

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

RESPUESTA DE TRIGO A POTASIO EN CHACRAS CON MÁS DE 10 AÑOS
DE AGRICULTURA CONTINUA SIN LABOREO

por

Diego CHARBONNIER BASCOU
Emilio LAPAZ EUGUI

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2016

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Ing. Agr. Javier Coitiño

Ing. Agr. Mónica Barbazán

Fecha: 20 de diciembre de 2016

Autores:

Diego Charbonnier Bascou

Emilio Lapaz Eugui

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestros familiares y amigos por el apoyo en el transcurso de toda la carrera profesional.

Al profesor Oswaldo Ernst por la dirección de este trabajo.

Al encargado de los establecimientos “La Choza” y “María Haydée” por dejarnos realizar este ensayo y aportar información.

A Ramiro Izaguirre por su colaboración en el trabajo de campo.

A Martín Quinke, Sergio Pieroni y personal de INIA La Estanzuela por ayudarnos a trillar las muestras de trigo.

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>	3
2.1 <u>POTASIO EN EL CULTIVO DE TRIGO</u>	3
2.2 <u>OFERTA DE K</u>	3
2.2.1 <u>Formas de K en el suelo</u>	3
2.2.2 <u>Textura y mineralogía</u>	4
2.2.3 <u>Nivel crítico en suelo y respuesta al agregado</u> <u>de fuentes con K</u>	5
2.2.4 <u>Niveles críticos de K en planta</u>	6
2.2.5 <u>Concentración relativa de cationes intercambiables</u>	7
2.2.6 <u>Eficiencia de utilización</u>	8
2.3 <u>LIMITANTES EN LA ABSORCIÓN DE K</u>	10
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	15
3.1 <u>CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ENSAYO</u>	15
3.1.1 <u>Descripción del sitio experimental</u>	15
3.1.2 <u>Diseño experimental y tratamientos</u>	16
3.1.3 <u>Manejo del cultivo</u>	16
3.1.3.1 <u>Chacra “La Choza”</u>	16
3.1.3.2 <u>Chacra “María Haydée”</u>	17
3.2 <u>DETERMINACIONES</u>	18
3.2.1 <u>Datos climáticos</u>	18
3.2.2 <u>Presiembra</u>	18
3.2.2.1 <u>Análisis de nutrientes</u>	18
3.2.2.2 <u>Prueba de infiltración</u>	19
3.2.2.3 <u>Resistencia a la penetración</u>	19
3.2.2.4 <u>Conductividad eléctrica</u>	19
3.2.3 <u>En cultivo</u>	19
3.2.3.1 <u>Estadio fenológico</u>	19
3.2.3.2 <u>Implantación</u>	19
3.2.3.3 <u>Producción de biomasa</u>	20
3.2.3.4 <u>Absorción de K</u>	20
3.2.3.5 <u>Componentes del rendimiento</u>	20
3.3 <u>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</u>	20

4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	22
4.1 <u>CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA</u>	22
4.2 <u>DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SITIOS</u>	24
4.2.1 <u>Análisis de suelo</u>	24
4.2.2 <u>Resistencia a la penetración</u>	25
4.2.3 <u>Conductividad eléctrica</u>	26
4.2.4 <u>Infiltración</u>	26
4.3 <u>CONCENTRACIÓN Y ABSORCIÓN DE NUTRIENTES</u>	27
4.3.1 <u>Comparación entre sitios</u>	27
4.3.2 <u>Comparación entre tratamientos, Sitios 1 y 3</u>	28
4.3.2.1 <u>Concentración y absorción de K</u>	28
4.3.2.2 <u>Concentración y absorción de N</u>	29
4.3.3 <u>Comparación entre tratamientos, Sitio 2</u>	30
4.4 <u>RENDIMIENTO, COMPONENTES DEL RENDIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE BIOMASA</u>	30
4.4.1 <u>Comparación entre sitios</u>	30
4.4.2 <u>Comparación entre tratamientos, Sitios 1 y 3</u>	31
4.4.3 <u>Comparación entre tratamientos, Sitio 2</u>	32
4.5 <u>RENDIMIENTO EN GRANO EN FUNCIÓN DEL ESTADO NUTRICIONAL DEL CULTIVO</u>	33
4.5.1 <u>Potasio</u>	33
4.5.2 <u>Nitrógeno</u>	35
4.6 <u>RENDIMIENTO EN GRANO EN FUNCIÓN DE SUS COMPONENTES</u>	37
5. <u>CONCLUSIONES</u>	39
6. <u>RESUMEN</u>	40
7. <u>SUMMARY</u>	41
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	42
9. <u>ANEXOS</u>	50

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Descripción de los grupos de suelo CONEAT.....	15
2. Descripción de los tratamientos.....	16
3. Resumen del manejo agronómico, chacra “La Choza”.....	17
4. Resumen del manejo agronómico chacra “María Haydée”.....	18
5. Propiedades químicas de los suelos en estudio: K intercambiable (K int), carbono orgánico del suelo (COS), P disponible (P Bray 1) y potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) según sitio y profundidad.....	24
6. Conductividad eléctrica del suelo según sitio y profundidad.....	26
7. Tiempo requerido (min) para infiltrar 450 mL de agua según sitio.....	26
8. Concentración y absorción de K y N según sitio.....	27
9. Concentración y absorción de K según tratamiento (sitios 1 y 3).....	28
10. Concentración y absorción de N según tratamiento (sitios 1 y 3).....	29
11. Concentración y absorción de K y N según tratamiento (sitio 2).....	30
12. Rendimiento en grano, componentes del rendimiento y variables de producción, según sitio.....	31
13. Rendimiento en grano, componentes del rendimiento y variables de producción, según tratamiento (sitios 1 y 3).....	31
14. Rendimiento en grano, componentes del rendimiento y variables de producción, según tratamiento (sitio 2).....	32

Figura No.

1. Temperaturas medias mensuales del período mayo-noviembre de 2015 y serie histórica 1961-1990 en estación meteorológica Mercedes.....	22
2. Precipitación mensual del período mayo-noviembre de 2015 y serie histórica 1961-1990 en estación meteorológica Mercedes.....	23
3. Resistencia a la penetración según sitio y profundidad.....	25
4. Rendimiento en función del % K en planta en Z32.....	33
5. Rendimiento en función del % K en planta en Z65.....	33
6. Rendimiento en función del K absorbido a floración (Z65).....	33
7. Rendimiento en función del % K en HB Z65.....	33
8. Rendimiento en función del % N en planta en Z32.....	35
9. Rendimiento en función del % N en planta en Z65.....	35
10. Rendimiento en función del N absorbido a floración (Z65).....	36
11. Rendimiento en grano en función de las espigas/m ² (a), granos/espiga (b) y PMG (c).....	37

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas agrícolas del Uruguay se han intensificado en los últimos años, provocando que factores determinantes del rendimiento comiencen a limitar la producción. Un ejemplo de esto sería el potasio (K), macronutriente principal que no representaba una limitante para los cultivos en general, pero que en la actualidad se han observado deficiencias (Núñez, 2010).

Los cultivos de invierno, en especial los cereales, forman parte de las rotaciones agrícolas tradicionales del Uruguay. El trigo es el que ocupa la mayor superficie, seguido por la cebada, ambos bajo el sistema de siembra directa. El K es uno de los 4 macronutrientes junto con el nitrógeno (N). El N suele ser una de las limitantes más importantes para estos cultivos, mientras que el K no lo es. Esto se debe a los altos niveles de K intercambiable de la mayoría de los suelos en donde se desarrollan los cultivos, producto de un material madre rico en K (García et al., 2009).

Los suelos del Uruguay difieren en la capacidad de aporte de K, explicado principalmente por el contenido y el tipo de arcilla. A su vez, la variabilidad de los suelos se refleja en la capacidad de mantener en el tiempo las concentraciones de K en solución, y en la respuesta a la fertilización (Hernández et al., citados por Núñez, 2010).

Las decisiones de fertilización con K en cultivos extensivos de Uruguay se han basado en tomar como niveles críticos de K intercambiable el rango de 0,20-0,25 meq de K/100 g de suelo (o cmol kg^{-1}) para suelos de texturas medias y de 0,35 meq/100 g para suelos de texturas más pesadas, usando el método de extracción con acetato de amonio 1 M (Hernández, 1997). Antiguamente no se recomendaba la fertilización con valores por encima de 0,30 meq/100 g (Oudri et al., 1976).

Sin embargo, productores y técnicos han observado que el valor de análisis de K intercambiable no siempre tiene relación con la respuesta al agregado de dicho nutriente, sugiriendo que el nivel crítico podría ser mayor a 0,30 meq/100 g de suelo. La tecnología de producción que tuvo mayor impacto en los últimos años probablemente sea la siembra directa. Dicha tecnología altera el medio en el que crecen las raíces, pudiendo comprometer la absorción de K a través de un cambio en la condición física del suelo (García et al., 2009).

La absorción de K no solo depende de la oferta, sino también de cuán accesible se encuentre en el perfil del suelo. En muchos casos, el nivel de K intercambiable es suficiente, pero la exploración radicular se ve comprometida

por la compactación del perfil o de algún horizonte en particular. Esto explicaría en parte, el porqué en suelos con concentraciones de K intercambiable muy por encima de los niveles críticos, se observa respuesta en rendimiento al agregado de dicho nutriente (Arvidsson, 1999).

La capacidad de reserva de K en los suelos puede estar siendo alterada por la siembra de cultivos de mayor potencial, sumado a la intensificación de la agricultura que viene experimentando el país, con una producción de 1,32 cultivos por superficie y por año (MGAP. DIEA, 2015). Esta situación podría llevar a un planteo diferente en relación a las estrategias de fertilización potásica. En un sistema en equilibrio, el K en solución es repuesto rápidamente por el K intercambiable una vez que es extraído por las plantas. Este pool denominado K disponible, es repuesto a su vez, por el K no intercambiable o fijado, pero a una velocidad menor. Se desconoce el impacto de la continua extracción en los sistemas agrícolas del país sobre los equilibrios antes mencionados, teniendo presente la cantidad de cultivos por año y el escaso aporte de K al sistema (Barbazán et al., 2011).

Por lo tanto, se plantea como hipótesis de que en chacras manejadas en agricultura continua, con uso intensivo del suelo, existe respuesta a la fertilización potásica aun con valores de K intercambiable superiores al valor crítico de referencia actual.

Los objetivos son: a) cuantificar la respuesta a la fertilización con K en trigo sembrado en chacras con historia agrícola en siembra directa, sin historia de fertilización con K y en valores de K int. próximos al valor de referencia; b) cuantificar la absorción y concentración de K en planta en distintas fases del desarrollo y compararla con valores críticos de referencia; c) relacionar las posibles variaciones de rendimiento con la absorción y concentración de nutrientes en planta a distintos estadios fenológicos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 POTASIO EN EL CULTIVO DE TRIGO

El K es un macronutriente esencial, utilizado en cantidades elevadas por las plantas para su correcto funcionamiento (Kant y Kafkafi, 2000). Es el segundo en cantidad absorbida, luego del N. Por lo general se encuentra en abundancia en los suelos, aunque las fracciones disponibles para las plantas son una pequeña parte del total (Casanova, 1996).

La difusión a través de la solución del suelo representa el principal mecanismo de suministro de K a la interfaz suelo-raíz (Barber, citado por Uribe y Cox, 1988).

Una de las funciones del K dentro de la planta, es el mantenimiento de la condición hídrica, necesaria para los distintos procesos vegetales (Hirzel, citado por Coitiño y Mazzoni, 2011).

En el cultivo de trigo, la máxima absorción del nutriente se da entorno a antesis. El 26 % de ese máximo se encuentra en la espiga al final del ciclo del cultivo. Por otro lado, gran parte del K restante dentro de la planta es liberado hacia el suelo, luego de la etapa de floración (González y Xavier 2000, Kant y Kafkafi 2000).

Se requieren 19 kg de K para producir una tonelada de grano de trigo, con un índice de cosecha de 0,17 (García, citado por Coitiño y Mazzoni, 2011).

2.2 OFERTA DE K

2.2.1 Formas de K en el suelo

El K del suelo se puede dividir en cuatro grupos: K mineral, K no intercambiable o fijado, K intercambiable y K en solución. El K mineral es el que se encuentra en mayor proporción, entre 90 % y 98 % del total de K en el suelo. Se encuentra en estructuras de minerales primarios como feldspatos y micas, y no está disponible para las plantas en un ciclo de crecimiento. El K no intercambiable oscila entre 1 % y 10 % del K total, y se encuentra en la intercapa de minerales secundarios, en arcillas tipo micas. Es una forma de K lentamente disponible. En cambio, el K intercambiable es retenido electrostáticamente y al igual que el K en solución (como ion K^+), forma parte del K disponible. Existe un rápido equilibrio entre estos últimos dos grupos (Havlin et al., 2005).

Darunsontaya et al. (2012), identificaron al K intercambiable como predictivo de la disponibilidad de K para los cultivos (trabajos realizados en invernadero). En condiciones de campo las raíces de las plantas pueden absorber un volumen mucho mayor de suelo y puede ocurrir el reciclado de K de follaje.

Desde hace tiempo se ha reconocido que el K no intercambiable (por NH_4^+) puede desempeñar un papel en la nutrición potásica de las plantas. A pesar de ello, la influencia de las raíces de las plantas en la movilización y las condiciones necesarias para la liberación de esta fracción no es muy bien conocida (Schachtschabel, 1937). Estudios de desorción de Claassen y Jungk (1982) destacaron la capacidad de las raíces de las plantas para agotar su entorno a concentraciones muy bajas, por tanto, parece ser esencial para la liberación de K no intercambiable.

En este sentido, Kuchenbuch y Jungk (1984) trabajando con plántulas de colza, concluyeron que éstas agotan el K soluble en HCl en un grado mucho más alto que la fracción de K intercambiable en NH_4^+ , pero sólo dentro de una distancia de 2 mm de la superficie de la raíz. Por consiguiente, las plantas extraen una cantidad considerable de K del K no intercambiable del suelo, dentro de los primeros 7 días de crecimiento. Si se asume una densidad de raíces de 4 cm/cm³ aproximadamente el 50 % del volumen total del suelo contribuye K a las plantas a partir de esta fracción.

2.2.2 Textura y mineralogía

La disponibilidad de K, entre otros factores, depende de la textura del suelo. El contenido de arcilla tiene una fuerte influencia en la absorción del nutriente por parte de las plantas. Trabajos realizados por Jungk y Claassen (1986), demostraron que en la superficie de la raíz el 66 % del K aplicado fue liberado por el suelo arenoso, mientras que sólo el 20 % por el franco limoso. Además, la extensión máxima de la zona de empobrecimiento fue de 2 mm en el suelo más pesado, pero alrededor de 4 mm en el suelo de textura más liviana. La zona de empobrecimiento de K se extiende a una distancia mayor de la raíz comparado con el fósforo después de períodos de tiempo similares. La movilidad de K es por lo tanto mayor que para fósforo (P) (Jungk y Claassen, 1986).

Jungk y Claassen (1986) observaron que la concentración de K de la solución en equilibrio fue mucho mayor en texturas livianas que en los suelos más pesados. Por tanto, la raíz podría sostener una absorción superior por unidad de longitud de la raíz en un suelo arenoso.

Hernández et al. (1988) encontraron que la capacidad de suministro de K en el corto o mediano plazo presentó diferencias importantes entre los distintos suelos del Uruguay. La variabilidad se refleja en la capacidad de aporte de K, así como también en la capacidad de mantenerlo en el tiempo y en la respuesta a la fertilización. Dicha variabilidad resulta del tipo de material generador, que incide a través de el contenido y tipo de arcilla presente. Estos mismos autores, en un estudio macetero, encontraron que el contenido y el tipo de arcilla presente estaban altamente correlacionados con la capacidad de suministro de K del suelo.

En general, a mayor contenido de arcilla, los suelos presentan mayor capacidad de intercambio catiónico (CIC). Sin embargo, esta mayor CIC no siempre implica que habrá una mayor cantidad de K, sino que va a depender del tipo de arcilla (Hernández et al., 1988).

Comúnmente, los suelos que son ricos en vermiculita y micas pueden tener grandes cantidades de K no intercambiable, mientras que los suelos que contienen mucha caolinita, cuarzo y otros minerales silíceos contienen menos K intercambiable (Martin y Sparks, 1985).

Por último, el contenido de K de un suelo no sólo depende de su riqueza natural en K, sino también de la historia de uso de cada suelo (Núñez, 2010).

2.2.3 Nivel crítico en suelo y respuesta al agregado de fuentes con K

El valor sugerido por Barbazán et al. (2011) para cultivos de trigo, cebada, girasol, maíz y soja fue de 0,34 meq/100 g de K intercambiable. Cabe destacar que existieron sitios donde hubo respuesta con valores mayores de K int., y sitios sin respuesta con valores menores de K int. Este trabajo incluyó la información de estudios realizados previamente, como los de Cano et al. (2007), Bautés et al. (2009), siendo la mayoría bajo siembra directa.

Bautés et al. (2010) observaron diferencias significativas agregando 240 kg de K_2O vs 120 kg K_2O en una soja de segunda cuyo análisis de suelo a la siembra presentaba 0,32 meq/100g de K int. Sin embargo, es un valor de K int muy cercano al crítico. Algo similar ocurrió en un maíz de primera, donde hubo respuesta hasta 120 kg de K_2O en un suelo cuyo valor de K int era 0,33 meq/100g.

Cano et al. (2007) encontraron en maíz respuesta al agregado de KCl en Argisoles de Unidad Constitución, con niveles bajos de K intercambiable, entre 0,10 y 0,20 meq/100g. Almada (2006) trabajando con el mismo cultivo en

tres suelos de Durazno, no encontró efecto del K sobre el rendimiento con niveles de K intercambiable de 0,26 y 0,51 meq/100g.

Morón y Baethgen (1996) realizando ensayos con maíz silero, encontraron contenidos de K en planta deficientes sobre suelos con niveles medios a altos de K (0,60 y 0,44 meq/100g). Dicho trabajo formó parte de un relevamiento de chacras en establecimientos de producción lechera. De acuerdo con los autores, podría haber un efecto de la competencia de otros nutrientes (principalmente magnesio) en la absorción vegetal; aunque no descartan la posibilidad de que sea necesaria una revisión de los niveles críticos utilizados.

García et al. (2009) trabajado con trigo sobre suelos de texturas franco arenosas a arenosas, mencionaron que se han apreciado situaciones de respuesta con valores de K intercambiable de 0,32 a 0,44 meq/100g, prácticamente por encima del valor crítico.

Analizando los componentes del rendimiento implicados en la respuesta al agregado de K, Bautés et al. (2010) trabajando con cebada, encontraron incrementos en el número de tallos, y además en términos de calidad, el porcentaje de 1^a. y 2^a. tuvo incrementos significativos.

El incremento de rendimiento en ensayos realizados en China con trigos invernales, fue explicado por el aumento del número de espigas por hectárea, número de granos por espiga y peso de 1000 granos. En promedio, la fertilización potásica incrementó significativamente los tres componentes de rendimiento (Niu et al., 2013).

2.2.4 Niveles críticos de K en planta

Bennett (1993) ubicó el nivel crítico en 1 % K en planta y mencionó un rango de suficiencia que va entre 1 % y 5 %. Cabe destacar que no aclara de que cultivo se trata ni su estado fenológico, por lo tanto es un valor orientativo.

Correndo y García (2012) especificaron los rangos de suficiencia para el cultivo de trigo en dos etapas distintas. Entre emergencia-macollaje el valor se situó entre 2,5 % y 5,0 % K en planta; mientras que entre encañazón-floración se encontró entre 1,5 % y 3,0 %.

Bautés et al. (2009) trabajando con un cultivo de maíz, encontraron plantas con síntomas de deficiencia cuya concentración era de 5 g kg⁻¹ (0,5 %) de K en planta, y plantas normales con 10 g kg⁻¹ (1,0 %).

En otro cultivo, en este caso la soja, la fertilización potásica afectó ($P < 0.05$) el contenido de K en la hoja al estadio R2, con valores promedio entre 0,73 % y 1,69 % de K. Sin embargo no se observaron diferencias en el rendimiento (Bautes et al., 2009).

2.2.5 Concentración relativa de cationes intercambiables

En los primeros intentos de evaluar la disponibilidad de K en el suelo se sugirió que debería existir una proporción ideal entre K y los otros cationes (Bear et al., Bear y Toth, citados por Uribe y Cox, 1988).

Según Tisdale et al., citados por Bautes et al. (2009), la disponibilidad de K para las plantas está relacionada con la concentración relativa de cationes como Ca y Mg en el complejo de intercambio catiónico. En trabajos realizados en el siglo pasado, Bower y Pierre (1944) encontraron respuesta al agregado de K en suelos calcáreos con niveles óptimos de K intercambiable.

Bautes et al. (2009) en un suelo con $0,37 \text{ cmol kg}^{-1}$ de K intercambiable, encontraron respuesta al agregado del nutriente y si bien el suelo presentó valores de K mayores al rango tentativo, la relación de Mg/K fue de 7 y la relación Ca/K fue la más alta (cercana a 55). Además el suelo presentaba una baja cantidad relativa de bases totales (Ca, Mg, K y Na) con una saturación de K del 2 % de la suma de esas bases.

Según Fontanetto et al. (2011) los umbrales críticos de relaciones entre cationes intercambiables son:

Ca/K= 13:1

Ca/Mg= 3-15:1

Ca+Mg/K= 7-11:1

Exceso de Ca, Mg o Na, en relación desbalanceada con el K, pueden determinar déficit de K (Quintero, citado por Fontanetto et al., 2011).

Vitti, citado por Fontanetto et al. (2011) propone una relación ideal entre los cationes que es la siguiente:

K/Mg/Ca= 1:3:9 a 1:5:25

En suelos agrícolas donde el K intercambiable es menor que la suma de Ca + Mg, la capacidad buffer potencial tiene una relación lineal con la CIC (Evangelou y Karathanasis, citados por Uribe y Cox, 1988).

Suelos altos en materia orgánica presentan un menor poder buffer de K a cualquier nivel de CIC. Este comportamiento puede estar relacionado con la baja resistencia de la unión entre los iones K y la materia orgánica (Salmon, Evangelou et al., citados por Uribe y Cox, 1988).

Sin embargo según Mclean et al. (1983), este enfoque conocido como la relación de saturación de cationes básicos (BCSR), ha demostrado ser inapropiado porque no existe un BCSR ideal para todos los suelos.

2.2.6 Eficiencia de utilización

El término eficiencia comprende un amplio rango de conceptos vinculados a relaciones entre cantidades de salida por unidad de entrada de un recurso en particular (Tittonell et al., 2007). Monteith (1994) propuso que la eficiencia de uso de recursos como agua, radiación o nutrientes es resultado de: (i) la eficiencia de captura y (ii) la eficiencia de utilización en la producción de grano o biomasa.

Cassman et al. (1998) en sus trabajos plantean la definición de Factor de Productividad Parcial (FPP), en el cual relaciona la productividad lograda (Y) con la dosis de nutriente agregada (Nr), considerando además el aporte de nutriente nativo del suelo. Dicha ecuación sería la siguiente:

$$FPP = Y/Nr$$

El FPP se asocia con el concepto de eficiencia agronómica, el cual vincula la cantidad adicional de grano producido con una dosis dada de nutriente incorporado. Dentro de dicha eficiencia es posible identificar a su vez la eficiencia de captura y la eficiencia fisiológica o de conversión del nutriente.

Diversos estudios indican características del suelo que pueden influir en la capacidad de las plantas de absorber el K disponible, entre ellas se mencionan el contenido de agua, compactación, concentración de otros cationes, % de saturación en K de la CIC, textura del suelo y mineralogía de la fracción arcilla (Jungk y Claassen 1986, Uribe y Cox 1988, Seiffert et al. 1995, Lipiec y Stepniewski 1995, Qi y Spalding 2004, Darunsontaya et al. 2012). La mayoría de estos trabajos fueron realizados en condiciones muy controladas en macetas.

Sadras et al. (2005) plantearon que la eficiencia de captura de K, tanto nativo como vía fertilizante, depende de las características de cada suelo. Éstas inciden en la habilidad de los cultivos para explorar el suelo y en la capacidad

de absorber el K disponible. Sin embargo, la investigación en propiedades del suelo que afecten la eficiencia de uso de K, no es abundante.

Yadav (2003) en sistemas de rotación arroz-trigo, calculó eficiencia de uso agronómica de K que varió entre 4,9 y 22,4 kg grano/kg K aplicado y se correlacionó en forma negativa con contenido de N, P y K en suelo. Cabe destacar que los ensayos fueron realizados en distintas zonas de la India y con condiciones climáticas variables.

Niu et al. (2013) en un estudio donde evaluaron respuesta a K en trigo bajo distintas prácticas de producción en luvisoles háplicos, mostraron que el FPP de K disminuyó con el incremento de la dosis de este nutriente, y a su vez fue mayor bajo prácticas de producción de alto rendimiento en tres de los cuatro experimentos considerados.

Suelos que originalmente tenían niveles altos de K intercambiable, pueden llegar a tener una eficiencia de utilización de K agregado relativamente baja. Esto ocurre en suelos que han sufrido grandes extracciones del nutriente, generando como consecuencia, el agotamiento de las reservas de K (Hernández, citado por Barbazán et al., 2011). Al aplicar fertilizante, aumenta el K disponible pero el equilibrio lo mueve hacia partes no intercambiables, disminuyendo la eficiencia agronómica (Tan et al., 2012).

Cassman et al. (1989) indicaron que la eficiencia de absorción del K aplicado fue mayor en el tercer año respecto al primero. El experimento consistió en fertilizaciones anuales en cultivos de algodón sobre un suelo con vermiculita. El aumento en eficiencia se atribuyó a una saturación de los sitios de fijación con las aplicaciones en los años anteriores.

Todos los suelos no se comportan de igual forma al agregado de K. Sería necesario conocer al comportamiento de los distintos grupos de suelos, para poder estimar o prever qué eficiencia se puede lograr y si es factible o no la aplicación del fertilizante (Núñez, 2010).

Todo esto sugiere que puede que no sea agronómicamente o económicamente ventajoso aplicar fertilizantes potásicos basado solo en análisis de K en suelo, ya que estos pueden ser engañosos sobre el estado real del K disponible. Si la capacidad buffer y el K no intercambiable son altos, este último puede ser capaz de suministrar una parte del K a los cultivos durante un período prolongado de tiempo (Tan et al., 2012).

2.3 LIMITANTES EN LA ABSORCIÓN DE K

Numerosos estudios han demostrado que el suministro de nutrientes a una planta no sólo depende de la concentración de un elemento en la solución del suelo y su interacción con la fase sólida, sino también del crecimiento, la distribución y la forma de las raíces, así como en su capacidad fisiológica para movilizar y absorber los nutrientes, siendo el contenido de agua en el suelo un aspecto muy importante (Jungk y Claassen, 1986).

Kuchenbuch et al. (1986) han aplicado un modelo para investigar cómo el contenido de agua del suelo influye en el comportamiento del K en la rizósfera. Utilizando un suelo franco limoso, han demostrado que el contenido de agua influye fuertemente en el gradiente de concentración de K en la superficie de la raíz. Si el suelo está seco, un agotamiento rápido en la superficie de la raíz se prevé debido a la restringida difusión del K de las partes más remotas del suelo. Como resultado la absorción de K pronto se reduce. Por el contrario, un contenido de agua en el rango de capacidad de campo permite la difusión K para reponer en gran medida el K absorbido por las raíces. Por lo tanto, la concentración de K en la superficie de la raíz se mantiene a niveles suficientes para cumplir en mayor parte la máxima absorción.

El K llega a las raíces por flujo de masa y difusión (Mengel y Kirkby, 1982), este último mecanismo se torna más relevante cuando hay escasez de agua en el suelo y entonces el cultivo se hace más dependiente del desarrollo de su sistema radical para acceder al K. Por otro lado a medida que un suelo pierde agua su dureza es cada vez mayor (Mathers et al., 1966) y aumenta la resistencia a la penetración radical (Baver et al., 1972).

Las heterogeneidades espaciales en la distribución de K^+ encontradas por una raíz a menudo se superponen con las variaciones temporales en la disponibilidad de K^+ , causada por el cambio continuo en el contenido de humedad del suelo. En suelos secos, el contenido de K^+ es normalmente mayor, pero el flujo de masa y la difusión se encuentran restringidos (Seiffert et al., Vetterlein y Jahn, Kuchenbuch et al., citados por Ashley et al., 2006).

Los efectos negativos de la sequía sobre transporte de K^+ en el suelo tienden a ser más significativos que los aumentos de $[K^+]$ y por lo tanto estas condiciones ambientales conducen a la reducción de la disponibilidad de los nutrientes (Kuchenbuch et al., Seiffert et al., Liebersbach et al., citados por Ashley et al., 2006).

Además de la humedad del suelo, también influye indirectamente la aireación al afectar la disponibilidad de oxígeno a nivel radicular, y la temperatura del suelo que se relaciona en forma directa a la absorción (Tisdale et al., citados por Coitiño y Mazzoni, 2011).

García et al. (2009) sugieren que la falta de agua y las restricciones físicas de los suelos, fueron las causas de las respuestas a K en sitios con niveles relativamente altos de K intercambiable. A su vez, mencionan que ambos factores son interdependientes, en ausencia de restricciones físicas sería posible acceder a más agua y a más K en profundidad.

La conductividad eléctrica del suelo a igual contenido de agua, aumenta a medida que el contenido de arcilla se incrementa. Aquellos suelos con mayor porosidad o menor densidad aparente tienden a registrar valores más altos de conductividad eléctrica (Samouëlian et al., 2005). También aumenta si el contenido de sales disueltas (mayor salinidad y capacidad de intercambio catiónico) es mayor (Rhoades y Corwin, 1981).

Suelos manejados con siembra directa tienden a compactarse debido a al movimiento de maquinaria pesada, sumado a una mayor cantidad de operaciones a lo largo del año (fertilizaciones, siembra, pulverizaciones, cosecha, etc). Además el pastoreo animal en sistemas mixtos, puede contribuir a este proceso (García et al., 2009).

Lipiec y Stepniewski (1995) también concluyeron que la compactación del suelo resultante de los sistemas de tráfico o de labranza vehiculares, afecta la transformación de nutrientes y la absorción a través de los cambios en la hidráulica del suelo, la aireación, las propiedades de difusión, así como por su efecto sobre el crecimiento de raíces. El efecto de cada uno de estos factores depende del régimen hídrico del suelo. En la mayoría de los casos, la absorción de nutrientes del suelo se reduce en un suelo compactado. Bajo la compactación moderada, un aumento en la tasa de flujo de entrada de nutrientes por unidad de longitud o la superficie de las raíces alivia una reducción en la absorción total de nutrientes.

En sistemas conservacionistas (siembra directa) se han observado deficiencias en varios nutrientes (N, S y K), obteniéndose respuestas de forma más frecuente que bajo laboreo convencional. En estos casos se produce una estratificación de nutrientes inmóviles, provocando una acumulación de raíces en las capas superficiales, y como consecuencia, las plantas quedan más expuestas a condiciones de déficit hídrico (Bordoli, 2001). Se reconoció que los sistemas de labranza tenían un mayor efecto sobre el transporte de cationes en comparación con el de los aniones (Shipitalo y Edwards, 1993).

En comparación con la labranza convencional, la siembra directa se caracteriza por una mayor densidad aparente y una mayor proporción de macroporos conectados a la superficie (Lipiec y Stepniewski, 1995).

Se ha establecido una resistencia crítica de 2 MPa para la penetración radical sin tomar en cuenta la textura del suelo (Martino y Shaykewich, 1994). Aunque en ciertos casos se ha observado el crecimiento de raíces con el doble de ese valor (García et al., 2009). Dicho crecimiento ocurre a través de canales naturales (Zou et al., 2001).

Glinski y Lipiec, citados por Steinbach y Álvarez (2007), también han propuesto como umbral o valor crítico los 2000 kpa (2 MPa), por arriba del cual se vería impedido el desarrollo normal de las raíces.

En varios experimentos, Lipiec y Stepniewski (1995) encontraron que la concentración de K y la absorción general disminuyó con el aumento de la compactación.

La reducción en la absorción de K en un suelo compactado se atribuye principalmente a la disminución en el área de exploración de la raíces. Una mayor absorción de K por unidad de superficie de la raíz en un suelo compactado y sin la aplicación de K no fue suficiente para compensar la reducción de la concentración de K, debido al crecimiento restringido de las raíces de plántulas de soja (Hallmark y Barber, 1981).

En una misma línea, Wolkowski (1990) indica que donde la aireación del suelo se reduce significativamente, la absorción de K puede ser reducida si se reduce la respiración de las raíces.

Morón y Quincke (2010) realizaron experimentos en Soriano en donde se analizaron muestras de referencia (suelo imperturbado) y muestras de campo, con el fin de comparar el estado del suelo en cuanto a sus propiedades físicas, químicas y biológicas. La densidad aparente de los suelos de referencia fue menor (en promedio $1,11 \text{ g cm}^{-3}$) con respecto a los suelos bajo cultivo (en promedio $1,24 \text{ g cm}^{-3}$), lo cual resulta en un aumento de 12 % de densidad aparente en la chacra respecto a los suelos de referencia. La macroporosidad de los suelos de referencia fue mayor (en promedio 8,8 %) que en los suelos bajo cultivo (en promedio 6,3 %), lo cual resulta en una pérdida relativa de 29 % de macroporosidad. Ésta última, parece ser una propiedad con mayor sensibilidad para detectar cambios en la calidad física del suelo. En el proceso de pérdida de calidad física, aumenta el volumen de microporos y disminuye el volumen de macroporos, sin disminuir necesariamente la porosidad total. La

reducción en el número de macroporos es consecuencia directa de una menor estabilidad de agregados o menor diámetro.

En el mismo trabajo, los autores también observaron una disminución de los valores medios de potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) de chacras respecto a la media de referencia (suelo imperturbado), y que son notoriamente más elevadas que las observadas en C orgánico. Esto se observa tanto de 0-7,5 cm como de 7,5-15 cm. Los autores indican que el PMN es relativamente sensible a la hora de detectar diferencias (Morón y Quincke, 2010).

Morón y Quincke (2010) observaron que el pH también decreció en los primeros 15 cm del perfil. El proceso de acidificación de los suelos consiste en la pérdida de bases intercambiables y su sustitución por hidrógeno en el complejo de intercambio, provocando un aumento de la concentración de hidrógeno en la solución del suelo, disminuyendo el pH. La agricultura tiende a acidificar los suelos a lo largo de los años. Tan et al. (2012) sugieren que las posibles limitaciones en la captación de K por la raíz debido a los procesos de la rizósfera en relación con el poder buffer según el pH del suelo necesitan más aclaraciones. Para comprobar esta idea, la investigación sobre los procesos de la rizósfera deben ir acompañados de medidas de las tasas de absorción de nutrientes por las raíces en condiciones de campo.

La concentración de K intercambiable también disminuyó en los primeros 15 cm. Sin embargo, los valores medios no parecen estar por debajo de los valores críticos de referencia. Esta disminución del K intercambiable en el suelo no es acompañada por otras bases como calcio y magnesio (Morón y Quincke, 2010).

García et al. (2009) obtuvieron respuesta en rendimiento en un sitio experimental ($P < 0,01$) y se trató de un suelo con un nivel adecuado de K intercambiable (0,75 meq/100g) pero muy erosionado, lo que podría haber afectado el crecimiento radicular (Baver et al. 1972, Unger y Kaspar, citados por García et al. 2009) y el volumen de suelo explorado. Sin embargo, la concentración de K en los tejidos vegetales fue alta (3,3 %) pero condicionada a la escasa biomasa producida. Como el K reduce la eficiencia de uso de agua, los autores no determinaron cual fue la causa y cual el efecto, ya que la falta de agua limita la absorción de K. Concluyen que a pesar de un nivel de K intercambiable por encima del crítico, existió respuesta en rendimiento al agregado de KCl. Sugieren que no es suficiente el dato de K intercambiable, sino que se necesitan otras herramientas para predecir correctamente la disponibilidad del nutriente para los cultivos (García et al., 2009).

En un experimento con trigo de invierno en un suelo franco arenoso de textura ligera, que se encontraba compactado a 35 cm de profundidad, Barraclough y Weir (1988) observaron que la destrucción del piso de arado no tuvo ningún efecto sobre la concentración de K en el grano, pero sí en el aumento de la concentración del K en la paja.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ENSAYO

3.1.1 Descripción del sitio experimental

Los ensayos se realizaron en el invierno de 2015, en dos chacras comerciales del departamento de Soriano, Uruguay. Una chacra, llamada “La Choza” situada en el paraje Arroyo Corto (33°10'37.84"S, 57°51'53.41"O, 38 m de elevación) y la restante, “María Haydée”, ubicada en el paraje La Tabla (33°16'23.12"S, 57°45'11.48"O, 62 m de elevación). La primera se encuentra bajo un sistema de agricultura continua desde hace nueve años, mientras que la segunda lleva más de 12 años bajo un sistema similar.

Los ensayos se situaron sobre la Unidad de Suelos Bequeló según Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (MGAP. DIRENARE. DSA, 1993). Están ubicados sobre el grupo CONEAT 11.5 y 10.15 dependiendo del sitio.

Cuadro 1. Descripción de los grupos de suelo CONEAT

Grupo CONEAT	Unidad de suelos	Suelos dominantes	Suelos asociados
11.5	Bequeló	Brunosoles Éútricos Típicos, a veces Háplicos	Brunosoles Éútricos Típicos y en las concavidades, Planosoles Éútricos Melánicos
10.15	Bequeló	Brunosoles Subéútricos Típicos y Lúvicos; y Vertisoles Rúpticos Lúvicos	

Fuente: MGAP. PRENADER (2015).

“La Choza” comparte los dos grupos CONEAT: 11.5 (Sitio 1) y 10.15 (Sitio 2). En “María Haydée” el ensayo se ubicó sobre el grupo 10.15 (Sitio 3).

3.1.2 Diseño experimental y tratamientos

En total se realizaron tres ensayos (sitios). El Sitio 1 (“Ladera alta”) y 2 (“Ladera baja”) se encuentran en la chacra “La Choza”, mientras que el Sitio 3 se ubica en “María Haydée”. En cada ensayo se instalaron cuatro tratamientos, consistentes en un control sin agregado de K y los restantes, con distintas cantidades de fertilizante potásico (como KCl) según lo indica el Cuadro 2.

Cuadro 2. Descripción de los tratamientos

Tratamiento	K ₂ O (kg ha ⁻¹)
Testigo	0
60 K ₂ O	60
120 K ₂ O	120
180 K ₂ O	180

El diseño experimental usado fue un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA), de cuatro tratamientos y tres bloques (repeticiones). Los tratamientos se aplicaron a microparcels de 3,6 m de largo por 3,0 m de ancho.

El manejo de plagas, malezas y enfermedades se realizó siguiendo las mejores prácticas de manejo de modo que no tuvieran incidencia sobre el cultivo.

3.1.3 Manejo del cultivo

3.1.3.1 Chacra “La Choza”

Esta chacra se sembró con la variedad de trigo Baguette 11 el 18/5/15 con una sembradora a chorrillo, en siembra directa, a una distancia entre hileras de 0,19 m. Al mismo tiempo se fertilizó con dicha herramienta con 140 kg/ha de fosfato diamónico (18-46-0).

El cultivo antecesor fue una soja de primera variedad DM 6.8 trillada el 24/4/15, con un rendimiento promedio de 3500 kg/ha aproximadamente, cuyo rastrojo se encontraba en una cantidad importante al momento de la siembra del trigo, que dificultó esta labor.

En promedio se lograron 34 pl/m y 37 pl/m en el Sitio 1 (“Ladera Alta”) y 2 (“Ladera Baja”), respectivamente. Dicho conteo se realizó el 8/6/15 (estadio

Z20), encontrando plantas con distintos estadios, producto de la germinación algo desapareja por la falta de agua y la abundancia de rastrojo del cultivo anterior.

Cuadro 3. Resumen del manejo agronómico, chacra “La Choza”

Fecha	Estadio	Actividad
13/5	----	Pulverización: 1,7 kg/ha Gliserb G (glifosato) 150 cc/ha Banvel (dicamba)
18/5	----	Siembra: trigo Baguette 11 Fertilización: 140kg/ha (18-46-0)
4/6	Z12	Fertilización: 150 kg/ha (40-0-0+6S)
3/8	Z30	Fertilización: 90 kg/ha (7-40-0+5S) 70 kg/ha (40-0-0+5S)
22/8	Z33	Pulverización aérea: 400 cc/ha Bucaner (tebuconazol) 300 cc/ha Stigmar Xtra (azoxystrobin + cyproconazole) 600 cc/ha Axial (pinoxaden + cloquintocet-mexil) 13 gr/ha Finesse (clorsulfuron + metsulfuron) 500 cc/ha Eco-Óleo (aceite vegetal de soja) 100 cc/ha Adherex (coadyuvante)
29/9	Z65	Pulverización aérea: 150 cc/ha Advance (lufenuron) 350 cc/ha Pyrilan (clorpirifos) 1,5 L/ha Swing Plus (epoxiconazol + metconazol) 2,5 cc/ha Grap Super Gun (coadyuvante)
24/11	Z92	Cosecha manual

3.1.3.2 Chacra “María Haydée”

A diferencia de la chacra anterior, allí se sembró la variedad de trigo Fuste el 2/6/15. Dicha labor se llevó a cabo con la misma sembradora que los sitios anteriores. También se aplicaron con dicha sembradora 140 kg/ha de fosfato diamónico (18-46-0). El cultivo antecesor fue una soja de primera variedad DM 6262 IPRO trillada el 6/4/15. Se realizó un conteo el 1/7/15 (estadio Z12) obteniendo un promedio de 38 plantas implantadas por metro lineal.

Cuadro 4. Resumen del manejo agronómico chacra “María Haydée”

Fecha	Estadio	Actividad
27/5	----	Pulverización: 1,8 kg/ha Check Max (glifosato) 180 cc/ha Banvel (dicamba)
2/6	----	Siembra: trigo Fuste Fertilización: 140 kg/ha (18-46-0)
4/7	Z12	Fertilización: 150 kg/ha (40-0-0+5S)
30/8	Z31	Pulverización aérea: 13 gr/ha Finesse (clorsulfuron + metsulfuron) 600 cc/ha Axial (pinoxaden + cloquintocet-mexil) 500 cc/ha Eco-Óleo (aceite vegetal de soja) 300 cc/ha Stigmar Xtra (azoxystrobin + cyproconazole)
4/10	Z65	Pulverización aérea: 600 cc/ha Bucaner (tebuconazol) 500 cc/ha Carbendaflow (carbendazim) 150 cc/ha Advance (lufenuron) 800 cc/ha Pyrilan (clorpirifos) 2,5 cc/ha Grap Super Gun (coadyuvante)
25/11	Z92	Cosecha manual

3.2 DETERMINACIONES

3.2.1 Datos climáticos

Se obtuvieron datos climáticos a través de la Dirección Nacional de Meteorología, de la estación meteorológica más cercana a los ensayos, en este caso la ubicada en Mercedes, Soriano, correspondiente al período mayo-noviembre de 2015.

3.2.2 Presiembra

3.2.2.1 Análisis de nutrientes

En cada sitio se extrajo una muestra de suelos compuesta de 10 tomas (o sub-muestras), segmentando cada toma en tres estratos: de 0-7,5 cm; de 7,5-15 cm y de 15-30 cm. En cada muestra se determinó P por el método Bray

1, K intercambiable por el método de espectrofotometría de emisión y carbono orgánico del suelo (COS) por el método de Walkley-Black.

En la chacra “María Haydée” (Sitio 3) se extrajeron muestras de suelo para analizar el potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) antes de la siembra. En cambio en “La Choza” (Sitios 1 y 2) no se pudo hacer en ese momento ya que se encontraba con fertilizante nitrogenado y éste iba a alterar el resultado. Por dicho motivo se resolvió hacerlo antes de la fertilización nitrogenada en Z30, asegurándonos de que el N aplicado anteriormente (Z12) no influyera en el análisis.

3.2.2.2 Prueba de infiltración

Se realizaron tres pruebas de infiltración por sitio a la siembra utilizando el método de Wander y Bollero (1999).

3.2.2.3 Resistencia a la penetración

Esta medición se llevó a cabo con el penetrógrafo Rimik CP20, registrando valores cada 2 cm hasta una profundidad de 40 cm. Se realizaron 10 mediciones por sitio, que luego fueron promediadas.

3.2.2.4 Conductividad eléctrica

Se midió conductividad eléctrica (CE) del suelo in situ con el sensor Spectrum EC 110. Al igual que en la medición de la resistencia a la penetración, se realizaron 10 mediciones por sitio. Cada una consistió, a su vez, en una lectura a 7,5 cm, 15 cm y 30 cm. Luego se analizó la CE media de cada estrato para llevar a cabo la comparación.

3.2.3 En cultivo

3.2.3.1 Estadio fenológico

En cada determinación se estimó el estadio promedio del cultivo, mediante los criterios indicados en la Escala Zadoks.

3.2.3.2 Implantación

El conteo de plantas se realizó cuando el cultivo se encontraba en Z12-Z20 en “La Choza” el 8/6/15, mientras que en “María Haydée” se encontraba en Z12 el 1/7/15.

3.2.3.3 Producción de biomasa

Se evaluó la producción de biomasa en los estadios Z32, Z65 y Z92, de la parte aérea de muestras de plantas cortadas en 1, 2 y 15 m lineales, respectivamente.

3.2.3.4 Absorción de K

Las muestras de plantas se secaron en estufa a 60 °C durante 48 hs. Dichas muestras se molieron a un tamaño inferior a 2 mm y se determinó la concentración total de K por emisión de 0,50 g de una muestra calcinada durante 5 h a 550 °C (Isaac y Kerber, 1971). A la cosecha, se analizó la concentración de K en el rastrojo y en el grano para cada parcela. En las muestras correspondientes a Z65, se estimó el porcentaje de materia seca para obtener la cantidad de K absorbido hasta ese estadio, mientras que en el primer corte (Z32), se analizó solamente la concentración de K en planta.

Además, en Z65 se hizo un muestreo de hoja de bandera, cortando las láminas de los tallos principales de 20 plantas en igual estadio (al azar), para analizar K. Luego de cortarlas, se secaron en estufa de 60 °C durante 48 hs.

3.2.3.5 Componentes del rendimiento

Cuando el cultivo se encontraba listo para la cosecha (luego de alcanzada la madurez fisiológica) se cosecharon en forma manual 15 m lineales (2,85 m²), por parcela. Se contabilizó la totalidad de espigas de la muestra, para obtener el número de espigas/m². Dichas muestras fueron procesadas en una trilladora estacionaria.

Luego se determinó el rendimiento y sus componentes: número de espigas/m², granos por espiga y peso de mil granos (PMG), así como el índice de cosecha de la materia seca (%). Para el cálculo de PMG se pesaron tres sub muestras de 200 granos para obtener el promedio de cada parcela.

3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se rechazó la hipótesis de homogeneidad de varianza entre sitios para el rendimiento en grano, generándose un grupo compuesto por los Sitios 1 y 3 con varianzas homogéneas y el Sitio 2, debió analizarse de manera independiente.

El análisis para los Sitios 1 y 3 se realizó como serie de experimentos con un modelo de bloques completos al azar (DBCA).

$$Y_{ijk} = \mu + S + Sx\beta + TxS + T_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk}$$

En cambio, el modelo estadístico utilizado para el Sitio 2 fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk}$$

Y_{ijk} : rendimiento en grano (12 % humedad)

μ : media poblacional

S: sitio

T_i : tratamiento

β_j : bloque

$Sx\beta$: sitio x bloque (error "a")

TxS : tratamiento x sitio

ε_{ijk} : error

La separación de medias se realizó utilizando el test LSD Fisher, utilizando 0,05 como nivel de significancia. Para el efecto sitio (Sitios 1 y 3), se utilizó la interacción "sitio x bloque" como "error a".

Dado que no existió interacción significativa tratamiento x sitio para ninguna de las variables de respuesta analizadas, los resultados se presentan para el efecto sitio y para el efecto promedio de tratamientos dentro de sitios.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

En la Figura 1 se presentan las temperaturas medias mensuales, desde la siembra del cultivo hasta la cosecha. A su vez, se compara con los valores de temperatura para el período de referencia 1961-1990 (media histórica).

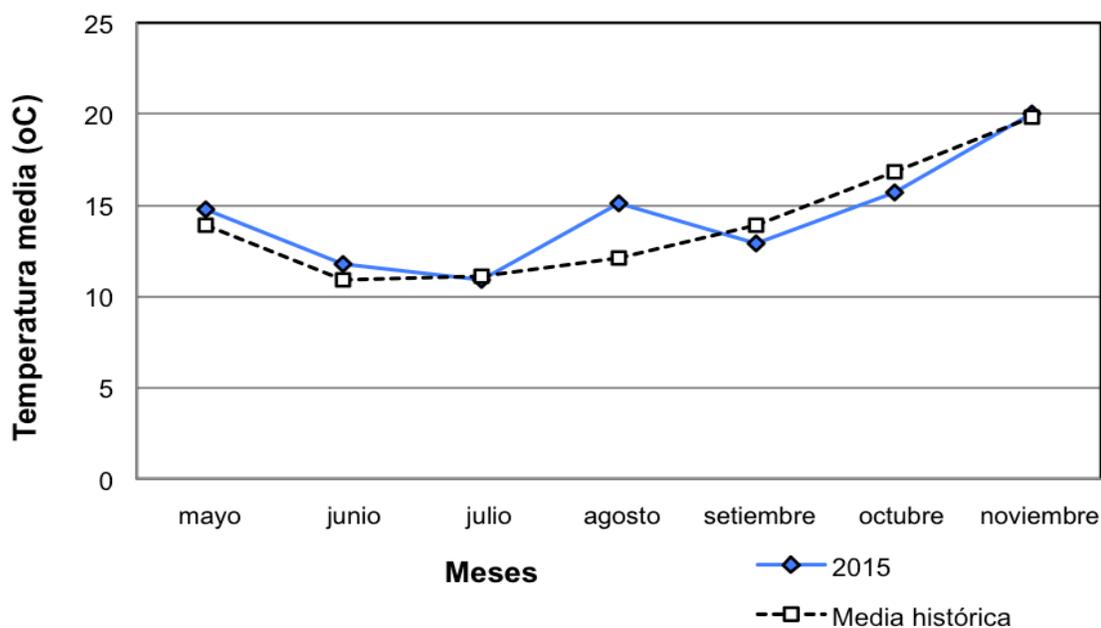


Figura 1. Temperaturas medias mensuales del período mayo-noviembre de 2015 y serie histórica 1961-1990 en estación meteorológica Mercedes

También se presenta para el mismo período, el régimen pluviométrico del año en estudio, comparado con la serie histórica 1961-1990 (Figura 2)

Los primeros dos meses, se caracterizaron por ser un poco más cálidos de lo normal (1 °C por encima), acompañado de escasas precipitaciones que se extendieron hasta el mes de julio. Dicho mes presentó una temperatura media similar a la histórica. El principal problema fue la escasez de precipitaciones, cumpliéndose tres meses sucesivos con registros muy por debajo de lo normal.

En el mes de agosto se revertió la situación hídrica, las precipitaciones fueron de 164 mm superando en 100 mm el registro histórico. Además, dichas precipitaciones estuvieron acompañadas con altas temperaturas, tres grados por encima de lo normal.

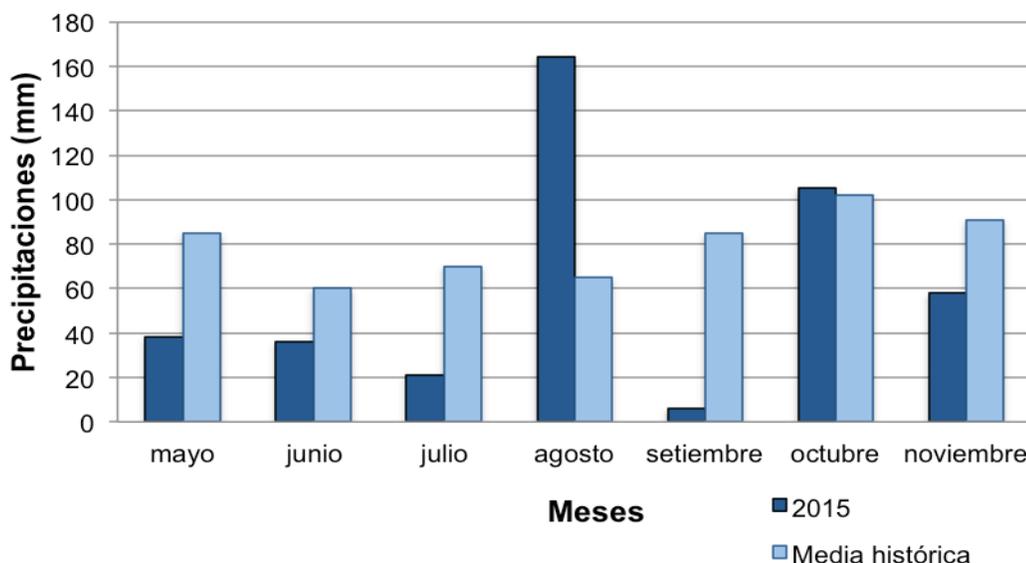


Figura 2. Precipitación mensual del período mayo-noviembre de 2015 y serie histórica 1961-1990 en estación meteorológica Mercedes

La primavera de 2015 presentó condiciones excelentes para los cultivos de invierno. Se registraron precipitaciones escasas en setiembre y noviembre sin llegar a ser limitantes (en octubre fueron normales), y el llenado de granos transcurrió en un ambiente fresco con elevada radiación solar.

Los ensayos no fueron sembrados en la misma fecha. En los Sitios 1 y 2 fue a mediados de mayo, mientras que en el Sitio 3 fue a principios de junio. Esto provocó que crecieran en condiciones diferentes, más o menos favorables dependiendo en qué estadio se encontraba el cultivo en ese momento. Los primeros sufrieron más el déficit hídrico al comienzo, afectando la implantación, y el macollaje casi en su totalidad. Si bien el Sitio 3 fue afectado por esta situación, el estrés tuvo una menor duración. El mes de agosto coincidió con la etapa de encañazon para los Sitios 1 y 2, mientras que en el Sitio 3 recién terminaba la etapa de macollaje. Ambos sitios se vieron perjudicados por las elevadas temperaturas y el exceso hídrico, aunque los cultivos fueron capaces de recuperarse más adelante por las condiciones ambientales ya descriptas.

Por último, la condiciones climáticas en la cosecha fueron muy buenas. Las precipitaciones fueron escasas permitiendo cosechar en tiempo y forma (en la mayoría de las situaciones) y evitar así, la pérdida de calidad de los granos.

4.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SITIOS

Todos los datos presentados en esta sección corresponden a cada ensayo (sitio). No existe información para cada parcela en particular, por lo tanto no es posible relacionar las características del suelo con la respuesta a la fertilización potásica, pero resultan útiles para interpretar y discutir los resultados.

4.2.1 Análisis de suelo

En el Cuadro 5 se presentan los resultados de K y P disponibles y COS para las tres profundidades de suelo.

Cuadro 5. Propiedades químicas de los suelos en estudio: K intercambiable (K int), carbono orgánico del suelo (COS), P disponible (P Bray 1) y potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) según sitio y profundidad

	PROFUNDIDAD (cm)	SITIO		
		1	2	3
K int (meq/100g)	0-7,5	0,54	0,46	0,41
	7,5-15	0,52	0,58	0,42
	15-30	0,41	0,55	0,49
COS (%)	0-7,5	3,46	3,30	3,95
	7,5-15	2,30	2,04	3,04
	15-30	1,84	1,68	2,72
P (ppm)	0-7,5	10	19	12
	7,5-15	6	5	7
	15-30	5	4	5
PMN (mg/kg N-NH ₄)	0-20	15	20	7

Los Sitios 1 y 2 presentaron valores similares y superiores al valor crítico de K intercambiable en los primeros 15 cm, mientras que en el Sitio 3, aun teniendo menor disponibilidad, también estuvo por encima del valor crítico. En la profundidad de 15 a 30 cm el K intercambiable fue levemente menor que en los estratos superiores en el Sitio 1, pero en los Sitios 2 y 3 fue mayor. Estas diferencias de K intercambiable entre los distintos estratos podrían sugerir que en el Sitio 1 ocurrió reciclaje de K, ya que se descarta historia de aplicación de dicho nutriente. En cambio, la menor disponibilidad en los primeros estratos se debería a extracciones de K por cultivos anteriores. Los tres sitios tienen valores altos de COS. En el Sitio 3 se encontró el mayor contenido en los tres estratos.

Los niveles de P en los tres sitios muestran una alta concentración en los primeros centímetros, algo muy frecuente en sistemas de siembra directa continua. La fertilización se llevó a cabo con el objetivo de que el P no fuera limitante en ninguno de los tres sitios. El P agregado a la siembra contempló los requerimientos para un nivel crítico de 12-13 ppm en los primeros 20 cm.

Por último, el PMN es considerado bajo para los tres suelos, más aún para el Sitio 3 que registra un valor de 7 mg/kg N-NH₄. Este dato indica que el suelo perdió gran parte de la capacidad de aporte de N (Morón y Sawchik, 2002).

4.2.2 Resistencia a la penetración

Los tres sitios mostraron algunas diferencias en cuanto a resistencia a la penetración. Se ha propuesto usar como umbral o valor crítico el nivel de 2000 kPa, por arriba del cual se vería impedido el desarrollo normal de las raíces (Glinski y Lipiec, citados por Steinbach y Álvarez, 2007). En el presente estudio el promedio más alto fue de 1644 kPa a 40 cm, por lo tanto, se podría sugerir que en estos suelos las condiciones físicas no fueron un problema.

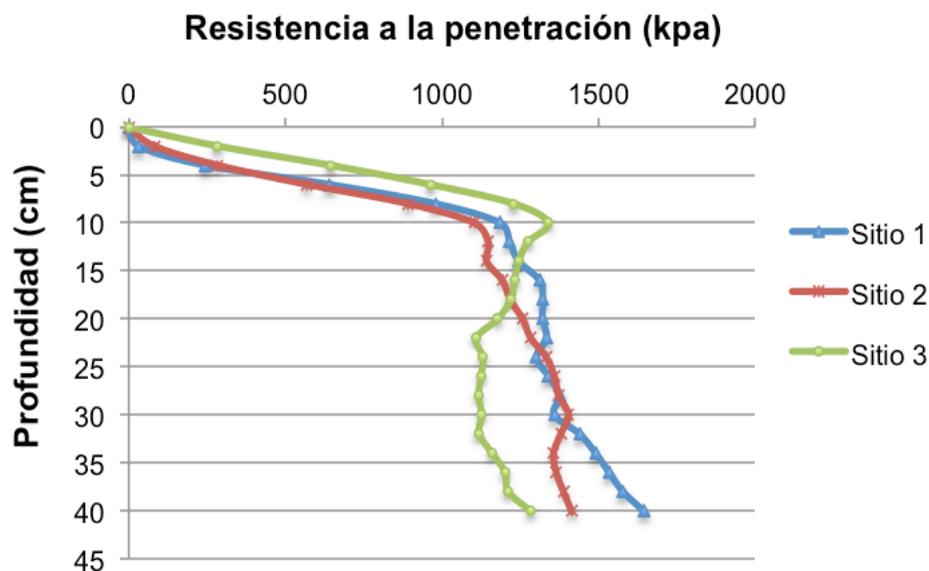


Figura 3. Resistencia a la penetración según sitio y profundidad

En la Figura 3 se observa un aumento de forma abrupta de la resistencia en los primeros 10 cm, para luego crecer a tasas menores o incluso decrecer, como es el caso del Sitio 3.

4.2.3 Conductividad eléctrica

Cuadro 6. Conductividad eléctrica del suelo según sitio y profundidad

PROFUNDIDAD	SITIO					
	1		2		3	
	CE*	Rel.	CE	Rel.	CE	Rel.
cm	mS/cm		mS/cm		mS/cm	
7,5	684	1,00	678	1,00	850	1,00
15	820	1,20	757	1,12	1020	1,20
30	1108	1,35	930	1,23	1481	1,45

* Conductividad Eléctrica promedio (10 muestras)

Para estimar la diferenciación textural del perfil se calcularon las relaciones de CE entre profundidades consecutivas.

En los Sitios 1 y 3 la CE aumentó en los primeros 15 cm de la misma forma, coincidiendo con el contenido de arcilla del suelo. La medición de 30 cm muestra un incremento importante en ambos casos (mayor en el Sitio 3), probablemente explicado por la presencia de un horizonte Bt.

En cambio, en el Sitio 2, la CE aumentó gradualmente con la profundidad, pero los valores no fueron tan altos como en el Sitio 1, debido a una menor diferencia textural en profundidad.

4.2.4 Infiltración

A continuación se presentan las determinaciones de infiltración, medidas como el tiempo requerido para infiltrar un volumen de 450 mL de agua (Cuadro 7).

Cuadro 7. Tiempo requerido (min.) para infiltrar 450 mL de agua según sitio

Repetición	SITIO		
	1	2	3
1	3,3	2,8	1,8
2	1,5	9,3	1,6
3	25,5	9,5	1,7
Promedio	10,1	7,2	1,7

Estas determinaciones tienen como objetivo comparar los suelos entre sí, ya que el valor en sí mismo no tiene demasiada utilidad. El Sitio 3 tuvo mayor velocidad de infiltración con una alta repetitividad. En cambio el Sitio 2 tardó más tiempo en infiltrar el mismo volumen de agua en las tres repeticiones. Por último, el Sitio 1 fue muy inconsistente en las determinaciones. Registró dos infiltraciones relativamente rápidas pero la última estuvo muy por arriba de las restantes. Es probable que dicha medición se haya realizado sobre una huella de maquinaria, sin ser representativa del sitio. Utilizando esta caracterización, el Sitio 3 sería el que presenta el deterioro físico mayor, representado por una capa más compacta en superficie y baja infiltración relativa.

4.3 CONCENTRACIÓN Y ABSORCIÓN DE NUTRIENTES

4.3.1 Comparación entre sitios

En el Cuadro 8 se presentan las concentraciones de K y N en planta en los estadios Z32 y Z65 y la absorción de K a Z65 por sitio. Además, se presenta la concentración de K al estadio Z65, en el rastrojo y en el grano, con valores absolutos (kg/ha) para los últimos dos. El Sitio 1 registró valores superiores en todas las variables, aunque en tres casos las diferencias no fueron significativas (absorción y concentración de K en planta a Z65 y concentración de K en grano).

Cuadro 8. Concentración y absorción de K y N según sitio

VARIABLE	SITIO	
	1	3
K en planta Z32 (%)	2,21 a	1,46 b
K en planta Z65 (%)	0,79 a	0,55 a
K en hoja bandera Z65 (%)	1,06 a	0,73 b
K en rastrojo (%)	0,35 a	0,20 b
K en grano (%)	0,35 a	0,33 a
K absorbido Z65 (kg/ha)	77,0 a	36,9 a
K en rastrojo (kg/ha)	33,8 a	14,1 b
K exportado en grano (kg/ha)	22,4 a	16,2 b
N en planta Z32 (%)	4,94 a	4,25 b
N en planta Z65 (%)	1,87 a	1,39 b
N absorbido Z65 (kg/ha)	183,4 a	91,3 b

Medias con igual letra dentro de fila no son significativamente diferentes. Test LSD Fisher ($p < 0,05$).

La concentración de N en planta a Z32 fue en ambos casos, superior a 4,2 %, que es el nivel crítico de N para el ajuste de la fertilización nitrogenada a Zadoks 30 (Baethgen, 1992). Probablemente el nivel de N en planta a comienzos de encañazón (Z30) haya sido aún superior, considerando que existe dilución del nutriente debido a la elevada tasa de crecimiento que experimenta el cultivo en dicha etapa.

El Sitio 3, a pesar del alto valor de K intercambiable en suelo, registró en promedio 1,46 % K en planta a Z32, levemente inferior al rango óptimo sugerido entre las etapas de encañazón-floración, el cual se sitúa entre 1,5 % y 3,0 % según Correndo y García (2012).

4.3.2 Comparación entre tratamientos, Sitios 1 y 3

4.3.2.1 Concentración y absorción de K

La fertilización con 180 kg/ha de K₂O afectó ($p < 0,05$) la concentración de K en planta a Z32 y Z65, la cantidad de K absorbido a Z65, la concentración de K en hoja bandera a Z65, y la concentración de K en el rastrojo (Cuadro 9). No se observaron diferencias significativas en la concentración de K en el grano ni en la cantidad de K en el grano entre tratamientos. El tratamiento 120 K₂O sólo se diferenció significativamente ($p < 0,05$) del testigo en el K absorbido hasta Z65.

Cuadro 9. Concentración y absorción de K según tratamiento (Sitios 1 y 3)

VARIABLE	TRATAMIENTO			
	Testigo	60 K ₂ O	120 K ₂ O	180 K ₂ O
K en planta Z32 (%)	1,52 b	1,76 b	1,85 ab	2,21 a
K en planta Z65 (%)	0,59 b	0,60 b	0,69 ab	0,79 a
K en hoja bandera Z65 (%)	0,79 b	0,85 ab	0,94 ab	1,00 a
K en rastrojo (%)	0,25 bc	0,22 c	0,29 ab	0,32 a
K en grano (%)	0,34 a	0,34 a	0,34 a	0,34 a
K absorbido Z65 (kg/ha)	47,8 c	49,4 bc	61,3 ab	69,5 a
K en rastrojo (kg/ha)	21,3 bc	19,2 c	26,2 ab	29,0 a
K exportado en grano (kg/ha)	19,0 a	18,6 a	19,4 a	20,2 a

Medias en la fila con letra común no son significativamente diferentes. Test LSD Fisher ($p < 0,05$).

El promedio de la concentración de K en planta a Z32 de los Sitios 1 y 3 estuvo por encima del nivel crítico de K entre las etapas de encañazón-

floración, según Correndo y García (2012). En el Sitio 1 no se registraron medias inferiores a 2 % K en Z32 en ninguno de los tratamientos, mientras que en el Sitio 3 sólo los fertilizados con 120 y 180 kg/ha K₂O superaron el límite de 1,5 %.

Si bien la concentración de K en hoja bandera (Z65) aumentó con el agregado de fertilizante potásico, no se encontró en el rango de suficiencia, propuesto por Jones, citado por Megal et al. (2001), comprendido entre 1,5 y 3,0 %. Cabe destacar que dicho rango corresponde a la etapa de espigazón y en nuestro caso, el muestreo fue con el cultivo más avanzado, cuando se encontraba en floración (Z65).

4.3.2.2 Concentración y absorción de N

En el Cuadro 10, se presenta la concentración y absorción de N en los cuatro tratamientos.

Cuadro 10. Concentración y absorción de N según tratamiento (Sitios 1 y 3)

VARIABLE	TRATAMIENTO			
	Testigo	60 K ₂ O	120 K ₂ O	180 K ₂ O
N en planta Z32 (%)	4,76 a	4,82 a	4,38 b	4,42 b
N en planta Z65 (%)	1,62 a	1,65 a	1,57 a	1,69 a
N absorbido Z65 (kg/ha)	124,0 b	135,1 ab	141,6 ab	148,7 a

Medias en la fila con letra común no son significativamente diferentes. Test LSD Fisher ($p < 0,05$).

Se encontró diferencia estadística ($p < 0,05$) en la concentración de N en planta a Z32 y en el N absorbido en emergencia-antesis (Z65). En el primer caso, hay una diferencia clara entre el testigo y el agregado de 60 kg K₂O, frente a los dos niveles superiores de fertilización potásica. Esta mayor concentración de N de los primeros tratamientos es atribuible a una menor producción de biomasa, a causa de menor disponibilidad de K. Es probable que en los tratamientos 120 y 180 K₂O el N se haya diluido, aunque cabe destacar que se encuentran por encima del valor crítico absoluto (4,2 %) manejado en encañazón (Baethgen, 1992).

En el tratamiento con 180 kg/ha de K₂O, el cultivo absorbió mayor cantidad de N, permaneciendo en igual estado nutricional en floración (Z65) comparado con el testigo.

4.3.3 Comparación entre tratamientos, Sitio 2

Cuadro 11. Concentración y absorción de K y N según tratamiento (Sitio 2)

VARIABLE	TRATAMIENTO			
	Testigo	60 K ₂ O	120 K ₂ O	180 K ₂ O
K en planta Z32 (%)	1,97 a	2,30 a	2,23 a	2,43 a
K en planta Z65 (%)	0,66 b	0,77 ab	0,89 a	0,90 a
K en hoja bandera Z65 (%)	0,89 a	0,90 a	0,88 a	1,02 a
K en rastrojo (%)	0,30 a	0,26 a	0,29 a	0,34 a
K en grano (%)	0,32 a	0,33 a	0,32 a	0,31 a
K absorbido Z65 (kg/ha)	68,1 a	81,2 a	78,8 a	86,0 a
K en rastrojo (kg/ha)	27,5 a	22,7 a	26,9 a	29,6 a
K exportado en grano (kg/ha)	20,6 a	20,0 a	19,8 a	19,0 a
N en planta Z32 (%)	4,69 a	4,65 a	4,65 a	4,53 a
N en planta Z65 (%)	1,90 a	1,72 a	1,83 a	1,67 a
N absorbido Z65 (kg/ha)	197,8 a	180,7 a	163,1 a	159,4 a

Medias en la fila con letra común no son significativamente diferentes. Test LSD Fisher ($p < 0,05$).

No existieron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) en este sitio, excepto en la concentración de K en planta en Z65. No fue posible extraer conclusiones en cuanto a la fertilización diferencial del nutriente K en este sitio en particular.

4.4 RENDIMIENTO, COMPONENTES DEL RENDIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE BIOMASA

4.4.1 Comparación entre sitios

En el Cuadro 12 se presenta el rendimiento en grano, componentes del rendimiento y variables de producción según sitio.

El rendimiento en grano fue significativamente superior en el primer sitio ($p < 0,05$), básicamente explicado por el número de espigas por m², ya que no existieron diferencias significativas en los granos por espiga ni en el peso de mil granos (PMG).

Lo mismo sucedió en la producción de biomasa, y cantidad de paja (rastrojo) producida. Por último, no existió diferencia estadística en el índice de cosecha de la materia seca.

Cuadro 12. Rendimiento en grano, componentes del rendimiento y variables de producción, según sitio

VARIABLE	SITIO	
	1	3
Rendimiento (kg/ha)*	7237 a	5610 b
Espigas/m ²	520 a	408 b
Granos/espiga	40,8 a	40,6 a
PMG (g)	34,5 a	33,8 a
Biomasa Z65 (kgMS/ha)	9789 a	6576 b
Biomasa cosecha (kgMS/ha)	16137 a	11940 b
Rastrojo (kg/ha)	9768 a	7003 b
Índice de cosecha MS (%)	39,5 a	41,5 a

Medias en la fila con letra común no son significativamente diferentes. Test LSD Fisher ($p < 0,05$). *Humedad de grano a la cosecha: 12 %; MS: materia seca.

4.4.2 Comparación entre tratamientos, Sitios 1 y 3

En el Cuadro 13 se incluyen los datos de rendimiento en grano con sus componentes, la producción de materia seca tanto a floración como a cosecha, la cantidad de paja producida (rastroy) y el índice de cosecha MS. Dicha información está referida a los cuatro tratamientos ya descriptos.

Cuadro 13. Rendimiento en grano, componentes del rendimiento y variables de producción, según tratamiento (Sitios 1 y 3)

	TRATAMIENTO			
	Testigo	60 K ₂ O	120 K ₂ O	180 K ₂ O
Rendimiento (kg/ha)*	6279 b	6219 b	6437 ab	6762 a
Espigas/m ²	465 a	458 a	467 a	467 a
Granos/espiga	40,7 a	40,1 a	40,6 a	41,4 a
PMG (g)	33,3 b	34,0 ab	34,2 ab	35,0 a
Biomasa Z65 (kgMS/ha)	7462 b	7908 ab	8682 a	8678 a
Biomasa cosecha (kgMS/ha)	13867 ab	13616 b	14194 ab	14478 a
Rastrojo (kg/ha)	8342 a	8144 a	8530 a	8528 a
Índice de cosecha MS (%)	40,1 a	40,3 a	40,2 a	41,3 a

Medias en la fila con letra común no son significativamente diferentes. Test LSD Fisher ($p < 0,05$). *Humedad de grano a la cosecha: 12 %; MS: materia seca.

Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) para rendimiento en grano, PMG y producción de biomasa (ambos cortes). Por el contrario para espigas/m², granos/espiga, cantidad de rastroy e índice de cosecha MS (%) no

fue posible detectar diferencias estadísticas entre tratamientos. El rendimiento obtenido con 180 K₂O superó ($p < 0,05$) tanto al testigo como al tratamiento 60 K₂O, sin interacción por sitio. Como sucedió en varios indicadores de concentración y absorción, no agregar o agregar 60 kg de K₂O no varió el resultado. Si bien se cuantificó un incremento de rendimiento con 120 K₂O, no fue significativo. El único componente que explica la diferencia observada es el PMG. Cuanto mayor fue la fertilización potásica, mayor fue el peso de los granos, aunque estadísticamente la diferencia sólo se apreció con el agregado de 180 kg de K₂O.

Los valores de producción de biomasa a floración, tendieron a incrementarse a medida que se agregó más K, hasta que se estabilizó entorno a los 8600 kgMS/ha para los tratamientos 120 y 180 K₂O. Dichos tratamientos fueron superiores al testigo ($p < 0,05$). Cuando se analiza la biomasa producida a cosecha, se emparejan los tratamientos, y en este caso la única diferencia estadística ($p < 0,05$) se da entre el 180 y el 60 K₂O. El testigo se diferencia del tratamiento más fertilizado si se utiliza un $p < 0,10$.

4.4.3 Comparación entre tratamientos, Sitio 2

A continuación se presenta el Cuadro 14 con la información correspondiente al Sitio 2.

Cuadro 14. Rendimiento en grano, componentes del rendimiento y variables de producción, según tratamiento (Sitio 2)

	TRATAMIENTO			
	Testigo	60 K ₂ O	120 K ₂ O	180 K ₂ O
Rendimiento (kg/ha)*	7347 a	6904 a	7054 a	6910 a
Espigas/m ²	499 a	481 a	494 a	496 a
Granos/espiga	42,7 a	39,2 a	39,9 a	37,0 a
PMG (g)	35,0 a	36,7 a	36,1 a	37,8 a
Biomasa Z65 (kgMS/ha)	10272 a	10504 a	8924 a	9586 a
Biomasa cosecha (kgMS/ha)	15640 a	14717 a	15369 a	14691 a
Rastrojo (kg/ha)	9174 a	8641 a	9161 a	8610 a
Índice de cosecha (%)	41,4 a	41,4 a	40,6 a	41,5 a

Medias en la fila con letra común no son significativamente diferentes. Test LSD Fisher ($p < 0,05$). *Humedad de grano a la cosecha: 12 %; MS: materia seca.

Al igual que en los indicadores de concentración y absorción, para este sitio no se encontraron efectos claros de los distintos tratamientos.

4.5 RENDIMIENTO EN GRANO EN FUNCIÓN DEL ESTADO NUTRICIONAL DEL CULTIVO

4.5.1 Potasio

En las siguientes figuras se presenta el rendimiento en grano en función de los distintos indicadores de nutrición potásica, medidos en los estadios Z32 y Z65.

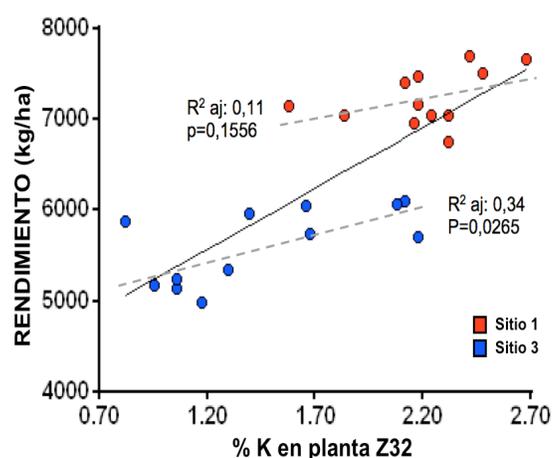


Figura 4. Rendimiento en función del % K en planta Z32

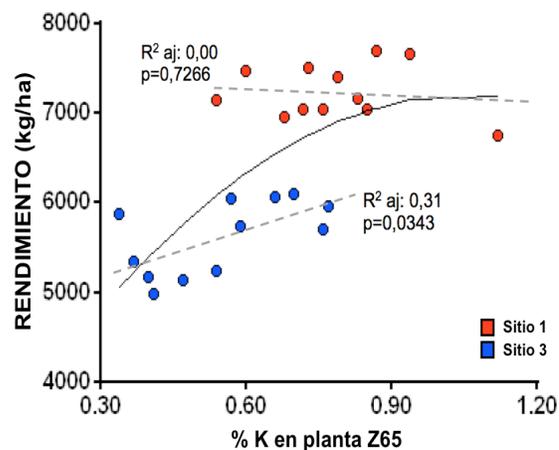


Figura 5. Rendimiento en función del % K en planta en Z65

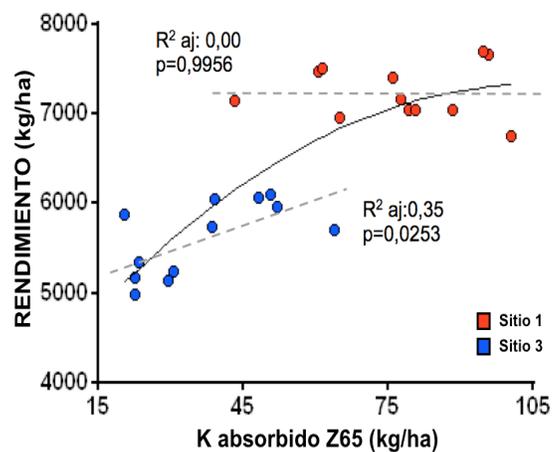


Figura 6. Rendimiento en función del K absorbido a floración (Z65)

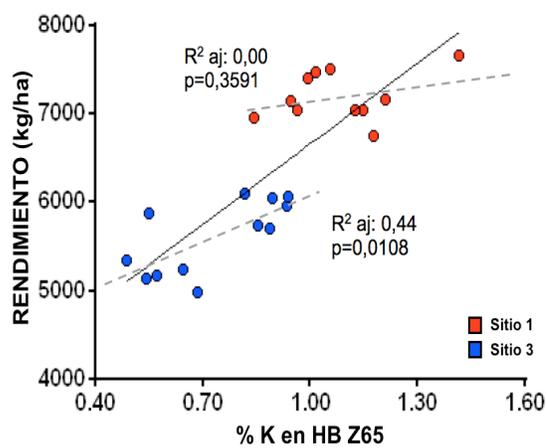


Figura 7. Rendimiento en función del % K en HB Z65

En promedio, el Sitio 1 registró valores superiores en los indicadores de concentración y absorción de K. Dicha diferencia se debe probablemente, a un mayor aporte de K^+ por parte del suelo. En este sentido, el Sitio 3 presentó a la siembra 0,41 meq/100g K int (0-15 cm), menor que los 0,53 meq/100g K int del Sitio 1, lo que podría explicar la diferencia observada. Sin embargo, el K int del Sitio 3 fue mayor al nivel crítico tentativo de 0,34 meq/100g sugerido por Barbazán et al. (2011), e igualmente existió respuesta al agregado de dicho nutriente. Cabe destacar que se utilizaron dos variedades distintas (diferentes ciclos y fechas de siembra) y en distintos ambientes. No fue posible calcular la existencia de interacción variedad x sitio, y variedad x tratamiento.

Existió una relación positiva entre el % K en encañazón (Z32) y el rendimiento logrado ($p < 0,0001$). El R^2 ajustado para dicha regresión es de 0,64. Esta relación en realidad resultó de dos grupos de puntos definidos por los sitios, por lo que no explica la variación de rinde dentro de sitios. El Sitio 1 presentó una relación positiva, aunque no significativa ($p = 0,1556$) y con un R^2 ajustado bajo (0,11). En cambio la regresión correspondiente al Sitio 3, además de ser positiva, es estadísticamente significativa ($p = 0,0265$) y con un ajuste mayor ($R^2_{aj} = 0,34$).

Si bien la regresión entre el % K en planta en Z65 y el rendimiento es significativa ($p < 0,0007$), resulta de la unión de dos grupos de puntos (sitios). El R^2 ajustado en este caso fue de 0,45. El modelo de regresión para el Sitio 1 no fue significativo ($p = 0,7266$), además de no mostrar una relación clara. En el Sitio 3 se observó una relación positiva y significativa ($p = 0,0343$) con un R^2 ajustado de 0,31.

Utilizando los datos de producción de materia seca en Z65 y los datos de concentración en planta, se calculó el K absorbido para dicho estadio. La curva correspondiente a la predicción del rendimiento es una parábola con pendiente negativa, significativa ($p < 0,0001$) y con un R^2 ajustado de 0,67. Como en todos los casos, la regresión anterior no explica la relación entre las variables dentro de cada sitio. El Sitio 1 nuevamente, no presenta una relación clara. En cambio, aquellas parcelas del Sitio 3 que contenían mayor cantidad de K, producto de una mayor acumulación en el período emergencia-antesis, fueron las que rindieron más en promedio ($p = 0,0253$). El R^2 ajustado de dicha recta es de 0,35.

Considerar el contenido y la absorción de K en toda la planta, puede no reflejar la condición nutricional en su totalidad. Por este motivo, se decidió muestrear las láminas de las hojas bandera (HB) para complementar la información anterior. Dicho órgano cumple un rol fundamental en la etapa de llenado de granos. La Figura 7 muestra una relación positiva entre el % K en HB

(en Z65) y el rendimiento logrado, utilizando todos los puntos. El ajuste de la regresión es de 0,67 y el análisis de varianza da como resultado que la regresión es muy significativa ($p < 0,0001$). El Sitio 1 no presenta relación clara entre las variables en estudio, mientras que en el Sitio 3 la regresión es positiva y significativa ($p = 0,0108$) con un R^2 ajustado de 0,44. El % K en HB no alcanzó el rango de suficiencia propuesto por Jones, citado por Megal et al. (2001), comprendido entre 1,5 y 3,0 %. Queda la interrogante sobre si habría o no respuesta a niveles mayores de fertilización potásica. Cabe destacar que dicho rango corresponde a la etapa de espigazón y en nuestro caso, el muestreo fue realizado con el cultivo en un estadio más avanzado, concretamente en Zadoks 65.

4.5.2 Nitrógeno

Para complementar la información anterior, se relacionó el rendimiento logrado con indicadores de concentración y absorción de N.

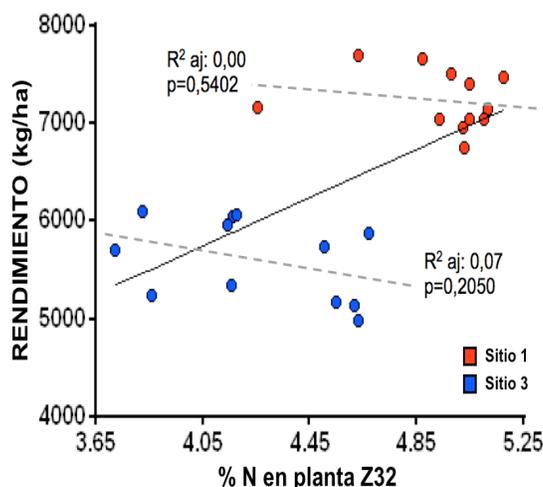


Figura 8. Rendimiento en función del % N en planta en Z32

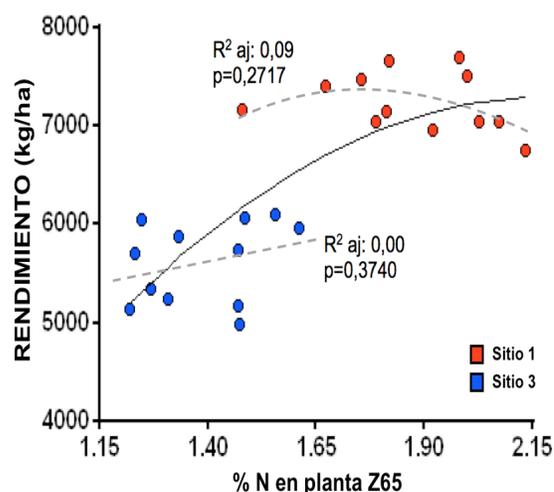


Figura 9. Rendimiento en función del % N en planta en Z65

En la Figura 8 se observa una relación positiva ($p < 0,0011$) producto de la unión de 2 grupos de puntos (sitios), sin encontrar relaciones significativas entre las variables dentro de los sitios. En el Sitio 3 existió una tendencia ($p = 0,2050$) a disminuir los rendimientos a medida que incrementaban los niveles de N en planta en Z32. Igualmente los niveles de N en planta se encuentran en su mayoría por encima del nivel crítico absoluto sugerido por Baethgen (1992), sin olvidar que se muestreó en un estadio más avanzado.

En la Figura 9 se presenta el rendimiento en función del % N en planta en el estadio Z65. Tal como ocurrió en el caso anterior, si bien la regresión es significativa ($p < 0,0001$) y el coeficiente de ajuste es alto (0,60) considerando la totalidad de los puntos, no fue posible encontrar una relación significativa entre las variables dentro de cada sitio. En este caso, la tendencia ($p = 0,2717$) a disminuir los rendimientos a medida que incrementaban los niveles de N en planta se observó en el sitio de alto rendimiento.

El rendimiento en función del N absorbido a floración (Z65) se presenta en la Figura 10. Cuando se utilizaron los datos de los dos sitios en forma conjunta, el modelo que mejor ajustó fue el polinomio de segundo grado, resultando en un R^2 ajustado de 0,87. La curva correspondiente a la predicción del rendimiento es una parábola con pendiente negativa. Existe un punto máximo, situado aproximadamente en 200 kg/ha en el eje de las abscisas (N absorbido) y entorno a 7300 kg/ha en el eje de las ordenadas (rendimiento). Teniendo en cuenta la dinámica del N, es lógico pensar que en situaciones de exceso, el rendimiento se vea comprometido. Igualmente en los ensayos no se llegó a ese extremo, ya que no se observó disminución del rinde por dicho motivo. En el Sitio 3 es muy significativa ($p = 0,0062$) la relación entre el rendimiento y el N absorbido al momento de floración, con un R^2 ajustado de 0,50. En cambio en el Sitio 1, no existió relación entre las variables ($p = 0,8364$). Fue posible lograr 7000 kg/ha tanto con 150 como con 240 kg/ha de N absorbido. Probablemente existió consumo de lujo de este nutriente, sin descartar la presencia de alguna otra limitante.

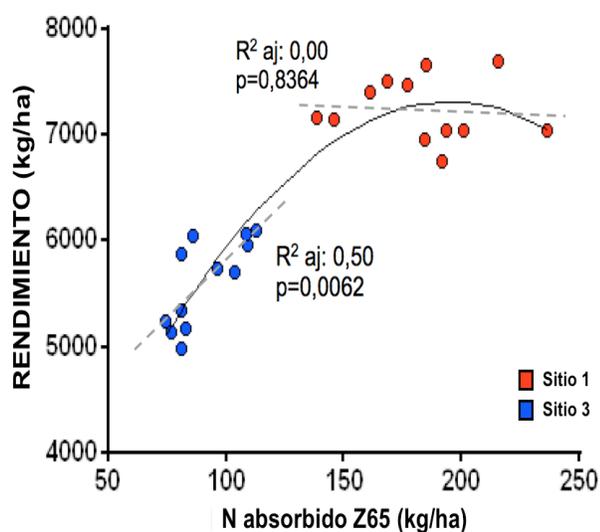


Figura 10. Rendimiento en función del N absorbido a floración (Z65)

4.6 RENDIMIENTO EN GRANO EN FUNCIÓN DE SUS COMPONENTES

En la siguiente figura, se presenta la relación entre el rendimiento y cada uno de los componentes en estudio.

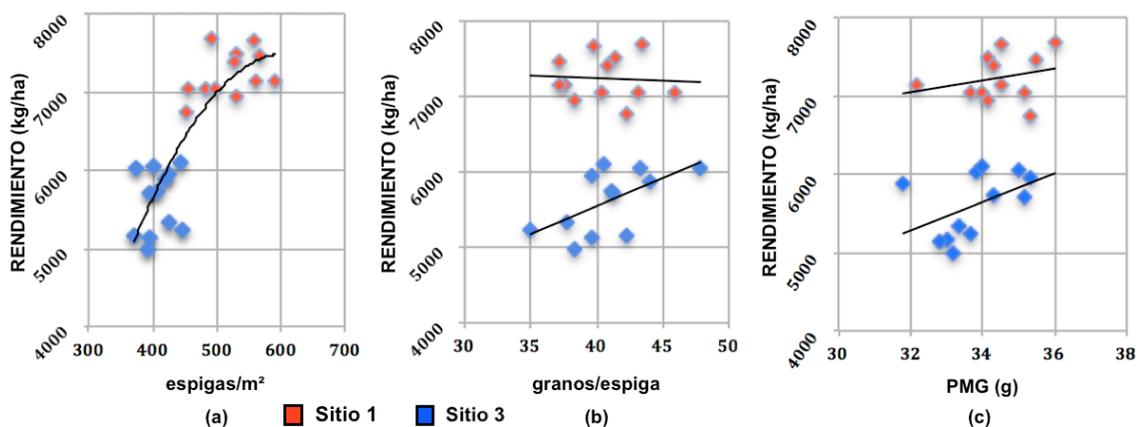


Figura 11. Rendimiento en grano en función de las espigas/m² (a), granos/espiga (b) y PMG (c)

Los mayores rendimientos se registraron en el Sitio 1, tal como se describió antes. En general, no existen relaciones muy claras entre las variables. En todos los casos se observan grupos de puntos separados, correspondientes a dos sitios distintos. Este patrón de dispersión muestra claramente el efecto sitio analizado en capítulos anteriores.

Si analizamos el comportamiento de las espigas/m² dentro de cada sitio, no es posible encontrar una relación clara con el rendimiento. A modo de ejemplo, en el Sitio 3 fue posible superar los 6000 kg/ha con 370, 400 y 450 espigas/m², mientras que en el Sitio 1, con 450 espigas/m² fue suficiente para superar los 7000 kg/ha, pero con una mayor cantidad de granos y a su vez más pesados. Esto indica que la variable espigas/m² por sí sola no explicó mayores o menores rendimientos.

En el análisis de los granos/espiga en particular, no se observó una relación estrecha con el rendimiento. En el Sitio 3, la regresión fue positiva y significativa ($p=0,0418$), pero con un R^2 ajustado de 0,29. Las parcelas que tuvieron pocas espigas, compensaron con mayor cantidad de granos por espiga.

El Sitio 1 no presentó una relación clara entre PMG y rendimiento. En cambio, en el Sitio 3 existió una tendencia positiva entre las dos variables,

aunque no significativa ($p=0,13$). Prácticamente todas las parcelas del sitio de mayor rendimiento lograron superar los 34 g, algo que no ocurrió en el Sitio 3, con PMG menores en promedio.

5. CONCLUSIONES

A pesar de que el K intercambiable se situó entre 0,42 y 0,53 meq/100 g en los distintos sitios, existió respuesta significativa a la fertilización con potasio en rendimiento. En promedio se incrementó el rendimiento en 500 kg/ha ($p < 0,05$) con la dosis más alta con respecto al testigo.

La fertilización potásica (KCl) logró aumentar el contenido y la absorción del nutriente en planta en todos los estadios analizados. En la mayoría de las situaciones esto fue posible con la dosis más alta agregada (180 kg/ha de K_2O).

Los resultados relativizan el valor crítico de referencia actual de 0,34 meq/100 g.

El peso de mil granos (PMG) fue el único componente de rendimiento que aumentó significativamente ($p < 0,05$) con el agregado de fertilizante potásico.

En principio se descarta que los resultados sean producto de limitaciones para la absorción generadas por suelos compactados.

Puede que no sea económicamente ventajoso aplicar dosis tan altas de este nutriente, al menos en el corto plazo (un cultivo) y en este tipo de suelos. La relación de precios entre el insumo (fertilizante) y el producto (grano de trigo) obviamente es muy importante en la decisión final. Es necesario seguir investigando para comprender la dinámica del K en el suelo, además de conocer qué medidas se pueden tomar para que éste no sea una limitante para el cultivo.

6. RESUMEN

La intensificación agrícola en Uruguay en los últimos años, ha provocado que nutrientes como el K, comiencen a ser limitantes para el crecimiento de los cultivos en situaciones particulares. Suelos que originalmente eran ricos en K, comenzaron a manifestar síntomas de deficiencia aún en niveles muy por encima del nivel crítico de 0,34 meq/100g de K int. En el marco de esta situación, este trabajo tuvo como objetivo evaluar la respuesta del cultivo de trigo a la fertilización potásica en suelos del litoral oeste de Uruguay, cuyo nivel de K int. no se encuentre muy distante del crítico mencionado anteriormente. Los tratamientos (0, 60, 120, 180 kg K₂O) fueron instalados en tres sitios, correspondientes a dos chacras situadas en el Departamento de Soriano, sobre grupos CONEAT 10.15 y 11.5. El diseño fue en bloques completos al azar (DBCA) con cuatro tratamientos y tres repeticiones (bloques). Se determinaron variables de: suelo, concentración y absorción de nutrientes, producción de biomasa en distintos estadios, y rendimiento en grano con sus respectivos componentes. El análisis de rendimiento presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), obteniéndose la mayor respuesta con el mayor nivel de fertilización potásica. No se constataron limitantes físicas en todos los perfiles de suelo, luego de analizar los datos de penetración al comienzo del experimento. A pesar de esto, se encontró respuesta al agregado de fertilizante con valores de K int. (en los primeros 15 cm de suelo) de 0,42 y 0,53 meq/100g, dependiendo del sitio.

Palabras clave: Potasio; Trigo; Nivel crítico K intercambiable.

7. SUMMARY

The agricultural intensification in Uruguay in the last years, has caused that nutrients like potassium, begin to be a limitant for the growth of crops in particular situations. Soils that originally were rich in K, started to show symptoms of deficiency even at levels well above the critical level of 0,34 meq/100g Exchangeable K. Under this situation, this study aimed to evaluate the response of the wheat crop to potassium fertilization in soils on the west coast of Uruguay, wich level of Exchangeable K not be far away from the critical previously mentioned. The treatments (0, 60, 120, 180 kg K₂O) were installed at three sites, corresponding to two farms located in the Departament of Soriano, on CONEAT groups 10.15 and 11.5. It was a Randomized Complete Block Design (RCBD) with four treatments and three repetitions (blocks). Were determined variables of: soil, nutrient concentration and absorption, biomass production in different moments, and grain yield with their respective components. Yield analysis showed significant differences between treatments ($p < 0,05$), obtaining greater response with the highest level potassium fertilization. No physical limitations were found in all soil profiles, after analyzing the penetration data at the start of the experiment. Despite this, it was found response adding fertilizer with Exchangeable K concentration of 0,42 and 0,53meq/100g, depending on the site.

Keywords: Potassium; Wheat; Exchangeable K critical level.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Almada, P. 2006. Fertilización P y K de maíz en tres suelos de Durazno. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 65 p.
2. Arvidsson, J. 1999. Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction. *Plant and Soil*. 208: 9-19.
3. Ashley, M.; Grant, M.; Grabov, A. 2006. Plant responses to potassium deficiencies; a role for potassium transport proteins. *Journal of Experimental Botany*. 57 (2): 425-436.
4. Baethgen, W. 1992. Fertilización nitrogenada de cebada cervecera en el litoral oeste del Uruguay. Montevideo, INIA. 59 p. (Serie Técnica no. 24).
5. Barbazán, M. M.; Bautes, C.; Beux, L.; Bordoli, J. M.; Cano, J. D.; Ernst, O.; García, A.; García, F.; Quincke, A. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay; rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia (Montevideo)*. 15 (2): 93-99.
6. Barraclough, P.; Weir, A. 1988. Effects of a compacted subsoil on root and shoot growth, water use and nutrient uptake of Winter wheat. *Journal of Agricultural Science*. 110: 207-216.
7. Bautes, C.; Barbazán, M. M.; Beux, L. 2009. Fertilización potásica inicial y residual en cultivos de secano en suelos sobre areniscas cretácicas y transicionales. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 41: 1-8.
8. _____; _____; _____. 2010. Respuesta a potasio en cultivos extensivos en suelos de Soriano. In: *Jornada Técnica; el Efecto de la Agricultura en la Calidad de los Suelos y Fertilización de Cultivos (2010, Mercedes, Soriano, UY)*. Memorias. Montevideo, INIA. pp. 31-35 (Actividades de Difusión no. 605).
9. Baver, L. D.; Gardner, W. H.; Gardner, W. 1972. *Soil physics*. 4th. ed. New York, Wiley and Sons. 489 p.
10. Bennett, W. F. 1993. Plant nutrient utilization and diagnostic plant symptoms. In: Bennett, W. F. ed. *Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants*. St. Paul, MN, APS. pp. 1-7.

11. Bordoli, J. M. 2001. Dinámica de nutrientes y fertilización en siembra directa. *In: Díaz Rosselló, R. ed. Siembra directa en el cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 289 -297.*
12. Bower, C. A.; Pierre, W. H. 1944. Potassium response of various crops on a high-lime soil in relation to their contents of potassium, calcium, magnesium, and sodium. *Agronomy Journal. 36: 608-614.*
13. Cano, J. D.; Ernst, O.; García, F. 2007. Respuesta a la fertilización potásica en maíz para grano en suelos del noreste de Uruguay. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur. no. 36: 9-12.*
14. _____; Ernst, O.; García, F.; 2009. Respuesta a la fertilización potásica en maíz en suelos de Uruguay con distinta capacidad de aporte. *In: Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. Rosario, International Plant Nutrition Institute. pp. 172-174.*
15. Casanova, O. 1996. Potasio; consideraciones sobre su situación en el Uruguay. *In: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 57-61 (Serie Técnica no. 76).*
16. Cassman, K. G.; Roberts, B. A.; Kerby, T. A.; Bryant, D. C.; Higashi, S. L. 1989. Soil potassium balance and cumulative cotton response to annual potassium additions on a vermiculitic soil. *Soil Science Society of America Journal. 53: 805-812.*
17. _____; Peng, S.; Olk, D. C; Ladha, J. K.; Reichardt, W.; Dobermann, A.; Singh, U. 1998. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. *Field Crops Research. 56 (1-2): 7-39.*
18. Claassen, N.; Jungk, A. 1982. Kaliumdynamik im wurzelnahen Boden in Beziehung zur Kaliumaufnahme von Maispflanzen. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 145: 513-525.*
19. Coitiño, J.; Mazzoni, P. 2011. Respuesta a la fertilización con fósforo, potasio y azufre en trigo en ambientes con diferente potencial de producción dentro de una misma chacra. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 55 p.

20. Correndo, A. A.; García, F. O. 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico; cultivos extensivos. (en línea). IPNI. Archivo Agronómico. no. 14. 8 p. Consultado 31 may. 2016. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/2983F9B934DDE60D852579BA00747DF4/\\$FILE/AA14.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/2983F9B934DDE60D852579BA00747DF4/$FILE/AA14.pdf)
21. Darunsontaya, T.; Suddhiprakarn, A.; Kheoruenromne, I.; Prakongkep, N.; Gilkes, R. J. 2012. The forms and availability to plants of soil potassium as related to mineralogy for upland Oxisols and Ultisols from Thailand. *Geoderma*. 170: 11-24.
22. Evangelou, V. P.; Karathanasis, A. D. 1986. Evaluation of potassium quantity-intensity relationships by a computer model employing the Gapon equation. *Soil Science Society of America Journal*. 50: 378-382.
23. Fontanetto, H.; Gambaudo, S.; Keller, O.; Albrecht, J.; Weder, E.; Gianinetto, G.; Borsarelli, J.; Sillón, M.; Boschetto, H.; Giailevra, D.; Negro, C.; Belotti, L. 2011. Avances en calcio, magnesio y potasio. (en línea). In: Simposio Fertilidad (2011, s.l.). La nutrición de cultivos integrada al sistema de producción. Buenos Aires, IPNI. s.p. Consultado 31 may. 2016. Disponible en [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/50913D5AAF2E886985257906006B3ABE/\\$FILE/FONTANETTO%20-%20Avances%20en%20K,%20Ca%20y%20Mg%20en%20Región%20Pampeana.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/50913D5AAF2E886985257906006B3ABE/$FILE/FONTANETTO%20-%20Avances%20en%20K,%20Ca%20y%20Mg%20en%20Región%20Pampeana.pdf)
24. García, A.; Quincke, A.; Pereira, S.; Díaz, M. 2009. In: Jornada de Cultivos de Invierno; Respuesta a Cloruro de Potasio (KCl) en Trigo y Cebada (2009, Mercedes, Soriano, UY). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 13-18 (Actividades de Difusión no. 566).
25. _____. 2010. Más de 25 años de investigación en manejo de la fertilización en trigo. In: Jornada Técnica; el Efecto de la Agricultura en la Calidad de los Suelos y Fertilización de Cultivos (2010, Mercedes, Soriano, UY). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 19-23 (Actividades de Difusión no. 605).
26. González, S.; Xavier, A. 2000. Definición del número de hojas por tallo y del número de granos por espiga en cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 69 p.

27. Hallmark, W.; Barber, S. 1981. Root growth and morphology, nutrient uptake, and nutrient status of soybeans as affected by soil K and bulk density. *Agronomy Journal*. 73: 779-782.
28. Havlin, J. L.; Tisdale, S. L.; Beaton, J. D.; Nelson, W. L. 2013. Soil fertility and fertilizers; An introduction to nutrient management. 8th. ed. Upper Saddle River, USA, Pearson Higherd. 528 p.
29. Hernández, J.; Casanova, O.; Zamalvide, J. P. 1988. Capacidad de suministro de potasio en suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía (Montevideo). *Boletín de Investigación* no. 19. 20 p.
30. _____. 1997. Potasio. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 29-33.
31. Huber, D. M.; Arny, D. C. 1985. Interactions of potassium with plant disease. *In*: Munson, R. D. ed. Potassium in agriculture. Madison, WI, ASA. pp. 467-488.
32. Isaac, R. A.; Kerber, J. D. 1971. Atomic absorption and flame photometry; techniques and uses in soil, plant and water analysis. *In*: Walsh, L. M. ed. Instrumental methods for analysis of soil and plant tissues. Madison, WI, USA, Soil Science Society of America Journal. pp. 17-37.
33. Johnston, A. E.; Goulding, K. W. T. 1990. The use of plant and soil analysis to predict the potassium supplying capacity of soil. *In*: Colloquim of the International Potash Institute (22nd., 1990, Bern). Proceedings. Bern, s.e. pp. 177-204.
34. Jungk, A.; Claassen, N. 1986. Availability of phosphate and potassium as the result of interactions between root and soil in the rhizosphere. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 149 (4): 411-427.
35. Kant, S.; Kafkafi, U. 2000. Absorción de potasio por los cultivos en distintos estadios fisiológicos. (en línea). *In*: Internacional Potash Institute Annual Conference (5th., 2000, Rehovot, Israel). Potassium in plants and animals. Rehovot, s.e. pp. 263-279. Consultado 24 may. 2016. Disponible en <http://www.ipipotash.org/udocs/Sesion%20V.pdf>
36. Kirkman, J. H.; Basker, A.; Surapaneni, A.; Macgregor, A. N. 1994. Potassium in the soils of New Zealand, a review. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 37: 207-227.

37. Kuchenbuch, R.; Jungk, A. 1984. Wirkung der Kaliumdungung auf die Kaliumverfügbarkeit in der Rhizosphäre von Raps. *Z Pflanzenernähr Bodenk.* 147: 435-448.
38. _____.; Claassen, N.; Jungk, A. 1986. Potassium availability in relation to soil moisture. Calculations by means of a mathematical simulation model. *Plant and Soil.* 95 (2): 233-243.
39. Lipiec, J.; Stepniewski, W. 1995. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil and Tillage Research.* 35 (1-2): 37-52.
40. Mclean, E. O.; Hartwig, R. C.; Triplett, G. B. 1983. Basic cation saturation ratios as a basis for fertilizing and liming agronomic crops. *Field studies. Agronomy Journal.* 75: 635-639.
41. Martin, H. W.; Sparks, D. L. 1985. On the behavior of non-exchangeable potassium in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 16: 133-162.
42. Martino, D. L.; Shaykewich, C. F. 1994. Root penetration profiles of wheat and barleys as affected by soil penetration resistance in field conditions. *Canadian Journal of Soil Science.* 74 (2): 193-200.
43. Mathers, A. C.; Lotspeich, F. B.; Laase, G. R.; Wilson, G. C. 1966. Strength of compacted Amarillo fine sandy loam as influenced by moisture, clay content, and exchangeable cation. *Soil Science Society of America Journal. Proceedings.* 30: 788-791.
44. Melgar, R.; Magen H.; Camozzi, M. E.; Lavandera, J. 2001. Respuesta del trigo a la aplicación de cloruro de potasio en molisoles con alto contenido de potasio. (en línea). In: Simposio FAUBA-IPI-Fertilizar INTA (1º., 2001, Buenos Aires, Argentina). El potasio en los sistemas agrícolas argentinos. Buenos Aires, INTA. pp. 73-84. Consultado 31 may. 2016. Disponible en <http://www.ipipotash.org/udocs/Sesion II.pdf>
45. Mengel, K.; Kirkby, E. A. 1982. Principles of plant nutrition. Bern, International Potash Institute. 655 p.
46. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2015. Anuario 2015. Montevideo. 215 p.

47. _____. DIRENARE. DSA (Dirección General de Recursos Naturales Renovables. Dirección de Suelos y Aguas, UY). 1993. Carta digital de suelos; departamento de Soriano. (en línea). Montevideo. Esc. 1:200.000, 102 p. Consultado dic. 2016. Disponible en http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/2089_Informe_carta_de_suelos_200mil_SORIANO_procesada.pdf
48. _____. PRENADER (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Programa para el Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo del Riego, UY). 2015. Cartografía de suelos CONEAT. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 10 may. 2015. Disponible en <http://web.renare.gub.uy/sl/coneat/>
49. Monteith, J. L. 1994. Principles of resource capture by crop stands. In: Resource Capture by Crops (52nd., 1994, Nottingham, England). Proceedings. Leicester, Leicestershire, Nottingham University Press. pp. 1-15.
50. Morón, A.; Baethgen, W. 1996. Relevamiento de la fertilidad en los suelos bajo producción lechera en Uruguay. Montevideo, INIA. 16 p. (Serie Técnica no. 73).
51. _____.; Sawchik, J. 2002. Soil quality indicators in a long-term crop-pasture rotation experiment in Uruguay. In: Morón, A.; Díaz, R. eds. 40 años de rotaciones agrícolas-ganaderas. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 67-76 (Serie Técnica no. 134).
52. _____.; Quincke, A. 2010. Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el departamento de Soriano. In: Jornada Técnica; el Efecto de la Agricultura en la Calidad de los Suelos y Fertilización de Cultivos (2010, Mercedes, Soriano, UY). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 5-9 (Actividades de Difusión no. 605).
53. Niu, J.; Zhang, W.; Ru, S.; Chen, X.; Xiao, K.; Zhang, X.; Assaraf, M.; Imas, P.; Magen, H.; Zhang, F. 2013. Effects of potassium fertilization on winter wheat under different production practices in the North China Plain. Field Crops Research. 140 (0): 69-76.
54. Núñez, A. 2010. Situación del potasio en la agricultura uruguaya. In: Jornada Técnica; el Efecto de la Agricultura en la Calidad de los Suelos y Fertilización de Cultivos (2010, Mercedes, Soriano, UY).

Memorias. Montevideo, INIA. pp. 11-14 (Actividades de Difusión no. 605).

55. Oudri, N.; Castro, J. L.; Doti, R.; Carbonell, A. S. 1976. Guía para fertilización de cultivos. Montevideo, MAP. 47 p.
56. Qi, Z.; Spalding, E. P. 2004. Protection of plasma membrane K⁺ transport by the salt overly sensitive1 Na⁺-H⁺ antiporter during salinity stress. *Plant Physiology*. 136: 2548–2555.
57. Rhoades, J. D.; Corwin, D. L. 1981. Determining soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Science Society of America Journal*. 45: 255–260.
58. Sadras, V.; O'leary, G.; Roget, D. 2005. Crop responses to compacted soil; capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research*. 91: 131-148.
59. Samouëlian, A.; Cousin, I.; Tabbagh, A.; Bruand, A.; Richard, G. 2005. Electrical resistivity survey in soil science; a review. *Soil and Tillage Research*. 83 (2): 173-193.
60. Schachtschabel, P. 1937. Aufnahme von nicht austauschbarem Kalium durch die Pflanze. *Z. Pflanzenernahr.* 48: 107-133.
61. Seiffert, S.; Kaselowsky, J.; Jungk, A.; Claassen, N. 1995. Observed and calculated potassium uptake by maize as affected by soil water content and bulk density. *Agronomy Journal*. 87 (6): 1070-1077.
62. Shipitalo, M. J.; Edwards, W. M. 1993. Seasonal patterns of water and chemical movement in tilled and no-till column lysimeters. *Soil Science Society of America Journal*. 57: 218-223.
63. Steinbach, H. S.; Alvarez, R. 2007. Sistema de labranza y propiedades físicas. (en línea). IPNI. Archivo Agronómico. no. 11. 26 p. Consultado 31 may. 2016. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/755CD604735F8F148525799500785A15/\\$FILE/IA33.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/755CD604735F8F148525799500785A15/$FILE/IA33.pdf)
64. Tan, D.; Jin, J.; Jiang, L.; Huang, S.; Liu, Z. 2012. Potassium assessment of grain producing soils in North China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 148: 65-71.

65. Tiftonell, P.; Vanlauwe, B.; Rider, N.; Giller, E. 2007. Heterogeneity of crop productivity and resource use efficiency within smallholder Kenyan farms; soil fertility gradients or management intensity gradients? *Agricultural Systems*. 94: 376-390.
66. Uribe, E.; Cox, F. 1988. Soil properties affecting the availability of potassium in highly weathered soils. *Soil Science Society of America Journal*. 52: 148-152.
67. Wander, M. M.; Bollero, G. A. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Science Society of America Journal*. 63: 961-971.
68. Wolkowski, R. P. 1990. Relationship between wheel-traffic-induced soil compaction, nutrient availability, and crop growth; a review. *Journal of Production Agriculture*. 3 (4): 460-469.
69. Yadav, R. L. 2003. Assessing on-farm efficiency and economics of fertilizer N, P and K in rice wheat systems of India. *Field Crop Research*. 81: 39-51.
70. Zou, C.; Penfold, C.; Sand, R.; Misra, R. K.; Hudson, I. 2001. Effect of soil air-filled porosity, soil matrix potential and soil strength on primary root growth of radiata pine seedlings. *Plant and Soil*. 236: 105-115.

9. ANEXOS

Anexo 1. Variables de concentración, absorción y producción para el Sitio 1

VARIABLE	TRATAMIENTO			
	Testigo	60 K ₂ O	120 K ₂ O	180 K ₂ O
Rendimiento (kg/ha)*	7099 b	7153 b	7079 b	7618 a
Espigas/m ²	524 a	518 a	512 a	527 a
Granos/espiga	40,2 a	40,5 a	40,2 a	41,5 a
PMG (g)	33,9 a	34,5 a	34,6 a	34,9 a
Biomasa Z65 (kgMS/ha)	8889 b	9678 ab	9841 ab	10749 a
Biomasa cosecha (kgMS/ha)	15997 a	15931 a	15906 a	16715 a
Rastrojo (kg/ha)	9749 a	9636 a	9676 a	10012 a
Índice de cosecha (%)	39,1 a	39,5 a	39,2 a	40,1 a
K en planta Z32 (%)	2,01 b	2,22 ab	2,09 ab	2,53 a
K en planta Z65 (%)	0,82 a	0,71 a	0,77 a	0,85 a
K en hoja bandera Z65 (%)	1,04 a	1,00 a	1,10 a	1,09 a
K en rastrojo (%)	0,31 b	0,29 b	0,36 ab	0,42 a
K en grano (%)	0,35 a	0,35 a	0,36 a	0,34 a
K absorbido Z65 (kg/ha)	73,3 a	68,4 a	82,4 a	84,0 a
K en rastrojo (kg/ha)	30,3 b	27,6 b	35,3 ab	42,1 a
K exportado en grano (kg/ha)	21,9 a	21,9 a	22,5 a	23,1 a
N en planta Z32 (%)	5,06 a	5,05 a	4,80 a	4,83 a
N en planta Z65 (%)	1,87 a	1,92 a	1,77 a	1,93 a
N absorbido Z65 (kg/ha)	166,4 a	185,1 a	192,0 a	190,0 a

Medias en la fila con letra común no son significativamente diferentes. Test LSD Fisher ($p < 0,05$). *Humedad de grano a la cosecha: 12 %; MS: materia seca.

Anexo 2. Variables de concentración, absorción y producción para el Sitio 2

VARIABLE	TRATAMIENTO			
	Testigo	60 K ₂ O	120 K ₂ O	180 K ₂ O
Rendimiento (kg/ha)*	7347 a	6904 a	7054 a	6910 a
Espigas/m ²	499 a	481 a	494 a	496 a
Granos/espiga	42,7 a	39,2 a	39,9 a	37,0 a
PMG (g)	35,0 a	36,7 a	36,1 a	37,8 a
Biomasa Z65 (kgMS/ha)	10272 a	10504 a	8924 a	9586 a
Biomasa cosecha (kgMS/ha)	15640 a	14717 a	15369 a	14691 a
Rastrojo (kg/ha)	9174 a	8641 a	9161 a	8610 a
Índice de cosecha (%)	41,4 a	41,4 a	40,6 a	41,5 a
K en planta Z32 (%)	1,97 a	2,30 a	2,23 a	2,43 a
K en planta Z65 (%)	0,66 b	0,77 ab	0,89 a	0,90 a
K en hoja bandera Z65 (%)	0,89 a	0,90 a	0,88 a	1,02 a
K en rastrojo (%)	0,30 a	0,26 a	0,29 a	0,34 a
K en grano (%)	0,32 a	0,33 a	0,32 a	0,31 a
K absorbido Z65 (kg/ha)	68,1 a	81,2 a	78,8 a	86,0 a
K en rastrojo (kg/ha)	27,5 a	22,7 a	26,9 a	29,6 a
K exportado en grano (kg/ha)	20,6 a	20,0 a	19,8 a	19,0 a
N en planta Z32 (%)	4,69 a	4,65 a	4,65 a	4,53 a
N en planta Z65 (%)	1,90 a	1,72 a	1,83 a	1,67 a
N absorbido Z65 (kg/ha)	197,8 a	180,7 a	163,1 a	159,4 a

Medias en la fila con letra común no son significativamente diferentes. Test LSD Fisher ($p < 0,05$). *Humedad de grano a la cosecha: 12 %; MS: materia seca.

Anexo 3. Variables de concentración, absorción y producción para el Sitio 3

VARIABLE	TRATAMIENTO			
	Testigo	60 K ₂ O	120 K ₂ O	180 K ₂ O
Rendimiento (kg/ha)*	5458 a	5284 a	5794 a	5905 a
Espigas/m ²	405 a	398 a	421 a	407 a
Granos/espiga	41,3 a	39,7 a	41,1 a	41,3 a
PMG (g)	32,7 c	33,4 bc	33,8 b	35,2 a
Biomasa Z65 (kgMS/ha)	6035 b	6137 b	6616 ab	7515 a
Biomasa cosecha (kgMS/ha)	11737 a	11301 a	12481 a	12241 a
Rastrojo (kg/ha)	6934 a	6651 a	7383 a	7045 a
Índice de cosecha (%)	41,1 a	41,1 a	41,1 a	42,5 a
K en planta Z32 (%)	1,03 b	1,31 ab	1,61 ab	1,89 a
K en planta Z65 (%)	0,37 c	0,49 bc	0,60 ab	0,73 a
K en hoja bandera Z65 (%)	0,54 c	0,69 bc	0,79 ab	0,92 a
K en rastrojo (%)	0,18 a	0,16 a	0,23 a	0,23 a
K en grano (%)	0,33 a	0,33 a	0,32 a	0,33 a
K absorbido Z65 (kg/ha)	22,3 c	30,4 bc	40,3 b	54,9 a
K en rastrojo (kg/ha)	12,3 a	10,8 a	17,1 a	15,9 a
K exportado en grano (kg/ha)	16,1 a	15,3 a	16,3 a	17,3 a
N en planta Z32 (%)	4,46 a	4,59 a	3,95 b	4,02 b
N en planta Z65 (%)	1,36 a	1,39 a	1,37 a	1,44 a
N absorbido Z65 (kg/ha)	81,7 b	85,0 b	91,1 ab	107,3 a

Medias en la fila con letra común no son significativamente diferentes. Test LSD Fisher ($p < 0,05$). *Humedad de grano a la cosecha: 12 %; MS: materia seca.