada.pdf>
29. \_\_\_\_\_.; ALBRECHT, R.; HOTIAN, J.; QUAINO, O. 2007. Residualidad del fósforo y del azufre. Estrategia de fertilización en una secuencia de cultivos. (en línea). IPNI. Informaciones Agronómicas. no. 35:11-16. Consultado sept. 2011. Disponible en [http://www.ipni.net/ppiweb/iaarg.nsf/\\$webindex/A1407667A574F5B103257341005CBEA1/\\$file/3.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/iaarg.nsf/$webindex/A1407667A574F5B103257341005CBEA1/$file/3.pdf)
30. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2008. Relación del fósforo y del azufre asociada a la respuesta del doble cultivo trigo/soja en un suelo del centro de Santa Fé. (en línea). In: INTA.

Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información técnica cultivos de verano; campaña 2007. pp. 75-83 (Publicación Miscelánea no. 108). Consultado sept. 2011. Disponible en [http://www.inta.gov.ar/rafaela/info/documentos/miscelaneas/108/misc\\_108\\_75.pdf](http://www.inta.gov.ar/rafaela/info/documentos/miscelaneas/108/misc_108_75.pdf)

9. ANEXOS

ANEXO No. 1: ANAVA de regresión rendimiento según precipitaciones de siembra a R8.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	490044.38	1	490044.38	2.03	0.1825
PP S-R8	490044.38	1	490044.38	2.03	0.1825
Error	2661946.39	11	241995.13		
Total	3151990.77	12			

ANEXO No. 2: ANAVA de regresión rendimiento según precipitaciones de R3 a R6

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	171239.44	1	171239.44	0.63	0.4443
PP R2-R6	171239.44	1	171239.44	0.63	0.4443
Error	2992328.26	11	272029.84		
Total	3163567.69	12			

ANEXO No. 3: ANAVA de regresión rendimiento según precipitaciones de R7 a R8

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1368390.05	1	1368390.05	8.38	0.0146
R7-R8	1368390.05	1	1368390.05	8.38	0.0146
Error	1795177.65	11	163197.97		
Total	3163567.69	12			

ANEXO No. 4: ANAVA para rendimiento en grano de soja según dosis de P y K aplicada.

Sitio	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
1	Modelo.	235384.23	6	39230.70	0.93	0.5199
	Tratamiento	234063.12	4	58515.78	1.39	0.3192
	Bloque	1321.11	2	660.55	0.02	0.9844
	Error	336210.23	8	42026.28		
	Total	571594.46	14			
Sitio	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
2	Modelo.	440377.04	6	73396.17	1.46	0.4058
	Tratamiento	363521.39	4	90880.35	1.81	0.3262
	Bloque	76855.65	2	38427.83	0.77	0.5383

	Error	150358.97	3	50119.66		
	Total	590736.01	9			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>3</b>	Modelo.	128401.19	6	21400.20	0.87	0.5533
	Tratamiento	76764.58	4	19191.15	0.78	0.5670
	Bloque	51636.61	2	25818.31	1.05	0.3926
	Error	196125.79	8	24515.72		
	Total	324526.98	14			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>4</b>	Modelo.	384065.36	6	64010.89	1.75	0.2400
	Tratamiento	217411.74	4	54352.93	1.49	0.3030
	Bloque	166653.63	2	83326.81	2.28	0.1728
	Error	255891.45	7	36555.92		
	Total	639956.81	13			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>5</b>	Modelo.	1686145.69	6	281024.28	2.35	0.1309
	Tratamiento	786890.23	4	196722.56	1.64	0.2543
	Bloque	899255.47	2	449627.73	3.76	0.0706
	Error	956846.67	8	119605.83		
	Total	2642992.37	14			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>6</b>	Modelo.	2133280.43	6	355546.74	8.43	0.0041
	Tratamiento	683089.18	4	170772.30	4.05	0.0440
	Bloque	1450191.24	2	725095.62	17.19	0.0013
	Error	337527.59	8	42190.95		
	Total	2470808.02	14			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>7</b>	Modelo.	440838.73	6	73473.12	3.06	0.1492
	Tratamiento	197699.88	4	49424.97	2.06	0.2507
	Bloque	243138.85	2	121569.42	5.07	0.0801
	Error	96003.84	4	24000.96		
	Total	536842.57	10			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>9</b>	Modelo.	272978.50	6	45496.42	1.13	0.4258
	Tratamiento	249341.58	4	62335.39	1.54	0.2785
	Bloque	23636.92	2	11818.46	0.29	0.7541
	Error	323280.62	8	40410.08		
	Total	596259.12	14			

<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>10</b>	Modelo.	453673.25	6	75612.21	0.28	0.9260
	Tratamiento	353423.36	4	88355.84	0.33	0.8495
	Bloque	100249.89	2	50124.95	0.19	0.8345
	Error	1612760.36	6	268793.39		
	Total	2066433.62	12			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>11</b>	Modelo.	1843668.77	6	307278.13	1.44	0.3203
	Tratamiento	868680.69	4	217170.17	1.02	0.4599
	Bloque	974988.08	2	487494.04	2.28	0.1724
	Error	1494453.98	7	213493.43		
	Total	3338122.75	13			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>12</b>	Modelo.	2377851.75	6	396308.62	5.64	0.0144
	Tratamiento	1854092.35	4	463523.09	6.59	0.0119
	Bloque	523759.40	2	261879.70	3.72	0.0719
	Error	562529.55	8	70316.19		
	Total	2940381.30	14			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>13</b>	Modelo.	1517405.56	6	252900.93	1.88	0.2310
	Tratamiento	543680.34	4	135920.08	1.01	0.4710
	Bloque	973725.22	2	486862.61	3.62	0.0931
	Error	807342.89	6	134557.15		
	Total	2324748.45	12			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>14</b>	Modelo.	1744513.96	5	348902.79	3.64	0.1175
	Tratamiento	1577303.19	4	394325.80	4.11	0.0999
	Bloque	167210.76	1	167210.76	1.74	0.2573
	Error	383896.25	4	95974.06		
	Total	2128410.21	9			

ANEXO No. 5: ANAVA de regresión rendimiento según número de granos por m<sup>2</sup>

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo.	5856896.11	1	5856896.11	102.98	<0.0001
N°Gr/m <sup>2</sup>	5856896.11	1	5856896.11	102.98	<0.0001
Error	1990552.32	35	56872.92		
Total	7847448.43	36			

ANEXO No. 6: ANAVA de regresión rendimiento según peso de grano

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo.	3414492.09	1	3414492.09	26.96	<0.0001
PG	3414492.09	1	3414492.09	26.96	<0.0001
Error	4432956.35	35	126655.90		
Total	7847448.43	36			

ANEXO No. 7: ANAVA de regresión peso de grano según número de granos por m<sup>2</sup>

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo.	996.85	1	996.85	3.01	0.0917
N°Gr/m <sup>2</sup>	996.85	1	996.85	3.01	0.0917
Error	11602.17	35	331.49		
Total	12599.03	36			

Anexo No 8: Resultado del análisis estadístico para rendimiento en grano de soja según dosis de fósforo y potasio aplicada.

<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>1</b>	Modelo.	235384,23	6	39230,7	0,93	0,5199
	Tratamiento	234063,12	4	58515,78	1,39	0,3192
	Bloque	1321,11	2	660,55	0,02	0,9844
	Error	336210,23	8	42026,28		
	Total	571594,46	14			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>2</b>	Modelo.	220995,48	6	36832,58	0,42	0,8427

	Tratamiento	94647,63	2	47323,81	0,54	0,6091
	Bloque	126347,85	4	31586,96	0,36	0,8291
	Error	526638,86	6	87773,14		
	Total	747634,35	12			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>3</b>	Modelo.	128401,19	6	21400,2	0,87	0,5533
	Tratamiento	76764,58	4	19191,15	0,78	0,567
	Bloque	51636,61	2	25818,31	1,05	0,3926
	Error	196125,79	8	24515,72		
	Total	324526,98	14			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>4</b>	Modelo.	384065,36	6	64010,89	1,75	0,24
	Tratamiento	163262,54	2	81631,27	2,23	0,1778
	Bloque	220802,83	4	55200,71	1,51	0,2971
	Error	255891,45	7	36555,92		
	Total	639956,81	13			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>5</b>	Modelo.	1643464,96	6	273910,83	3,41	0,0667
	Tratamiento	635072,36	2	317536,18	3,95	0,0709
	Bloque	1008392,6	4	252098,15	3,14	0,0891
	Error	562141,03	7	80305,86		
	Total	2205605,99	13			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>6</b>	Modelo.	2133280,43	6	355546,74	8,43	0,0041
	Tratamiento	1450191,24	2	725095,62	17,19	0,0013
	Bloque	683089,18	4	170772,3	4,05	0,044
	Error	337527,59	8	42190,95		
	Total	247808,02	14			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>7</b>	Modelo.	440838,73	6	73473,12	3,06	0,1492
	Tratamiento	258711,75	2	129355,88	5,39	0,0733
	Bloque	182126,98	4	45531,74	1,9	0,2752
	Error	96003,84	4	24000,96		
	Total	536842,57	10			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>9</b>	Modelo.	272978,5	6	45496,42	1,13	0,4258
	Tratamiento	23636,92	2	11818,46	0,29	0,7541
	Bloque	249341,58	4	62335,39	1,54	0,2785
	Error	323280,62	8	40410,08		

	Total	596259,12	14			
Sitio	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
10	Modelo.	453673,25	6	75612,21	0,28	0,926
	Tratamiento	102932,68	2	51466,34	0,19	0,8306
	Bloque	350740,58	4	87685,14	0,33	0,8511
	Error	1612760,36	6	268793,39		
	Total	2066433,62	12			
Sitio	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
11	Modelo.	999247,7	6	166541,28	1,08	0,4631
	Tratamiento	507961,06	2	253980,53	1,65	0,2685
	Bloque	491286,65	4	122821,66	0,8	0,5678
	Error	923459,06	6	153909,84		
	Total	1922706,76	12			
Sitio	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
12	Modelo.	2377851,75	6	396308,62	5,64	0,0144
	Tratamiento	523759,4	2	261879,7	3,72	0,0719
	Bloque	1854092,35	4	463523,09	6,59	0,0119
	Error	562529,55	8	70316,19		
	Total	2940381,3	14			
Sitio	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
13	Modelo.	3926562,6	6	654427,1	0,99	0,4579
	Tratamiento	1842651,99	2	921325,99	1,39	0,271
	Bloque	2048370,49	4	512092,62	0,78	0,5542
	Error	13211727,8	20	660586,39		
	Total	17138290,4	26			

Sitio	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
14	Modelo.	1744513,96	5	348902,79	3,64	0,1175
	Tratamiento	167210,76	1	167210,76	1,74	0,2573
	Bloque	1577303,19	4	394325,8	4,11	0,0999
	Error	383896,25	4	95974,06		
	Total	2128410,21	9			

Anexo No. 9: Anava de la Regresión

Sitio	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
-------	------	----	----	----	---	---------

1	Modelo.	167888,67	2	83944,33	1,97	0,2195
	Dosis	167888,67	2	83944,33	1,97	0,2195
	Error	255199,33	6	42533,22		
	<u>Total</u>	<u>423088,00</u>	<u>8</u>			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
2	Modelo.	55273,65	1	55273,65	1,89	0,2275
	Dosis	55273,65	1	55273,65	1,89	0,2275
	Error	146175,21	5	29235,04		
	<u>Total</u>	<u>201448,86</u>	<u>6</u>			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
3	Modelo.	47676,22	2	23838,11	1,01	0,4201
	Dosis	47676,22	2	23838,11	1,01	0,4201
	Error	142209,33	6	23701,56		
	<u>Total</u>	<u>189885,56</u>	<u>8</u>			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
4	Modelo.	110025,26	1	110025,26	4,59	0,0758
	Dosis	110025,26	1	110025,26	4,59	0,0758
	Error	143758,62	6	23959,77		
	<u>Total</u>	<u>253783,88</u>	<u>7</u>			

<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
5	Modelo.	726624,00	1	726624,00	3,52	0,1097
	Dosis	726624,00	1	726624,00	3,52	0,1097
	Error	1237952,88	6	206325,48		
	<u>Total</u>	<u>1964576,88</u>	<u>7</u>			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
6	Modelo.	466776,00	2	233388,00	1,43	0,3095
	Dosis	466776,00	2	233388,00	1,43	0,3095
	Error	975932,00	6	162655,33		
	<u>Total</u>	<u>1442708,00</u>	<u>8</u>			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>

7	Modelo.	12673,71	1	12673,71	0,36	0,5807
	Dosis	12673,71	1	12673,71	0,36	0,5807
	Error	140735,79	4	35183,95		
	<u>Total</u>	<u>153409,50</u>	<u>5</u>			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
9	Modelo.	71198,00	2	35599,00	1,04	0,4108
	Dosis	71198,00	2	35599,00	1,04	0,4108
	Error	206248,00	6	34374,67		
	<u>Total</u>	<u>277446,00</u>	<u>8</u>			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
10	Modelo.	161881,88	2	80940,94	0,30	0,7565
	Dosis	161881,88	2	80940,94	0,30	0,7565
	Error	1371078,00	5	274215,60		
	<u>Total</u>	<u>1532959,88</u>	<u>7</u>			

<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
11	Modelo.	85636,01	1	85636,01	3,52	0,1193
	Dosis	85636,01	1	85636,01	3,52	0,1193
	Error	121537,71	5	24307,54		
	<u>Total</u>	<u>207173,71</u>	<u>6</u>			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
12	Modelo.	1353386,89	2	676693,44	7,24	0,0251
	Dosis	1353386,89	2	676693,44	7,24	0,0251
	Error	560424,00	6	93404,00		
	<u>Total</u>	<u>1913810,89</u>	<u>8</u>			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
13	Modelo.	152881,00	1	152881,00	3,86	0,1066
	Dosis	152881,00	1	152881,00	3,86	0,1066
	Error	198000,43	5	39600,09		
	<u>Total</u>	<u>350881,43</u>	<u>6</u>			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
14	Modelo.	607322,33	2	303661,17	3,55	0,1617

	Dosis	607322,33	2	303661,17	3,55	0,1617
	Error	256275,00	3	85425,00		
	<u>Total</u>	<u>863597,33</u>	<u>5</u>			

Anexo No. 10: Resultado del análisis estadístico para rendimiento en grano de soja según dosis de fósforo aplicada

Sitio	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
1	Modelo.	170574,19	4	42643,55	0,68	0,642
	bloque	3048,16	2	1524,08	0,02	0,9762
	tratamiento	167526,03	2	83763,01	1,33	0,3602
	Error	251488,04	4	62872,01		
	Total	422062,23	8			
Sitio	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
2	Modelo.	113131,12	4	28282,78	0,64	0,6858
	bloque	37082,34	2	18541,17	0,42	0,7052
	tratamiento	76048,78	2	38024,39	0,86	0,5384
	Error	88690,89	2	44345,45		
	Total	201822,01	6			
Sitio	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
3	Modelo.	109015,56	4	27253,89	1,34	0,3909
	bloque	61157,06	2	30578,53	1,51	0,3252
	tratamiento	47858,51	2	23929,25	1,18	0,3957
	Error	81147,46	4	20286,86		
	Total	190163,02	8			
Sitio	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
4	Modelo.	189166,52	4	47291,63	2,2	0,272
	bloque	25265,36	2	12632,68	0,59	0,6095
	tratamiento	163901,16	2	81950,58	3,81	0,1503
	Error	64596,01	3	21532		
	Total	253762,53	7			

<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>5</b>	Modelo.	1902816,11	4	475704,03	22,88	0,0139
	bloque	1015368,35	2	507684,17	24,41	0,0139
	tratamiento	887447,76	2	443723,88	13,34	0,0801
	Error	62384,43	3	20794,81		
	Total	1965200,54	7			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>6</b>	Modelo.	1385028,6	4	346257,15	24,3	0,0046
	bloque	918933,95	2	459466,97	32,25	0,0034
	tratamiento	466094,65	2	233047,32	16,36	0,0119
	Error	56994,1	4	14248,52		
	Total	1442022,7	8			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>7</b>	Modelo.	138286,89	4	34571,72	2,29	0,4554
	bloque	24468,06	2	12234,03	0,81	0,618
	tratamiento	113818,82	2	56909,41	3,76	0,3424
	Error	15116,7	1	15116,7		
	Total	153403,59	5			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>9</b>	Modelo.	125167,39	4	31291,85	0,82	0,5726
	bloque	54105,29	2	27052,64	0,71	0,5441
	tratamiento	71062,11	2	35531,05	0,93	0,4645
	Error	152090,99	4	38022,75		
	Total	277258,38	8			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>10</b>	Modelo.	199244,23	4	49811,06	0,11	0,9698
	bloque	100003,98	2	50001,99	0,11	0,8973
	tratamiento	99240,25	2	49620,13	0,11	0,898
	Error	1334503,78	3	444834,59		
	Total	1533748,01	7			

<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>11</b>	Modelo.	126139,03	4	31534,76	0,78	0,6289
	bloque	4680,61	2	2340,3	0,06	0,9453
	tratamiento	121458,43	2	60729,21	1,5	0,3999
	Error	80930,62	2	40465,31		
	Total	207069,66	6			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>12</b>	Modelo.	1765516,33	4	441379,08	11,99	0,0169
	bloque	412897,05	2	206448,52	5,61	0,0691
	tratamiento	1352619,29	2	676309,64	18,37	0,0096
	Error	147300,59	4	36825,15		
	Total	1912816,92	8			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>13</b>	Modelo.	307000,43	4	76750,11	3,52	0,2334
	bloque	278473,74	2	139236,87	6,38	0,1355
	tratamiento	28526,69	2	14263,35	0,65	0,6047
	Error	43641	2	21820,5		
	Total	350641,43	6			
<b>Sitio</b>	<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>14</b>	Modelo.	615334,43	3	205111,48	1,66	0,3975
	bloque	8671,6	1	8671,6	0,07	0,8159
	tratamiento	606662,82	2	303331,41	14,20	0,0702
	Error	247258,32	2	123629,16		
	Total	862592,75	5			

ANEXO No. 11: Evolución de P en suelo para Siembra, 30, 60 y 90 días post-fertilización.

Sitio	Siembra	Período																		CV	
		30						60						90							
		0	30	60	SCC/R	SCS/R		0	30	60	SCC/R	SCS/R		0	30	60	SCC/R	SCS/R			
1	12a	6de	10,33abc	9,67abcd	8bcde	-	7bcde	9bcdef	5,67ef	10,67ab	9,67abcd	6,67cde	8,67cdef	5e	4,67e	6,67cde	12,67ab	9bcdef	13a	8,33a	26,68
2	4,67f	5,67ef	7,33cdef	11abcd	7,33cdef	-	7def	9bcdef	5,67ef	10,67abcd	8defg	8,67cde	8,67cdef	8,67cdef	8,67cdef	12,33abc	12,67ab	9bcdef	13a	8,33a	28,94
3	8,67a	7,33a	6,67a	7,33a	7a	-	9,33a	11ab	8,67bc	8c	9,33a	9a	8,33a	11,67a	7,33a	8,33a	8,33a	9a	8,33a	20,98	
4	5,67a	6a	5,67a	9,67a	7a	-	4,33a	4,33a	6,67a	6,67a	5,33a	5,33a	7a	5,33a	7a	6,33a	6,33a	8a	7a	31,83	
5	8a	9a	6,67a	11a	9,3a	-	8a	6,67a	8a	7a	7,67a	8a	7,33a	9,33a	7,67a	8,33a	8a	7,33a	8a	27,76	
6	15,33a	11,67a	12,67a	13,33a	13,33a	-	10,67a	11,67a	12,33a	16,33a	19,67a	18,67a	19a	14,67a	9,67a	11a	18,67a	19a	19a	32,73	
7	19,67a	12,67bc	12,67bc	14,33ab	15,33ab	-	5,26c	5,14c	9,81bc	10,67bc	12,81bc	11,26bc	11,26bc	11,26bc	9,14bc	13,93ab	11,26bc	15,31ab	15,31ab	22,26	
9	16,67a	15,33a	21a	25,33a	14,67a	-	11,67a	17a	21,67a	16a	-	16,33a	20a	16,33a	20,33a	28,33a	20a	-	-	30,45	
10	11a	13a	14a	12,1a	12,41a	-	10,33a	16a	9,41a	11,33a	-	11a	10,67a	11a	10,67a	9,91a	10a	-	-	23,64	
11	7,67a	12a	16,67a	17a	14a	-	15a	18,62a	19,4a	19,67a	-	15,33a	15,33a	15,33a	15,33a	18,67a	15,33a	-	-	37,47	
12	25a	25,33a	27a	22,64a	25,57a	-	17,33a	19a	17a	26a	-	17a	22,33a	17a	14a	17a	22,33a	-	-	29,9	
13	25a	42,78a	31,33a	44,67a	31,33a	29,33a	26,67a	29,67a	34,34a	19,9a	27,67a	21,67a	21,67a	21,67a	23a	37a	31,9a	33,67a	33,67a	39,6	
14	9,33a	15a	13a	17a	15a	17,67a	12a	19,67a	16,67a	15,6a	11,33a	12,33a	12,33a	12,33a	16,33a	16,67a	17a	15a	15a	31,51	

Medias con letra común no son significativamente diferente para cada fila (p<0,05-LSD Fischer)

ANAVA: Análisis Estadístico de la dinámica de P a siembra, 30, 60 y 90 días.

Sitio 1						Sitio 9					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	475,91	19	25,05	4,53	0,0001	Modelo.	800,27	17	47,07	1,5	0,1613
Bloque	53,81	2	26,91	4,86	0,0139	Bloque	10,79	2	5,4	0,17	0,8428
Tratamiento	422,09	17	24,83	4,49	0,0001	Tratamiento	789,48	15	52,63	1,68	0,1111
Error	188,19	34	5,53			Error	941,21	30	31,37		
Total	664,09	53				Total	1741,48	47			
Sitio 2						Sitio 10					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	475,91	19	25,05	4,53	0,0001	Modelo.	150,4	17	8,85	1,17	0,3479
Bloque	53,81	2	26,91	4,86	0,0139	Bloque	31,87	2	15,93	2,11	0,1411
Tratamiento	422,09	17	24,83	4,49	0,0001	Tratamiento	118,53	15	7,9	1,05	0,4433
Error	188,19	34	5,53			Error	196,04	26	7,54		
Total	664,09	53				Total	346,43	43			
Sitio 3						Sitio 11					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	105,78	19	5,57	1,73	0,0804	Modelo.	849,92	17	50	1,88	0,071
Bloque	21,78	2	10,89	3,38	0,0459	Bloque	80,15	2	40,08	1,51	0,2398
Tratamiento	84	17	4,94	1,53	0,1412	Tratamiento	769,76	15	51,32	1,93	0,0681
Error	109,56	34	3,22			Error	690,33	26	26,55		
Total	215,33	53				Total	1540,25	43			
Sitio 4						Sitio 12					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	92	19	4,84	1,23	0,2882	Modelo.	876,54	17	51,56	1,53	0,1577
Bloque	9,33	2	4,67	1,19	0,3166	Bloque	66,33	2	33,17	0,98	0,387
Tratamiento	82,67	17	4,86	1,24	0,2879	Tratamiento	810,21	15	54,01	1,6	0,1391
Error	133,33	34	3,92			Error	910,44	27	33,72		
Total	225,33	53				Total	1786,98	44			
Sitio 5						Sitio 13					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	65,81	19	3,46	0,69	0,8028	Modelo.	3166,26	21	150,77	1,12	0,3771
Bloque	11,54	2	5,77	1,15	0,3297	Bloque	1284,73	2	642,37	4,78	0,0155
Tratamiento	54,28	17	3,19	0,64	0,8389	Tratamiento	1881,53	19	99,03	0,74	0,7546
Error	165,88	33	5,03			Error	4164,04	31	134,32		
Total	231,7	52				Total	7330,3	52			
Sitio 6						Sitio 14					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	580,78	19	30,57	1,41	0,1862	Modelo.	689,45	21	32,83	1,74	0,0707
Bloque	142,11	2	71,06	3,28	0,0498	Bloque	59,66	2	29,83	1,58	0,2201
Tratamiento	438,67	17	25,8	1,19	0,3217	Tratamiento	629,79	19	33,15	1,75	0,0718
Error	736,56	34	21,66			Error	680,07	36	18,89		
Total	1317,33	53				Total	1369,52	57			
Sitio 7											
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor						
Modelo.	917,18	19	48,27	4,84	0,0002						
Bloque	183,57	2	91,79	9,21	0,0012						
Tratamiento	733,61	17	43,15	4,33	0,0007						
Error	229,33	23	9,97								
Total	1146,51	42									

ANEXO No. 12: Efecto de los diferentes tratamientos en cada uno de las fechas de muestreo.

Sitio 1	Período			Sitio 6	Período			Sitio 12	Período		
	0	30	90		0	30	90		0	30	90
OP	12a	6a	7a	5a	15a	12a	11a	0P	17a	25a	17a
30P	12a	10a	6a	5a	15a	13a	12a	30P	17a	27a	19a
60P	12a	10a	11a	7a	15a	13a	12a	60P	17a	22a	17a
SC C/R	12a	8a	10a	6a	15a	13a	16a	SC C/R	17a	23a	26a
SC S/R	12a		7a	7a	15a	20a	19a	SC S/R	17a		
CV(%)		36,84	29,05	21,94		16,99	49,07	CV(%)		30,39	40,26
							32,6				26,83
Sitio 2	Período			Sitio 7	Período			Sitio 13	Período		
OP	0	30	60	90	0	30	60	90	0	30	60
30P	5a	6a	7a	9a	20a	13a	7a	10a	25a	46a	27a
60P	5a	8a	9a	12a	20a	13a	7a	9a	25a	31a	30a
SC C/R	5a	11a	6a	13a	20a	14a	9a	16a	25a	45a	35a
SC S/R	5a	7a	11a	9a	20a	15a	11a	10a	25a	31a	25a
CV(%)		27,69	22,86	26,62		27,96	25,39	11,15		42,85	44,4
											36,2
Sitio 3	Período			Sitio 9	Período			Sitio 14	Período		
OP	0	30	60	90	0	30	60	90	0	30	60
30P	9a	7a	9a	12a	17a	15a	12a	16a	9a	15a	12bc
60P	9a	7a	11a	7b	17a	21a	17a	20a	9a	13a	20a
SC C/R	9a	7a	9a	8b	17a	25a	22a	28a	9a	17a	17ab
SC S/R	9a	7a	8a	9b	17a	15a	16a	20a	9a	15a	13abc
CV(%)		13,31	20,85	14,88		26,62	27,65	33,16		38,5	17,6
											29,97
Sitio 4	Período			Sitio 10	Período				Período		
OP	0	30	60	90	0	30	60	90			
30P	6a	6a	4a	5a	11a	13a	10a	11a			
60P	6a	6a	4a	7a	11a	14a	16a	11a			
SC C/R	6a	10a	7a	6a	11a	13a	10a	9a			
SC S/R	6a	7a	7a	8a	11a	12a	11a	10a			
CV(%)		33,69	42,7	33,7		15,9	30,61	23,54			
Sitio 5	Período			Sitio 11	Período				Período		
OP	0	30	60	90	0	30	60	90			
30P	8a	9a	8a	9a	8a	12a	15a	15a			
60P	8a	7a	7a	8a	8a	17a	21a	15a			
SC C/R	8a	11a	8a	8a	8a	17a	21a	19a			
SC S/R	8a	9a	7a	8a	8a	14a	20a	15a			
CV(%)		26,77	24,14	37,93		31,98	34,84	41,76			

Medias con diferente letra no difieren significativamente diferente por columna con  $p < 0.05$

## ANAVA: Análisis Estadístico del efecto de los tratamientos en los diferentes momentos

Sitio 1																	
30 días						60 días						90 días					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	40,17	5	8,03	0,82	0,5774	Modelo.	60,8	6	10,13	1,88	0,2011	Modelo.	20,13	6	3,36	1,94	0,1902
Tratamiento	33,67	3	11,22	1,14	0,4044	Tratamiento	50	4	12,5	2,31	0,1452	Tratamiento	15,33	4	3,83	2,21	0,1577
Bloque	6,5	2	3,25	0,33	0,7302	Bloque	10,8	2	5,4	1	0,4096	Bloque	4,8	2	2,4	1,38	0,3045
Error	58,83	6	9,81			Error	43,2	8	5,4			Error	13,87	8	1,73		
Total	99	11				Total	104	14				Total	34	14			
Sitio 2																	
30 días						60 días						90 días					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	48,08	5	9,62	2	0,2115	Modelo.	67,7	6	11,29	3,32	0,0603	Modelo.	123,5	6	20,6	2,34	0,1317
Tratamiento	44,92	3	14,97	3,12	0,1097	Tratamiento	43,6	4	10,9	3,21	0,0754	Tratamiento	53,73	4	13,4	1,53	0,2818
Bloque	3,17	2	1,58	0,33	0,7315	Bloque	24,1	2	12,07	3,55	0,0788	Bloque	69,73	2	34,9	3,97	0,0635
Error	28,83	6	4,81			Error	27,2	8	3,4			Error	70,27	8	8,78		
Total	76,92	11				Total	94,9	14				Total	193,7	14			
Sitio 3																	
30 días						60 días						90 días					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	5,58	5	1,12	1,26	0,3891	Modelo.	57,1	6	9,51	2,55	0,1105	Modelo.	32,8	6	5,47	3,09	0,0714
Tratamiento	0,92	3	0,31	0,34	0,7952	Tratamiento	14,9	4	3,73	1	0,4609	Tratamiento	32,27	4	8,07	4,57	0,0326
Bloque	4,67	2	2,33	2,63	0,1517	Bloque	42,1	2	21,07	5,64	0,0296	Bloque	0,53	2	0,27	0,15	0,8623
Error	5,33	6	0,89			Error	29,9	8	3,73			Error	14,13	8	1,77		
Total	10,92	11				Total	86,9	14				Total	46,93	14			
Sitio 4																	
30 días						60 días						90 días					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	5,58	5	1,12	1,26	0,3891	Modelo.	57,1	6	9,51	2,55	0,1105	Modelo.	32,8	6	5,47	3,09	0,0714
Tratamiento	0,92	3	0,31	0,34	0,7952	Tratamiento	14,9	4	3,73	1	0,4609	Tratamiento	32,27	4	8,07	4,57	0,0326
Bloque	4,67	2	2,33	2,63	0,1517	Bloque	42,1	2	21,07	5,64	0,0296	Bloque	0,53	2	0,27	0,15	0,8623
Error	5,33	6	0,89			Error	29,9	8	3,73			Error	14,13	8	1,77		
Total	10,92	11				Total	86,9	14				Total	46,93	14			
Sitio 5																	
30 días						60 días						90 días					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	46,46	5	9,29	1,63	0,3017	Modelo.	7,73	6	1,29	0,4	0,862	Modelo.	25,6	6	4,27	0,45	0,828
Tratamiento	28,24	3	9,41	1,65	0,2901	Tratamiento	4,4	4	1,1	0,34	0,8448	Tratamiento	7,07	4	1,77	0,19	0,9394
Bloque	18,22	2	9,11	1,6	0,2901	Bloque	3,33	2	1,67	0,51	0,6172	Bloque	18,53	2	9,27	0,97	0,4183
Error	28,44	5	5,69			Error	26	8	3,25			Error	76,13	8	9,52		
Total	74,91	10				Total	33,7	14				Total	101,7	14			
Sitio 6																	
30 días						60 días						90 días					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	84,08	5	16,82	3,58	0,0759	Modelo.	273	6	45,49	0,95	0,5133	Modelo.	288,4	6	48,1	2,12	0,1602
Tratamiento	5,58	3	1,86	0,4	0,7606	Tratamiento	170	4	42,6	0,89	0,514	Tratamiento	219,6	4	54,9	2,42	0,1333
Bloque	78,5	2	39,25	8,36	0,0184	Bloque	103	2	51,27	1,07	0,3887	Bloque	68,8	2	34,4	1,52	0,276
Error	28,17	6	4,69			Error	385	8	48,1			Error	181,2	8	22,7		
Total	112,3	11				Total	658	14				Total	469,6	14			
Sitio 7																	
30 días						60 días						90 días					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	137,6	5	27,52	1,86	0,2354	Modelo.	43,2	6	7,21	1,32	0,4424	Modelo.	101,8	6	17	8,08	0,1142
Tratamiento	15,58	3	5,19	0,35	0,7901	Tratamiento	37,9	4	9,48	1,74	0,3388	Tratamiento	11,5	4	2,88	1,37	0,4635
Bloque	122	2	61	4,13	0,0746	Bloque	5,3	2	2,65	0,49	0,6563	Bloque	90,3	2	45,2	21,5	0,0444
Error	88,67	6	14,78			Error	16,4	3	5,45			Error	4,2	2	2,1		
Total	226,3	11				Total	59,6	9				Total	106	8			

Sitio 9																	
30 días						60 días						90 días					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	230,1	5	46,02	1,78	0,2504	Modelo.	203	5	40,55	1,93	0,2236	Modelo.	292,3	5	58,5	1,18	0,4174
Tratamiento	228,9	3	76,31	2,96	0,1198	Tratamiento	152	3	50,53	2,4	0,1661	Tratamiento	230,3	3	76,8	1,55	0,297
Bloque	1,17	2	0,58	0,02	0,9777	Bloque	51,2	2	25,58	1,22	0,3601	Bloque	62	2	31	0,62	0,5672
Error	154,8	6	25,81			Error	126	6	21,03			Error	298	6	49,7		
Total	384,9	11				Total	329	11				Total	590,3	11			
Sitio 10																	
30 días						60 días						90 días					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	74,91	5	14,98	3,51	0,1239	Modelo.	68,4	5	13,68	1	0,5004	Modelo.	23,91	5	4,78	0,78	0,6063
Tratamiento	7,5	3	2,5	0,59	0,6559	Tratamiento	65,6	3	21,86	1,6	0,3018	Tratamiento	1,56	3	0,52	0,08	0,9656
Bloque	67,41	2	33,71	7,89	0,0409	Bloque	2,85	2	1,42	0,1	0,9032	Bloque	22,35	2	11,2	1,81	0,2558
Error	17,09	4	4,27			Error	68,5	5	13,7			Error	30,82	5	6,16		
Total	92	9				Total	137	10				Total	54,73	10			
Sitio 11																	
30 días						60 días						90 días					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	78,42	5	15,68	0,69	0,65	Modelo.	152	5	30,33	0,82	0,6311	Modelo.	180,2	5	36	0,79	0,5928
Tratamiento	50,25	3	16,75	0,74	0,5676	Tratamiento	35,3	3	11,78	0,32	0,8171	Tratamiento	25	3	8,33	0,18	0,9043
Bloque	28,17	2	14,08	0,62	0,5696	Bloque	116	2	58,17	1,57	0,3899	Bloque	155,2	2	77,6	1,7	0,2597
Error	136,5	6	22,75			Error	74,3	2	37,17			Error	273,5	6	45,6		
Total	214,9	11				Total	226	7				Total	453,7	11			
Sitio 12																	
30 días						60 días						90 días					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	105,2	5	21,04	0,34	0,8621	Modelo.	227	5	45,43	0,71	0,6364	Modelo.	121,4	5	24,3	1,09	0,4506
Tratamiento	8,22	3	2,74	0,04	0,9854	Tratamiento	159	3	53	0,83	0,5234	Tratamiento	108,3	3	36,1	1,62	0,2808
Bloque	97	2	48,5	0,78	0,5323	Bloque	68,2	2	34,08	0,53	0,6114	Bloque	13,17	2	6,58	0,3	0,7541
Error	185,7	3	61,89			Error	383	6	63,75			Error	133,5	6	22,3		
Total	290,9	8				Total	610	11				Total	254,9	11			
Sitio 13																	
30 días						60 días						90 días					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1650	6	275	1,27	0,3885	Modelo.	124	6	20,69	0,13	0,9872	Modelo.	817,1	6	136	1,19	0,4188
Tratamiento	452,1	4	113	0,52	0,7238	Tratamiento	81,7	4	20,42	0,12	0,9673	Tratamiento	603,9	4	151	1,32	0,3618
Bloque	1198	2	599,1	2,77	0,1404	Bloque	42,5	2	21,25	0,13	0,8813	Bloque	213,2	2	107	0,93	0,4441
Error	1297	6	216,1			Error	820	5	163,9			Error	686,2	6	114		
Total	2947	12				Total	944	11				Total	1503	12			
Sitio 14																	
30 días						60 días						90 días					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	55,6	6	9,27	0,26	0,9415	Modelo.	200	6	33,36	4,78	0,0392	Modelo.	205,9	6	34,3	1,6	0,2636
Tratamiento	41,07	4	10,27	0,29	0,8784	Tratamiento	142	4	35,5	5,09	0,0391	Tratamiento	43,73	4	10,9	0,51	0,7314
Bloque	14,53	2	7,27	0,2	0,8202	Bloque	58,2	2	29,08	4,17	0,0732	Bloque	162,1	2	81,1	3,77	0,0701
Error	286,1	8	35,77			Error	41,8	6	6,97			Error	171,9	8	21,5		
Total	341,7	14				Total	242	12				Total	377,7	14			