

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**DINÁMICA DEL POTASIO EN SUELOS AGRÍCOLAS DEL
LITORAL OESTE DE URUGUAY**

por

Agustín NÚÑEZ RUSSI

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magíster en Ciencias Agrarias
opción Ciencias del Suelo

MONTEVIDEO
URUGUAY
Noviembre 2014

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. (PhD) Mónica Barbazán, Ing. Agr. (PhD) Armando Rabuffetti, Ing. Agr. (PhD) Fernando García, Ing. Agr. (PhD) Jorge Sawchik e Ing. Agr. (MSc) Jorge Hernández el 10 de febrero de 2015. Autor: Ing. Agr. Agustín Núñez. Director: Ing. Agr. (Dr.) Alejandro Morón.

AGRADECIMIENTOS

Al personal del estable de suelos y del laboratorio de suelos de INIA La Estanzuela por su apoyo durante todo el experimento, principalmente a Agustina Cabrera y Lalo Vergara por su ayuda durante el experimento en invernáculo y a Rosario Oten por su aporte durante los análisis de suelo.

Al INIA por permitirme realizar la maestría como parte de mi trabajo en el instituto y brindarme apoyo en todo momento y a la Facultad de Agronomía por darme la oportunidad de continuar mi formación académica.

A Carlos Boutes por la ayuda en la selección de los suelos y a Juan Molfino por la ayuda en la selección y clasificación de los suelos. A Daniel Poire del Centro de Investigaciones Geológicas de La Plata por el análisis de la mineralogía de los suelos.

A mis compañeros de suelos de Estanzuela, Adriana García, Andrés Quincke, Andrés Beretta, Valentina Rubio y Jorge Sawchik y demás compañeros de INIA que me ayudaron durante todo este tiempo.

A mi familia y amigos por su presencia constante en todo momento, especialmente a mis padres por su apoyo incondicional.

En forma especial a mi director Alejandro Morón por su respaldo permanente durante este largo proceso, su guía me permitió superar los inconvenientes del camino y valorarlos como parte del aprendizaje.

A Nani, por todo.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. POTASIO EN LA PLANTA	2
1.2. POTASIO EN EL SUELO	4
1.2.1. <u>Formas de potasio en el suelo</u>	4
1.2.2. <u>Minerales potásicos</u>	6
1.2.2.1. Feldespatos	7
1.2.2.2. Micas	7
1.2.2.3. Minerales arcillosos	9
1.2.3. <u>Factores que afectan la disponibilidad de potasio</u>	11
1.2.3.1. Textura y componentes de la fracción arcilla	12
1.2.3.2. Fijación y liberación de potasio	15
1.2.3.3. Humedad y temperatura del suelo	17
1.2.3.4. Aireación y compactación	19
1.2.3.5. pH	20
1.2.3.6. Cationes acompañantes del potasio	22
1.2.3.7. Otros nutrientes	23
1.2.3.8. Potasio en el subsuelo	24
1.2.4. <u>Pérdidas de potasio</u>	25
1.3. SITUACIÓN NACIONAL	27
1.4. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DEL POTASIO DISPONIBLE	36
2. <u>DINÁMICA DEL POTASIO EN SUELOS AGRÍCOLAS DEL URUGUAY</u>	47

2.1. RESUMEN.....	48
2.2. SUMMARY.....	49
2.3. INTRODUCCIÓN.....	50
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	52
2.4.1. <u>Suelos</u>	52
2.4.2. <u>Capacidad de aporte de potasio y respuesta a la fertilización</u>	54
2.4.3. <u>Destino del potasio agregado (incubaciones)</u>	56
2.4.4. <u>Análisis de los datos</u>	56
2.5. RESULTADOS.....	57
2.5.1. <u>Comportamiento vegetal</u>	57
2.5.1.1. Extracción de potasio	57
2.5.1.2. Recuperación aparente del fertilizante	59
2.5.2. <u>Relación suelo vegetal</u>	60
2.5.2.1. Aporte de potasio no intercambiable	60
2.5.2.2. Capacidad predictiva de los análisis de potasio en condiciones de no fertilización	61
2.5.2.3. Capacidad predictiva de los análisis de potasio en condiciones de fertilización	63
2.5.2.4. Balances en invernáculo	64
2.5.3. <u>Destino del potasio agregado (incubaciones)</u>	66
2.6. DISCUSIÓN.....	67
2.7. CONCLUSIONES.....	72
2.8. BIBLIOGRAFÍA	72
3. <u>DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES GLOBALES</u>	76
4. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	81
5. <u>ANEXOS</u>	94

RESUMEN

La intensificación agrícola ocurrida en Uruguay en los últimos años ha generado una disminución en el contenido de potasio (K) de los suelos, así como un aumento de situaciones con deficiencia o respuesta a la fertilización potásica. Conocer la dinámica del K en los suelos es fundamental para un correcto manejo de este nutriente. En este trabajo se presenta una revisión bibliográfica del tema, con énfasis en los factores que hacen a la disponibilidad del K y los métodos químicos más promisorios para la determinación de las reservas de K disponibles para los cultivos. En una segunda parte se presentan los resultados de un trabajo, realizado en suelos agrícolas de Uruguay, cuyos objetivos fueron: (i) evaluar un indicador que permita cuantificar el *pool* de reserva de K y (ii) estudiar el comportamiento de K en distintos suelos del Litoral Oeste de Uruguay frente a la fertilización. Se instaló un experimento en invernáculo con raigrás perenne (*Lolium perenne*, cv. Horizon) en seis suelos agrícolas fertilizados previo a la siembra con 0, 100, 200 y 400 mg K kg suelo⁻¹. El experimento duró 320 días durante los cuales se realizaron cinco evaluaciones de rendimiento y concentración de K en planta, generándose distintos balances. En cada una de esas evaluaciones se determinó la evolución del K en suelo con dos métodos: acetato de amonio 1 N a pH 7 (NH₄OAc) y tetrafenilborato de sodio (NaTPB). Los suelos estudiados presentaron diferencias significativas ($p < 0,01$) tanto en su capacidad de aporte de K al raigrás como en la respuesta vegetal a la fertilización, lo cual estuvo asociado al contenido de K y a la presencia de illita. Se destaca la alta capacidad de suministro de K de los suelos desarrollados sobre Fray Bentos, donde las reservas de K fueron una fuente efectiva para el raigrás. El NaTPB extrae, además del K intercambiable, una parte del K no intercambiable lo que explicaría su mejor estimación del K disponible y la mayor capacidad de reflejar los balances de K en los suelos comparado con el NH₄OAc. Por este motivo es considerado un método promisorio para estimar las reservas de K y monitorear la evolución del nutriente en el suelo.

Palabras clave: potasio no intercambiable, reservas de potasio, illita, tetrafenilborato de sodio, acetato de amonio

POTASSIUM DYNAMICS IN AGRICULTURAL SOILS

SUMMARY

Recent agricultural intensification occurred in Uruguay has generated soil potassium (K) depletion and a rising frequency of crops with deficiencies that respond to K fertilization. The knowledge of soil K dynamics is essential for the right management of this nutrient. This thesis includes a literature review emphasizing the most important factors controlling K availability and the existing chemical methods to determine plant- available soil K reserves. In the second part, results of research developed in agricultural Uruguayan soils are discussed with the following objectives: (i) to evaluate a method of soil analysis that allows quantification of plant-available non-exchangeable K and (ii) to compare soil responses to K fertilization. Perennial ryegrass (*Lolium perenne*, cv. Horizon) was grown in a greenhouse experiment in six agricultural soils fertilized with 0, 100, 200 and 400 mg K kg⁻¹. Five measurements of yield and plant K concentration were done during 320 days, resulting in different soil K balances. Ammonium acetate- (NH₄OAc) and sodium tetraphenylboron- (NaTPB) extractable K were determined in two soil samples in every evaluation. The studied soils had significant differences ($p < 0.01$) in K-supplying power and plant response to fertilization, which were associated to soil K content and illite content. The high K supplying power of soil developed on "Fray Bentos" parent material was notable as they had plant-available soil K reserves. Compared with the NH₄OAc, the superior estimation of plant-available K and the strongest relationship with soil K balance of the NaTPB method was due to the capacity of the latter to extract exchangeable K plus a proportion of nonexchangeable K but available to plants. The NaTPB method is considered promising to estimate soil K reserves and to monitor K evolution in soil.

Keywords: nonexchangeable potassium, potassium reserves, illite, sodium tetraphenylboron, ammonium acetate

1. INTRODUCCIÓN

Desde comienzo de siglo el área de siembra de cultivos de secano en Uruguay aumentó más de cuatro veces, pasando de 373.000 ha en el 2000/2001 a superar el 1.791.000 ha en el 2012/2013 (DIEA, 2013). Los sistemas agrícolas cambiaron de una rotación de agricultura con pasturas a una rotación agrícola continua. El aumento del área de siembra estuvo liderado principalmente por el cultivo de soja, que superó el millón de hectáreas sembradas, y acompañado por un aumento de la intensidad agrícola, que pasó de 1,1 a 1,5 cultivos por año. Este proceso de intensificación generó un aumento en la producción de granos y, asociado a esto, un aumento en la extracción de nutrientes. Tomando como referencia la concentración en granos reportada por García y Correndo (2013), la extracción total de potasio (K) en la zafra 2012/2013 fue de casi 64.000 toneladas de K_2O para el área de siembra ya mencionada.

El K es un macronutriente principal requerido en grandes cantidades por las plantas, lo que hace prioritario asegurar su correcto suministro. Históricamente la agricultura en el país se realizó sobre suelos con contenidos medios a altos de K, donde no se recomendaba su agregado vía fertilizante, lo que causó un balance sistemáticamente negativo de este nutriente. Como consecuencia, en los sistemas agrícolas han aumentado las situaciones donde se comprueba una disminución en los contenidos de K intercambiable de los suelos, así como la necesidad de fertilización potásica para el logro de altos rendimientos (Barbazán et al. 2011a, Morón y Quincke 2010). Por otro lado es un insumo con un peso importante en la estructura de costos, por lo que la fertilización en situaciones donde no sea necesaria podría comprometer el resultado económico.

Para un correcto manejo de la nutrición potásica es fundamental contar con estimaciones fiables de la disponibilidad de K así como de la evolución de esta disponibilidad. El rol de las reservas de K, no determinadas con el análisis de K intercambiable, es fundamental en la nutrición vegetal por lo que lograr su cuantificación y monitoreo es extremadamente importante (Wang et al. 2010, Cox et al. 1999, Bertsch y Thomas 1985). Sin embargo, estimar el K liberado desde formas no intercambiables, que pasa a estar disponible para un cultivo, es muy difícil dada la

complejidad del equilibrio dinámico que existe entre las distintas fracciones de K del suelo (Zörb et al., 2014). A pesar del aumento en la cantidad de trabajos nacionales de investigación sobre K ocurrido en los últimos años, el conocimiento sobre las reservas y su dinámica es aun escaso.

El objetivo general de este trabajo fue aportar al conocimiento de la dinámica del K en suelos agrícolas. Para esto se presenta primero una revisión bibliográfica sobre este nutriente, con énfasis en los factores que hacen a su dinámica y disponibilidad y los métodos químicos más promisorios para la determinación de las reservas de K disponibles para los cultivos. Luego se presentan, en formato de artículo científico, los trabajos realizados con el objetivo de identificar un indicador para la cuantificación de las reservas de K y conocer el comportamiento de diferentes suelos frente a la fertilización y los distintos balances de K. El artículo científico cumple con las normas de la revista Ciencia del Suelo, que se encuentran especificadas en http://www.suelos.org.ar/instrucciones_autores.html

1.1. POTASIO EN LA PLANTA

El potasio (K), uno de los macronutrientes principales, es junto con el nitrógeno el nutriente mineral requerido en mayor cantidad por las plantas (Oosterhuis et al. 2014, Zörb et al. 2014, Marschner 1995). Sus requerimientos para un crecimiento óptimo se encuentran en el rango de 20-50 g kg⁻¹ del peso seco de la planta en las partes vegetativas, frutas carnosas y tubérculos (Marschner, 1995). Aumentando la oferta de K a las raíces de las plantas es relativamente fácil incrementar su contenido en varios órganos, excepto granos y semillas, los cuales mantienen un contenido de K relativamente constante de 3 g kg⁻¹ de su peso seco (Zörb et al. 2014, Marschner 1995). Dado que no forma parte de los tejidos vegetales se caracteriza por su alta movilidad en la planta en todos los niveles (Marschner, 1995).

Las funciones del K en la planta son numerosas: participa en la regulación osmótica, en el balance catiónico-aniónico, como activador enzimático y regulador del pH, siendo requerido para la síntesis de proteínas y afectando la fotosíntesis al participar en la fijación de CO₂ (Hafsi et al. 2014, Marschner 1995). También

interviene en el crecimiento celular, control de la apertura estomática, transporte floemático y movimientos de las plantas al controlar la turgencia de los tejidos ya que es el catión principal en la vacuola. En el citoplasma cumple funciones bioquímicas importantes y no puede ser reemplazado por otros solutos, mientras que en la vacuola está involucrado principalmente en la regulación del potencial osmótico y la turgencia (Hafsi et al., 2014). El impacto del K sobre la fotosíntesis ocurre a partir de dos mecanismos: (1) interceptación de la radiación solar y (2) fotosíntesis por unidad de área foliar; regulando en conjunto la cantidad de fotoasimilados disponibles para el crecimiento vegetal (Oosterhuis et al., 2014).

Cuando existen deficiencias de K el crecimiento se retrasa y el K es translocado desde las hojas y tallos maduros pudiendo estos órganos presentar clorosis y necrosis (Oosterhuis et al. 2014, Marschner 1995). Según Römheld y Kirkby (2010), la reducción en la tasa de crecimiento ocurre antes de que aparezcan los síntomas de deficiencia, ocurriendo una “deficiencia oculta” del nutriente. La falta de K genera una reducción del índice de área foliar por un menor número total de hojas producidas y también por menor tamaño individual de cada hoja (Oosterhuis et al., 2014). De acuerdo con estos autores también disminuye la tasa de fotosíntesis por unidad de área foliar. Dado el rol de este nutriente en la tolerancia a factores adversos, las plantas con deficiencias de K son más susceptibles al estrés hídrico, heladas, ataques de hongos y otros factores bióticos (Oosterhuis et al. 2014, Marschner 1995).

Las estrategias adaptativas de las plantas frente a situaciones de deficiencia de K son variadas e incluyen cambios físicos y bioquímicos para mejorar la eficiencia de absorción y uso del K disponible. La capacidad adaptativa difiere entre cultivos y también entre cultivares dentro de una misma especie. Detalles sobre las funciones del K y los procesos fisiológicos de adaptación de las plantas escapan al objetivo de este trabajo y han sido estudiadas profundamente en trabajos recientes (Hafsi et al. 2014, Oosterhuis et al. 2014, Zörb et al. 2014, White 2013, Lester et al. 2010).

1.2. POTASIO EN EL SUELO

1.2.1. Formas de potasio en el suelo

El contenido de K en un determinado suelo es el resultado de la influencia del material parental de ese suelo, del grado de meteorización y del balance generado por la diferencia entre las entradas y salidas de K al sistema (Bertsch y Thomas, 1985). Las entradas corresponden al K agregado vía fertilizante y vía deposición atmosférica, mientras que las salidas se deben a la remoción de los cultivos y al K perdido por erosión y lixiviación (Simonsson et al. 2009, Simonsson et al. 2007, Bertsch y Thomas 1985). La deposición atmosférica sería generalmente baja ($2-3 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y significativamente menor que las pérdidas por lixiviación (Simonsson et al. 2007, Öborn et al. 2005).

Los suelos minerales generalmente contienen entre 0,04 y 3% de K (Sparks, 1987) siendo usualmente el macronutriente más abundante en el suelo (Blake et al., 1999). Sin embargo esta abundancia no asegura niveles de suficiencia para los cultivos, ya que el K disponible para la absorción vegetal representa menos del 2 al 10% del K total del suelo (White, 2013). Las formas de K presentes en el suelo pueden dividirse en cuatro fracciones: K en la solución del suelo, K intercambiable, K no intercambiable y K mineral (Havlin et al. 2005, Sparks y Huang 1985). Como se observa en la Figura 1.1, estas fracciones se encuentran en equilibrio dinámico y difieren en su disponibilidad para las plantas (Sparks, 1987). Según Havlin et al. (2005) el K en solución más el intercambiable representan el 0,1-2% del total de K presente en el suelo, encontrándose el 1-10% como K no intercambiable y el 90-98% restante como K mineral.

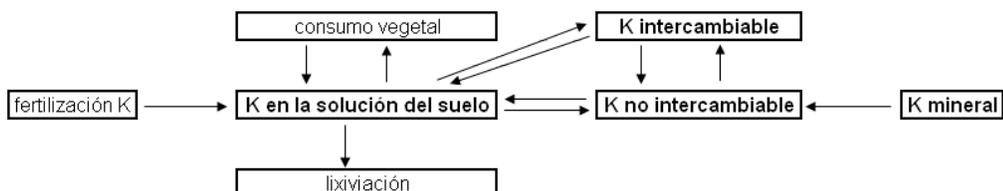


Figura 1.1: Dinámica de las diferentes fracciones de potasio en el suelo (Bertsch y Thomas, 1985).

El K se encuentra en la solución del suelo en forma de ion K^+ , desde donde es suministrado a las raíces de las plantas por difusión y flujo masal o puede perderse por lixiviación (Zörb et al. 2014, Sparks y Huang 1985). La cantidad de K en la solución del suelo es demasiado baja para cubrir los requerimientos de un cultivo durante una estación de crecimiento (Sparks y Huang, 1985). Según estos autores, para una óptima nutrición de un cultivo la reposición del K en solución ocurre principalmente por la liberación del K intercambiable de los minerales arcillosos y la materia orgánica. La liberación de K intercambiable a la solución del suelo se llama desorción, mientras que el pasaje del K en solución a K intercambiable es llamado adsorción (Kirkman et al. 1994, Sparks 1987).

El K intercambiable se encuentra retenido por las cargas negativas de los minerales arcillosos y la materia orgánica del suelo, siendo fácilmente intercambiado con otros cationes y alcanzando rápidamente el equilibrio con la solución del suelo (Römheld y Kirkby 2010, Sparks 1987). De acuerdo con Kirkman et al. (1994), el contenido de K intercambiable se relaciona principalmente con el tipo de arcilla y su carga negativa neta. Se considera rápidamente disponible para las plantas y su determinación es generalmente, aunque no siempre, un indicador del aporte de K para las plantas (Römheld y Kirkby, 2010). De acuerdo con Sparks y Huang (1985), el stock de K intercambiable es frecuentemente suficiente para satisfacer los requerimientos de un cultivo, pero demasiado pequeño para ser capaz de cubrir los requerimientos de varios cultivos sucesivos.

El K no intercambiable o fijado se encuentra retenido en el espacio interlaminar de los minerales micáceos, vermiculitas y minerales arcillosos transicionales, por lo que no está fácilmente disponible para el intercambio con otros cationes (Kirkman et al. 1994, Sparks 1987, Sparks y Huang 1985). De acuerdo con Kirkman et al. (1994), la cantidad de K no intercambiable de un suelo depende del tipo y cantidad de minerales arcillosos, de su grado de meteorización y de la adición y remoción de K desde los minerales. A diferencia del equilibrio entre el K en solución y el K intercambiable, el intercambio entre el K en solución y el K no intercambiable es relativamente lento (White, 2013) y ocurre por medio de los procesos de liberación y fijación (Kirkman et al., 1994). Havlin et al. (2005)

sostienen que a pesar de que las reservas de K no intercambiable no siempre están disponibles de forma inmediata, pueden contribuir de manera significativa al mantenimiento del K intercambiable. El nombre K no intercambiable no se corresponde entonces con su capacidad de ser una fuente efectiva de K para las plantas, siendo nombrado por algunos autores como K lentamente intercambiable o de reserva (e.g. Zörb et al. 2014, Römheld y Kirkby 2010, Wang et al. 2010, Carey y Metherell 2003a y b, Surapaneni et al. 2002a y b, Cox et al. 1999).

El K mineral o estructural se encuentra unido dentro de la estructura cristalina de las partículas de minerales primarios del suelo, principalmente feldespatos y micas (Helmke y Sparks 1996, Sparks 1987). La liberación del K mineral hacia formas más disponibles ocurre por la meteorización de los minerales primarios (Sparks, 1987) y, según Attoe y Truog (1946), la cantidad liberada en un año no llega a cubrir el 10% de los requerimientos de un buen cultivo. Sin embargo, de acuerdo con Sparks (1987), su disponibilidad depende de varios factores como ser el contenido de K en las otras fracciones y el grado de meteorización de los feldespatos y micas que componen esta fracción. Kirkman et al. (1994) sostienen que la distinción entre K fijado y K estructural es que la liberación del K fijado es reversible mientras que la liberación del K estructural es irreversible.

1.2.2. Minerales potásicos

La mineralogía del suelo y el grado de meteorización del material parental son determinantes de la dinámica del K, afectando la cinética de intercambio del K en suelos y minerales arcillosos (Sparks 1987, Bertsch y Thomas 1985). Los dos grupos principales de minerales primarios portadores de K son las micas y los feldespatos potásicos, por lo que su meteorización es la que determina la cantidad de K liberada (Havlin et al. 2005, Blake et al. 1999). La fracción de K mineral proveniente de los feldespatos aumenta con aumentos en el tamaño de las partículas, siendo mayor la participación de las micas en las fracciones más finas (Sparks, 1987). Otros minerales portadores de K son los minerales arcillosos como illita (mica hidratada), vermiculita y clorita, así como aluminosilicatos pobremente ordenados, zeolitas y otros componentes (Bertsch y Thomas 1985, Sparks y Huang 1985). De acuerdo con

Zörb et al. (2014), un mejor entendimiento de los mecanismos de liberación del K desde los minerales del suelo es clave para el desarrollo de nuevos abordajes para una agricultura sustentable.

1.2.2.1. Feldespatos

Los feldespatos potásicos son ortoclasa y microclina, con una composición química ideal (KAlSi_3O_8) que raramente ocurre en la naturaleza (Havlin et al. 2005 Sparks 1987). En la estructura de estos feldespatos uno de cada cuatro átomos de silicio es reemplazado por aluminio (Al), generándose una carga negativa en la estructura que es neutralizada por la incorporación de otros iones con carga positiva, como ser el K^+ (Sparks, 1987). La disponibilidad relativa del K presente en los feldespatos es menor que en las micas y su liberación ocurre, por destrucción del mineral, directamente a la solución del suelo (Havlin et al. 2005, Blake et al. 1999). Según Sparks y Huang (1985) a pesar de que la liberación de K de los feldespatos es más complicada que de las micas, el rol de los feldespatos potásicos como fuente de K para las plantas no puede ser ignorado porque estos son la mayor reserva natural de muchos suelos.

1.2.2.2. Micas

Las micas son minerales cristalinos silicatados de ordenamiento laminar, cuya estructura consiste en capas cargadas negativamente con una distribución 2:1 unidas por cationes con posición interlaminar (Sparks y Huang, 1985). La estructura laminar 2:1 está compuesta por una lámina de octaedros de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$) entre dos láminas de tetraedros de silicio (SiO_4^{4-}) (Sparks y Huang, 1985). Al igual que en el caso de los feldespatos, uno de cada cuatro átomos de silicio es reemplazado por aluminio, generándose una carga residual negativa (Malavolta, 1985). En las micas portadoras de K, el cation interlaminar que neutraliza las cargas negativas es principalmente el ion K^+ (Sparks, 1987) el cual se encuentra firmemente retenido por fuerzas electrostáticas (Blake et al., 1999). Las micas portadoras de K son muscovita ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), biotita ($\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) y flogopita ($\text{KMg}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) (Havlin et al., 2005), siendo muscovita y biotita las más

abundantes en rocas metamórficas e ígneas (Sparks 1987, Sparks y Huang 1985). De acuerdo con estos autores, las micas generalmente son más abundantes en sedimentos finos y rocas sedimentarias (arcillas, pizarras) que en rocas sedimentarias de textura más gruesa (areniscas).

La liberación de K de las micas sucede por medio de dos procesos: (i) la transformación de las micas portadoras de K en silicatos expansibles 2:1 por intercambio del K^+ con cationes hidratados y (ii) la disolución de las micas seguido por la formación de productos de meteorización (Sparks y Huang, 1985). Según Sparks (1987), la importancia relativa de estos dos mecanismos depende de la estabilidad de las micas y de la naturaleza del ambiente edáfico. Las bajas concentraciones de K en la solución favorecen la liberación del K interlaminares, por lo cual la disminución del K en solución por absorción radicular o por lixiviación puede inducir la liberación de K no intercambiable (Havlin et al., 2005).

Según Bertsch y Thomas (1985), la meteorización de las micas comienza en los bordes, avanzando sucesivamente hacia el centro de la partícula, con expansión de los espacios interlaminares acompañando las reacciones de disolución-liberación de K^+ . En la Figura 1.2 se presenta el proceso de mineralización de una mica y sus productos. La liberación gradual de K resulta en la formación de mica hidratada y eventualmente vermiculita, hay además un incremento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) siguiendo la transformación de la mica (Havlin et al., 2005). Según estos autores, la liberación de K puede ocurrir desde todas las posiciones interlaminares o puede ser solo de láminas alternadas, dándose la formación de mica-vermiculita interestratificada. La transformación de mica en vermiculita depende de un ambiente con alto poder de lixiviación que remueva el K en solución (Sparks 1987, Sparks y Huang 1985).

La meteorización de la biotita sería mucho más rápida que en el caso de la muscovita, generando una mayor disponibilidad de K para las plantas (Havlin et al. 2005, Bertsch y Thomas 1985). Scott et al. (1960), utilizando tetrafenilborato de sodio como extractante, encontraron que el K en los minerales dioctaédricos (muscovita, illita) fue más difícil de remover que el K en los minerales trioctaédricos (biotita en la muestra de muscovita). Mortland et al. (1957) estudiaron la liberación

de K por diferentes minerales, utilizando métodos químicos, crecimiento vegetal y electrodiálisis y encontraron que la liberación de K fue más fácil en vermiculita y montmorillonita que en illita y muscovita. En suelos muy meteorizados las micas trioctaédricas son poco comunes, por lo que las en las arcillas de la mayoría de los suelos predominan micas dioctaédricas (Sparks, 1987).

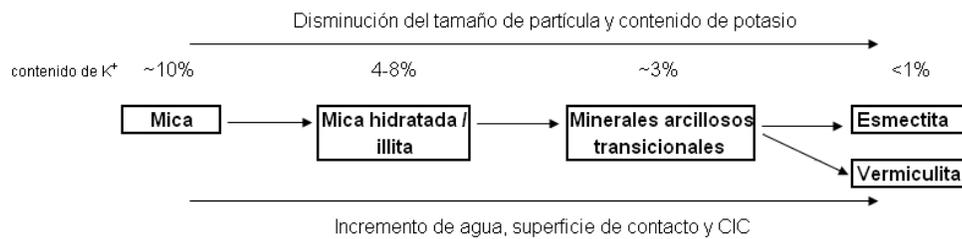


Figura 1.2: Transformación de minerales micáceos en micas del suelo y minerales arcillosos durante la meteorización (Bertsch y Thomas, 1985).

Según Bertsch y Thomas (1985), muchos suelos de regiones templadas tienen una mezcla compleja de minerales micáceos y sus productos de meteorización. En general, se puede anticipar que los suelos con contenidos significativos de componentes micáceos van a poseer propiedades únicas en su status y comportamiento químico de K. Sin embargo, la naturaleza exacta de estas relaciones es muy compleja y difícil de predecir *a priori* cuando sólo se encuentra disponible la información mineralógica; las relaciones parecen ser más dependientes de la historia de mineralización o de la historia de cultivos (o ambas) (Bertsch y Thomas, 1985).

1.2.2.3. Minerales arcillosos

Si bien el término arcilla es utilizado también para determinar la fracción de suelo de tamaño menor a 2 μm (fracción arcilla), la definición mineralógica se refiere a los minerales secundarios formados por alteración de los minerales primarios, principalmente micas. Se presenta a continuación una breve descripción de los principales minerales arcillosos que participan en la dinámica del K. Otros grupos de arcillas, como ser cloritas o minerales arcillosos no cristalinos como el alofano, si

bien pueden contener cantidades variables de K no serían (por cantidad o reactividad) tan determinantes en la dinámica de este nutriente.

La illita es el mineral arcilloso 2:1 con mayor contenido de K, tiene generalmente baja capacidad de intercambio de otros iones (Ca, Mg, Na) pero un alto potencial de acumular K (Barré et al., 2007). Según Churchman y Lowe (2012), el término illita también se utiliza en la ciencia del suelo para describir minerales micáceos cuyo tamaño corresponde a la fracción arcilla ($< 2 \mu\text{m}$), mientras que ciertos autores utilizan el término hidromica. Barré et al. (2007) sostienen que los minerales illíticos funcionan como un reservorio de K, el cual puede ser agotado por la absorción vegetal y repuesto con agregados de K o translocación desde otras capas del suelo.

El grupo de las esmectitas (2:1, expansivas) normalmente tiene un bajo contenido de K pero una alta CIC, por lo que estas arcillas son importantes en el intercambio de Ca y Mg y en menor medida de K (Barré et al., 2008a). Este grupo incluye todos los minerales formalmente clasificados en el grupo de las montmorillonitas (Sparks 1987, Sparks y Huang 1985). La meteorización de las micas resulta en una disminución del tamaño de partícula, aumento de la superficie específica y de las cargas negativas, por lo que suelos con contenidos altos de esmectita pueden tener mayores niveles de K intercambiable que otros conteniendo minerales micáceos interstratificados (illita), pero estos últimos tendrían mayores contenidos de K no intercambiable disponible para los cultivos (Kirkman et al., 1994).

La vermiculita también posee una estructura laminar silicatada 2:1 ya que se forma a partir de meteorización de las micas cuando la carga de éstas disminuye, causando la hidratación del espacio interlaminar y el desplazamiento del K por otros cationes como Ca y Mg (Officer et al., 2006). Según Sparks y Huang (1985), las esmectitas junto con la vermiculita son responsables de una gran proporción de la CIC de los suelos de regiones templadas.

La caolinita es un mineral arcilloso de estructura laminar 1:1 formado en condiciones ácidas de meteorización y de distribución generalizada en los suelos, siendo más abundante en suelos de clima húmedo (Sparks, 1987). A diferencia de las

arcillas 2:1 no contiene materiales interlaminares y el intercambio catiónico ocurre únicamente en las superficies externas (Rich, 1968) por lo que no contiene K no intercambiable. Suelos con predominancia de caolinita son generalmente pobres en K y con el equilibrio desplazado hacia las fracciones más lábiles (Sharpley, 1989). En los suelos forman frecuentemente interstratificados con esmectita (Churchman y Lowe, 2012).

A pesar de las características propias mencionadas para cada grupo de arcillas, en los suelos ocurre generalmente una mezcla compleja de arcillas y minerales micáceos que afectarán la dinámica del K en función de cual o cuales sean las arcillas dominantes (Churchman y Lowe 2012, Barré et al. 2008a, Sharpley 1989, Bertsch y Thomas 1985). La mezcla de arcillas ocurre también en forma de interstratificados (principalmente mezclas de láminas de illita y esmectita en la misma partícula) con propiedades intermedias entre ambos grupos.

A partir de las propiedades de cada tipo de mineral arcilloso, es esperable que suelos con mayores contenidos de illita tengan una mayor cantidad de reservas de K y logren mantener el aporte a los cultivos en el tiempo. Además, en caso de fertilización, las pérdidas del K agregado serán bajas por la capacidad de retención en la fase sólida, principalmente en el espacio interlaminar de estas arcillas. Por otra parte, suelos caoliníticos probablemente precisen de la fertilización para mantener niveles adecuados de K y además el riesgo de pérdida del K agregado será mayor por su poca capacidad de retención de K. La estrategia más adecuada para estos suelos sería el uso de fertilizaciones frecuentes con dosis no excesivas de K, que cubran los requerimientos del cultivo minimizando el riesgo de pérdidas por lixiviación.

1.2.3. Factores que afectan la disponibilidad de potasio

Según Bertsch y Thomas (1985), la fracción de K disponible para las plantas es dependiente de las dinámicas existentes entre las distintas fases del K y, tal vez más importante aún, de la tasa de transferencia entre las fases. Muchas de estas reacciones en suelos de regiones templadas son bastante complejas y son afectadas por numerosas propiedades físicas y químicas de los suelos, así como por la relación suelo-planta y la actividad microbiana (Zörb et al. 2014, Bertsch y Thomas 1985).

Por este motivo, la predicción del K disponible para las plantas es con frecuencia extremadamente difícil (Bertsch y Thomas, 1985) siendo necesario considerar los distintos factores que afectan la disponibilidad de K para un manejo adecuado de la fertilización.

1.2.3.1. Textura y componentes de la fracción arcilla

La importancia del contenido y tipo de minerales arcillosos de un suelo sobre la dinámica y disponibilidad de K es ampliamente reportada en la literatura. En general, el contenido de arcilla se relaciona más con el K fácilmente disponible mientras que las reservas de K dependen en mayor medida del tipo de mineral arcilloso. Cuanto mayor es la proporción de minerales arcillosos ricos en K, mayor es el potencial de K disponible en un suelo (Havlin et al., 2005). Por este motivo, la textura junto con la mineralogía afectan la relación entre las distintas fracciones de K del suelo (Sharpley, 1989).

Havlin et al. (2005) sostienen que a pesar que suelos de textura fina usualmente tienen una mayor CIC y pueden mantener más K intercambiable, esto no siempre resulta en más K en solución. Según estos autores, el K en solución en suelos de textura fina puede ser considerablemente más bajo que en suelos de textura gruesa a un mismo nivel de K intercambiable. De acuerdo con Conti y García (2005), el menor contenido de K en solución se ve compensado por la mayor velocidad de reposición y su capacidad de hacerlo por más tiempo que tienen los suelos con mayor CIC.

Hernández et al. (1988), al correlacionar las fracciones granulométricas de los suelos con las distintas fracciones químicas de K para 13 suelos del Uruguay, encontraron relación entre el porcentaje de arcilla de los suelos y las fracciones K total y K intercambiable, pero no con K no intercambiable. En el K intercambiable hubo una fuerte influencia del porcentaje de arcilla, en tanto que las correlaciones con K no intercambiable indicarían una incidencia importante del tipo de minerales arcillosos en los contenidos de esta fracción (Hernández et al., 1988). Según Havlin et al. (2005), suelos conteniendo vermiculita, montmorillonita o mica tienen más K que suelos conteniendo arcillas caoliníticas, las cuales son más meteorizadas y bajas

en este nutriente. Esto coincide con los resultados de Hernández et al. (1988) donde los niveles más elevados de K se asociaron con la presencia de minerales ricos en K en la fracción arcilla (illita).

Sharpley (1989) clasificó 102 suelos en tres grupos según su taxonomía y la mineralogía de la fracción arcilla en: caoliníticos con dominancia de arcillas 1:1; esmectíticos con dominancia de filosilicatos expansivos y arcillas micáceas (clasificados como suelos illíticos montmorilloníticos); y un grupo mezcla con suelos no definidos en ninguno de los otros grupos. Encontró diferencias significativas entre los grupos de suelo en los contenidos de arcilla, CIC, K total y K mineral, siendo mayor en el grupo de suelos mezcla que en el grupo caolinítico y mayor en el grupo de suelos esmectíticos que en el resto. Además, los contenidos de K intercambiable y no intercambiable fueron mayores en los grupos con mayor contenido de arcillas 2:1 (grupos mezcla y esmectíticos). Estudió también la relación entre las distintas fracciones de K observando que, a igual nivel de K intercambiable, una mayor cantidad se encontraba como K en solución en los suelos caoliníticos (Figura 1.3a). La pendiente de la relación entre K intercambiable y K extraído con HNO₃ aumentó a medida que aumentó la cantidad de arcillas de tipo 2:1, mostrando que el contenido de K de reserva fue mayor en los suelos esmectíticos y con mezcla de arcillas (Figura 1.3b).

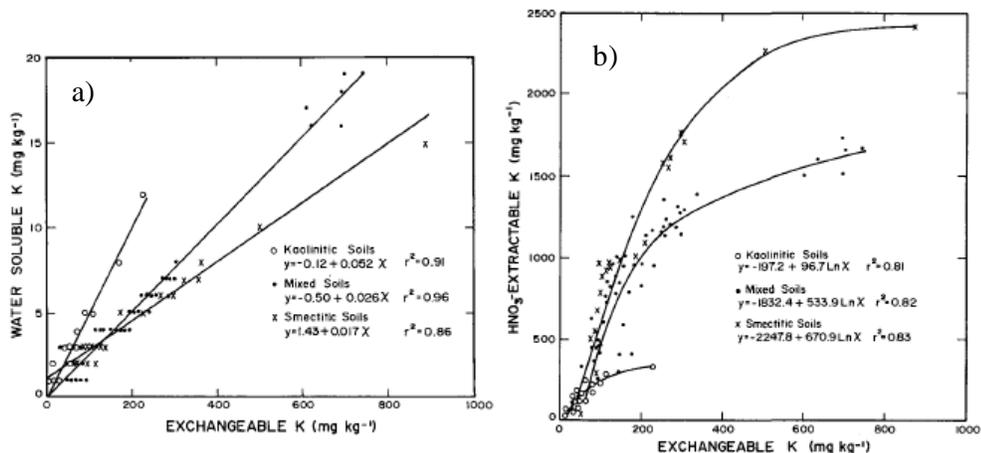


Figura 1.3. Relación entre (a) K en solución y K intercambiable y (b) K extraído con HNO₃ y K intercambiable, según la mineralogía de los suelos (Sharpley, 1989).

La capacidad de un suelo de aportar K aumenta a medida que las arcillas de tipo 2:1 se vuelven más dominantes que las de tipo 1:1, a pesar de que en estas últimas el K se encuentra disponible más rápidamente (Sharpley, 1989). De acuerdo al autor, el K será retenido más fuertemente en los filosilicatos expansivos y arcillas de tipo 2:1 que por las cargas superficiales de las arcillas de tipo 1:1. Hernández et al. (1988) diferenciaron un grupo de suelos con bajo contenido de K y el equilibrio desplazado hacia la fase intercambiable y otro con alto contenido y el equilibrio desplazado hacia la fase no intercambiable. Esto estaría asociado, según los autores, a la presencia importante de minerales tipo mica (illita) en la fracción arcilla del suelo. Esto coincide con lo reportado por Raheb y Heidari (2012) de que suelos ricos en esmectitas tenían altos contenidos de K intercambiable pero contenidos menores de K no intercambiable con tasas de liberación moderadas, mientras que suelos illíticos tuvieron menores contenidos de K intercambiable pero el K no intercambiable fue alto así como su tasa de liberación.

La importancia de la mineralogía y del contenido de arcillas 2:1, principalmente illita, sobre la disponibilidad de K es coincidente con la mayoría de la literatura y esperable en función de las propiedades de esta arcilla como se discutió en la sección anterior. Según Barré et al. (2007), el contenido de K en los minerales arcillosos está fuertemente relacionado con la cantidad de illita presente (illita verdadera y láminas de illita en el interestratificado illita-esmectita). La mineralogía y la presencia de illita tendrían una mayor influencia sobre las reservas de K que sobre el K intercambiable (Officer et al. 2006, Hernández et al. 1988), afectando por lo tanto la disponibilidad de K en el mediano y largo plazo. Cox y Joern (1997) sostienen que el contenido de illita sea probablemente un buen indicador del K no intercambiable disponible para las plantas, mientras que para Barré et al. (2007) la reserva de K en minerales illíticos debe ser considerada para una agricultura sustentable. En cinco suelos de Argentina, Zubillaga y Conti (1996) encontraron que, durante el período de máxima disponibilidad de K, las variables K intercambiable inicial y contenido de illita explicaron el 98% de la variación del K absorbido por raigrás. Durante el período de mínima disponibilidad, el 90% de la absorción vegetal estuvo explicada por el K no intercambiable y por el contenido de illita. Por otra

parte, suelos con bajos contenidos de micas e illita dependerán casi exclusivamente de la fertilización potásica para evitar que la disponibilidad de K disminuya por efecto de la extracción vegetal (Carey y Metherell, 2003a).

1.2.3.2. Fijación y liberación de potasio

La fijación de K es el proceso por el cual los iones K^+ ocupan posiciones interlaminares en las arcillas pasando a formas no intercambiables, mientras que la liberación implica un pasaje del K hacia formas más disponibles (Zörb et al. 2014, Kirkman et al. 1994). El tipo de mineral arcilloso es considerado un factor determinante de la capacidad de fijación y liberación de K de un suelo (Conti et al. 2001, Kirkman et al. 1994), aunque estos procesos son fuertemente dependientes del balance generado por la diferencia entre la fertilización y la extracción vegetal (Simonsson et al., 2007).

Illita, vermiculita y los interestratificados illita-esmectita son los minerales arcillosos con mayor participación en los procesos de liberación y fijación de K, por lo que suelos con mayor cantidad de estos minerales tendrán un mayor poder fijador (Barré et al. 2008a y b, Goli-Kalanpa et al. 2008, Sparks y Huang 1985). De acuerdo con Barré et al. (2007), los interestratificados illita-esmectita tienen una fuerte capacidad de fijar K, aumentando así el contenido de láminas con estructura similar a la illita (“*illite-like*” layers). Según Officer et al. (2006), en suelos conteniendo minerales 2:1 las partículas micáceas actuarán como una fuente de K, mientras que las de vermiculita constituyen una fosa de K por su capacidad fijadora. Los minerales 1:1 como caolinita no fijan K (Havlin et al., 2005).

Simonsson et al. (2007) estudiaron el efecto de los balances de largo plazo sobre la liberación y fijación de K en cinco suelos. La liberación de K fue mayor cuando los balances fueron más negativos (menores dosis de fertilización), tendiendo a disminuir progresivamente con mayores dosis de fertilizante y llegando a ocurrir fijación de K con las dosis más altas (160–208 kg K ha⁻¹ año⁻¹) que generaron balances positivos de K. En los suelos más arcillosos y con mayor contenido de minerales illíticos, el K intercambiable fue menos afectado por los balances de K que en los suelos de textura más gruesa y más pobres en minerales potásicos. Esto

mostraría la mayor capacidad de liberación y fijación de K del primer grupo frente a los suelos más pobres, y la posible reversibilidad de estos procesos. Para el conjunto de los suelos, el K no intercambiable (determinado con HCl) mostró una respuesta significativa al balance de K, con un cambio de $0,43 \pm 0,25 \text{ kg ha}^{-1}$ de K no intercambiable por cada unidad de cambio en el balance ($R^2 = 0,30$).

Conti et al. (2001) y González et al. (1999) demostraron que, además de la mineralogía, la saturación de K de un suelo también es determinante de la capacidad de fijación del mismo. Conti et al. (2001) estudiaron la fijación de K en cuatro suelos con diferente mineralogía y encontraron que la mayor fijación ocurrió en un Argiudol ácuico, mientras que la menor fijación fue en un Argiudol típico. A pesar de contener un 25% de arcillas illíticas, el Argiudol típico tenía una alta saturación de K ($K/CIC = 8,3\%$) lo que según los autores estaría indicando una saturación de los sitios interlaminares de fijación. En el Argiudol ácuico por otro lado, a pesar de tener un 20,3% de arcilla con predominancia de esmectita, la saturación de K fue baja ($K/CIC = 0,76\%$) lo que sugeriría la existencia de sitios activos para la fijación. Esto debe ser considerado al evaluar distintas estrategias de fertilización, ya que el cultivo intensivo sin fertilización potásica tendería a favorecer la capacidad de fijación de los suelos (MacLean, 1968). Liu et al. (1997), en un experimento de largo plazo, estudiaron el efecto de la fertilización potásica sobre la capacidad de fijación de K del suelo. La fertilización con 252 kg ha^{-1} de K durante 20 años tuvo efecto sobre la capacidad de fijación de K del suelo, la cual fue reducida significativamente aun luego de diez años sin fertilización potásica.

Sin embargo, a pesar que la fijación limita la disponibilidad actual del K agregado, no es totalmente desfavorable porque el K fijado puede estar disponible en el futuro para los cultivos (Havlin et al. 2005, González et al. 1999). MacLean (1968) en un experimento macetero con el agregado de 330 mg K kg^{-1} a cuatro suelos reportó que el K fijado contribuyó entre 13 y 57% a la absorción realizada por cuatro cultivos de avena. Luego del cuarto cultivo las diferencias en el K intercambiable entre los testigos y los tratamientos fertilizados fueron mínimas (8 mg kg^{-1} en promedio) pero la absorción de K por los cinco cultivos siguientes fue 48% mayor en los tratamientos fertilizados. Esto muestra que los procesos de liberación y fijación

están relacionados y son, al menos hasta cierto punto, reversibles y que cuantificar el K fijado puede ser de importancia para estimar la disponibilidad de este nutriente. Barré et al. (2008b), utilizando la técnica de difracción de rayos X, cuantificaron cambios de área en los picos de los diagramas de difracción y lo asociaron a cambios en los tipos de arcilla presentes en el suelo. Encontraron cambios en las poblaciones de arcilla de los suelos por efecto de la fijación o liberación de K, demostrando la importancia de los minerales arcillosos 2:1 (no solo illita y vermiculita) como reservorios de K y la reversibilidad de estos procesos.

La importancia de la mineralogía como un factor determinante de los procesos de fijación y liberación de K es concluyente, aunque el manejo de este nutriente y los balances generados en el largo plazo también serían importantes. Sistemas extractivos donde no existe una reposición del K promoverán la liberación de formas no intercambiables, pudiendo llevar al agotamiento del K disponible y generando deficiencias, además de un posible aumento de la fijación del K agregado. Este aumento en la capacidad de fijación ocurriría por una disminución de la saturación de K del suelo y por la presencia de sitios en la intercapa de las arcillas 2:1 con disponibilidad para fijar el K agregado. En suelos illíticos, con mayor capacidad de liberación de K, el agotamiento del K disponible sería un proceso más lento pero probablemente, una vez agotado, también sea mayor la fijación y por lo tanto más difícil aumentar nuevamente la disponibilidad. Los procesos de fijación y liberación están relacionados y serían procesos reversibles por lo que la fijación del K agregado no significa una pérdida y podría ser favorable en la medida que evite las pérdidas de K por lixiviación. A pesar de esto, si la fijación ocurre en formas muy lentamente disponibles podría ocurrir que la tasa de liberación del K fijado no sea suficiente para satisfacer la demanda de K de los cultivos y que igual sea necesaria la fertilización.

1.2.3.3. Humedad y temperatura del suelo

El efecto de la temperatura y la humedad en la absorción del K se debe a cambios en la disponibilidad del nutriente y en la actividad de las raíces (Conti y García 2005, Havlin et al. 2005). Además, en condiciones de estrés hídrico los requerimientos vegetales de K aumentan debido a la importancia del nutriente en la

regulación del potencial osmótico y el control de la apertura estomática (Zörb et al. 2014, Marschner 1995). Una adecuada humedad del suelo es necesaria para facilitar el movimiento de K hacia las raíces por difusión y flujo masal, siendo el proceso de difusión responsable de más del 75% del movimiento de K (Lester et al., 2010). Con baja humedad la lámina de agua alrededor de las partículas del suelo es más fina y discontinua, resultando en una difusión más tortuosa del K^+ hacia las raíces (Havlin et al., 2005). En condiciones de suelo seco, el transporte y absorción vegetal de K así como el crecimiento radicular estarán limitados, generando deficiencias de K (Zörb et al. 2014, Lester et al. 2010). El menor aporte de K en suelos secos genera cultivos con menor resistencia a la sequía lo que afecta el crecimiento, reduciendo la absorción de K y empeorando aun más el estado del cultivo (Zörb et al., 2014).

La humedad del suelo afecta también la relación de actividades entre los cationes presentes en la solución ($AR = (K^+)/((Ca^{2+} + Mg^{2+})^{1/2})$). Cuando aumenta la humedad del suelo, la solución del suelo es diluida y el equilibrio entre los cationes monovalentes y divalentes en el complejo de intercambio es desplazada, aumentando la adsorción de cationes divalentes mientras disminuye la adsorción de cationes monovalentes en el complejo de intercambio (Malavolta, 2015). Cuando disminuye la humedad del suelo, la concentración de iones en solución aumenta pero la concentración de cationes divalentes ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$) aumenta más rápidamente que la concentración de K^+ , resultando en una disminución de la concentración de K^+ en solución (Bertsch y Thomas, 1985). Como consecuencia práctica, en períodos secos el suministro de K a las plantas se verá reducido tanto por la menor difusión hacia las raíces como por los cambios en la relación de actividades catiónicas (Bertsch y Thomas 1985, Malavolta 1985).

Si bien el humedecimiento y secado del suelo puede afectar la fijación y liberación de K, según Havlin et al. (2005) esto es difícil de cuantificar en condiciones de campo aunque sería de importancia en los análisis de suelo. El drenaje de los suelos también podría afectar la disponibilidad de K y la respuesta vegetal a este nutriente según lo reportado por Barbagelata y Mallarino (2013). Para suelos de Iowa, estos autores encontraron que en suelos bien drenados los cultivos necesitaron menores contenidos de K intercambiable y respondieron menos a la

fertilización que cultivos creciendo en suelos con drenaje pobre. Sin embargo, no lograron estimar relaciones diferentes entre el K intercambiable y la respuesta a la fertilización según la clasificación del drenaje de los suelos.

El anegamiento y los cambios en las condiciones redox influyen sobre la disponibilidad de K de diferente manera según la mineralogía de las arcillas. La tendencia es que luego de un ciclo de óxido-reducción la disponibilidad del K disminuirá en las esmectitas, mientras que aumentará en la illita por efecto del cambio en la carga superficial que ocurre durante la reducción del Fe (Shen y Stucki, 1994). De acuerdo con estos autores, la mineralogía de los suelos es muy importante para determinar el efecto del estado de oxidación del Fe en la disponibilidad de K del suelo, pudiendo fijar o liberar K durante condiciones reductoras según dominen las esmectitas o las illitas. Sin embargo, Schindler et al. (2003) trabajando con cuatro suelos esmectíticos de Dakota del Sur no encontraron efecto de un ciclo de óxido-reducción sobre los niveles de K del suelo ni sobre la fijación del K. El evento de óxido-reducción tampoco afectó el rendimiento o la absorción de K de un cultivo de maíz creciendo en invernáculo.

Temperaturas bajas restringen el crecimiento vegetal y el nivel de absorción del K (Havlin et al., 2005). Blank (2010) encontró efecto de la temperatura sobre la selectividad del ion K en un suelo de Sierra Nevada, disminuyendo la cantidad de K adsorbido al aumentar la temperatura desde 1 a 50°C. Menores temperaturas entonces, disminuirían la disponibilidad de K por mayor adsorción a los coloides. Además, la temperatura influirá sobre la tasa de difusión de K en el suelo por su efecto en la viscosidad del agua y en el poder buffer del suelo, siendo menor la tasa de difusión a bajas temperaturas (Barber, 1985). Según Havlin et al. (2005), la aplicación de altos niveles de K disminuye parte de los efectos adversos de las bajas temperaturas, explicando de esta forma la respuesta a la fertilización en banda en cultivos tempranos.

1.2.3.4. Aireación y compactación

Suelos con pobre aireación no tendrán suficiente oxígeno para un adecuado crecimiento radicular, lo que afectará la absorción de K (Conti y García 2005, Havlin

et al. 2005). La compactación del suelo afecta la dinámica y absorción de nutrientes debido a cambios en las propiedades hidráulicas, en la aireación y en la difusión de nutrientes en el suelo, así como el efecto en el crecimiento y distribución de las raíces (Lipiec y Stepniewski, 1995). Según estos autores, el efecto de cada uno de estos factores dependerá de la magnitud de la compactación, del contenido de agua del suelo y de la disponibilidad de nutrientes. En la mayoría de los casos la absorción de K disminuyó con aumentos en la compactación del suelo, debido principalmente a una disminución en el desarrollo radicular (Lipiec y Stepniewski, 1995). Ishaq et al. (2001) estudiaron el efecto de la compactación subsuperficial (15–30 cm) de un suelo franco-arcillo-arenoso en la absorción de nutrientes por trigo y sorgo, encontrando una disminución de hasta 24 % para trigo y de 12 % para el cultivo de sorgo. El primer año luego de realizado el tratamiento de compactación existió una correlación significativa entre el largo de las raíces y el contenido de K en la paja del trigo.

De acuerdo con Lipiec y Stepniewski (1995), en condiciones de buena humedad y alta fertilidad una compactación moderada podría ser beneficiosa o al menos contrarrestada por un aumento en la tasa de influjo de nutrientes por unidad de raíz. Sin embargo, aumentos de la densidad aparente por encima de cierto valor podrían generar una disminución en el coeficiente de difusión de los nutrientes como resultado del aumento de la tortuosidad y restricciones para la penetración radicular (Lipiec y Stepniewski, 1995).

1.2.3.5. pH

En suelos de pH muy bajo, cantidades tóxicas de Al y manganeso (Mn) intercambiables generan un ambiente desfavorable alrededor de las raíces para la absorción de nutrientes (Conti y García 2005, Havlin et al. 2005). Además, con pH muy bajos la elevada concentración de Al ocupará una mayor cantidad de posiciones de intercambio, disminuyendo la capacidad del suelo de retener K y otros cationes en forma intercambiable y reduciendo la saturación en bases (Bolan et al., 2003). En estas condiciones, el aumento de pH por el encalado causa la precipitación del Al, por lo que se liberan posiciones de intercambio y aumentan las cargas negativas

disponibles para el intercambio con bases (Havlin et al. 2005, Bolan et al. 2003). Sin embargo, dado el aumento importante de la concentración de Ca en solución, esta base ocupará la mayoría de los sitios liberados durante la precipitación del Al y la absorción de K podría verse afectada por las altas concentraciones de este nutriente (Bolan et al., 2003). Por otro lado, la precipitación del Al podría bloquear los sitios de intercambio con hidroxialuminios cargados positivamente, generando una disminución de los sitios efectivos de intercambio (Bolan et al. 2003, McLean y Watson 1985).

Algunos trabajos reportaron un incremento en la adsorción de K por efecto del encalado (Magdoff y Bartlett 1980, Blue y Ferrer 1986, y Alibrahim et al. 1988, citados por Bolan et al., 2003) mientras que en otras situaciones la adsorción disminuyó luego del encalado (Bolan et al. 1999, citados por Bolan et al., 2003). La disminución de pérdidas de K por lixiviación como efecto del encalado comentada por algunos autores (Bertsch y Thomas 1985, Malavolta 1985) se debería al aumento en la adsorción de K en formas intercambiables por una menor competencia del Al. El efecto sobre la absorción vegetal de K parece ser contradictorio según lo revisado por Bolan et al. (2003). Según estos autores, en los trabajos de Abraham et al. (1980) y Mason et al. (1994), la absorción aumentó por efecto del encalado pero en el trabajo de Magdoff y Bartlett (1980) la absorción disminuyó.

Tyler y Olsson (2001) estudiaron el efecto del cambio de pH (con agregado de carbonato de calcio) en un Cambisol de acidez moderada sobre la disponibilidad de K y otros nutrientes para un cultivo de *Agrostis capillaris* L. Para el rango de pH estudiado (5,2 a 7,8), la concentración de K en solución y la cantidad absorbida disminuyó con aumentos del pH, aunque el diseño no permitió discernir si fue un efecto del pH o de la mayor concentración de Ca en solución. A pesar del efecto negativo del encalado, en ese trabajo el contenido de K en planta estuvo siempre dentro del rango crítico recomendado por Marschner (1995). En situaciones de acidez moderada por lo tanto, no parecería ser el pH un factor limitante de la disponibilidad del K como sí podría ocurrir en condiciones más ácidas y con presencia de Al. Según lo revisado por Sparks y Huang (1985), la fijación de K aumentaría con aumentos en el pH, aunque para un rango de pH entre 5,5 y 7,0 este

aumento sería moderado. Esto podría ser la explicación de porqué, si bien Tyler y Olsson (2001) reportaron disminuciones en la absorción de K, los valores de K en planta siempre estuvieron dentro de los rangos recomendados.

1.2.3.6. Cationes acompañantes del potasio

Los iones Ca^{+2} y Mg^{+2} compiten con el K^{+} en la absorción por los cultivos, por lo tanto suelos con contenidos altos de uno o de los dos pueden requerir fertilización potásica para una óptima nutrición vegetal (Havlin et al., 2005). Por este motivo, existen trabajos que plantean relaciones óptimas entre las bases que ayudarían en la toma de decisiones para la fertilización. El concepto de relación de saturación de bases (*basic cation saturation ratio - BCSR*), según lo revisado por Kopittke y Menzies (2007), sostiene que existe una relación ideal entre los cationes básicos en la CIC de un suelo que maximiza el rendimiento y calidad de los cultivos. Estos autores sostienen que, si bien se han propuesto varios valores, la relación generalmente está en el rango propuesto por Graham (1959), citado por Kopittke y Menzies (2007) de 65-85% Ca, 6-12% Mg y 2-5% K como porcentaje de la CIC. Sin embargo, no es del todo claro cómo se llegaron a establecer estas relaciones para definir el suelo “ideal” o balanceado (Kopittke y Menzies, 2007).

Luego de revisar los trabajos originales que llevaron a la postulación de estas relaciones e investigaciones posteriores, Kopittke y Menzies (2007) sostienen que la información no sustenta este concepto y que su utilización podría resultar en un uso ineficiente de los recursos. Según estos autores, si las cantidades totales de Ca, Mg y K son adecuadas, sus relaciones (para los rangos usualmente encontrados en los suelos) generalmente no influyen en el rendimiento y la fertilidad del suelo podría mantenerse con diferentes relaciones catiónicas. A pesar de esto, la competencia entre bases y su efecto en la absorción vegetal ha sido reportada por otros autores (e.g. White 2013, Marschner 1995, Dibb y Thompson 1985) y también en trabajos nacionales. Morón (2008) en un relevamiento de 40 chacras de trébol blanco encontró que con valores superiores al 2% de K en la CIC no se registraron valores inferiores al 20 g kg^{-1} de K en planta. Este autor también encontró relación entre el contenido de K en plantas de alfalfa y la relación $\text{K}/(\text{Ca}+\text{Mg})$ en suelo (Morón,

2000). Para 179 cultivos de *Lotus corniculatus L.*, los contenidos de Mg en planta se correlacionaron mejor con el contenido de K intercambiable ($r = -0,59$; $P = 0,01$) que con el de Mg intercambiable en el suelo ($r = 0,14$; $P = 0,05$) (Barbazán et al., 2007). García Lamothe y Quincke (2012), a partir de información generada en experimentos de respuesta a K, recomiendan para el cultivo de trigo una relación de bases de 75-88% Ca, 7,5-15% Mg y 2,5-5% K. Por lo tanto, si bien la disponibilidad absoluta del nutriente parece ser más importante, tal como lo plantean Kopittke y Menzies (2007), la relación con otras bases no debería despreciarse como complemento para la toma de decisiones sobre fertilización potásica.

En especies natrofilicas, el Na puede sustituir al K en algunas funciones no específicas por lo que los requerimientos de K serían menores (Broadley et al. 2012, Marschner 1995). Esta sería la causa de la relación inversa entre el contenido de Na y K reportado por Morón (2008) en el relevamiento de trébol blanco ya comentado. Sin embargo, si bien el algodón y la remolacha azucarera son reportadas como especies natrofilicas (Oosterhuis et al. 2014, Zörb et al. 2014), la mayoría de los cultivos agrícolas de importancia son natrofóbicos según Broadley et al. (2012).

1.2.3.7. Otros nutrientes

La demanda de K de los cultivos está relacionada con la demanda de N, aumentando la necesidad de K al aumentar las dosis de N utilizadas (Oosterhuis et al. 2014, White 2013, Dibb y Thompson 1985). Según Zörb et al. (2014), la deficiencia de K en cereales podría limitar la habilidad de los cultivos de utilizar el N, generando un aumento en el potencial de pérdida de nitrato por lixiviación. Además, un adecuado suministro de K lograría aumentar la tolerancia de las plantas frente a altas concentraciones de NH_4^+ y reducir su efecto tóxico (Zörb et al. 2014, Dibb y Thompson 1985). Sin embargo, en condiciones de baja disponibilidad de K, su absorción podría ser perjudicada por la presencia de NH_4^+ , ya que éste inhibe transportadores de K de alta afinidad que actúan en la absorción (Oosterhuis et al. 2014, Zörb et al. 2014). Cultivos creciendo bajo condiciones de baja disponibilidad de K y alto aporte de NH_4^+ serán por lo tanto particularmente propensos a la toxicidad por NH_4^+ y deficiencias de K (Zörb et al., 2014). Como el NH_4^+ puede ser

fijado por las arcillas de manera similar al K^+ (su radio iónico es similar), su presencia alterará la fijación del K agregado y la liberación del K fijado (Havlin et al., 2005). Según estos autores, la presencia de NH_4^+ puede bloquear la liberación del K fijado.

Según lo revisado por Dibb y Thompson (1985), el P no tendría un efecto importante sobre la disponibilidad de K, aunque niveles adecuados de K son necesarios para maximizar la respuesta de la fertilización fosfatada. Tanto N como P podrían afectar la disponibilidad de K en el largo plazo en la medida que un mejor manejo de la fertilización resulte en mayores extracciones de K y éste no sea repuesto. Carey y Metherell (2003a) estudiaron los cambios en el contenido de K de suelos bajo pasturas, encontrando que en los tratamientos con mayores dosis de N o P la disminución del K intercambiable fue mayor.

1.2.3.8. Potasio en el subsuelo

Según lo revisado por Barré et al. (2007), el contenido de K total tiende a aumentar en profundidad porque la meteorización de minerales primarios es mayor cerca de la superficie del suelo. El contenido de K intercambiable seguiría una tendencia inversa, siendo menor su concentración en horizontes más profundos, debido principalmente a la absorción vegetal desde capas más profundas del suelo y su devolución en superficie durante la descomposición de los rastrojos. Jobbágy y Jackson (2001) estudiaron la distribución vertical del K intercambiable hasta 100 cm de profundidad de 8.955 perfiles de suelo, encontrando que los contenidos de K intercambiable fueron consistentemente mayores en los horizontes superficiales. La estratificación fue mayor en los suelos con menores contenidos de K, lo que según los autores demuestra un ciclado del nutriente por efecto de la absorción vegetal desde capas más profundas, generando un transporte neto hacia la superficie. A pesar de esto, según los gráficos presentados por Jobbágy y Jackson (2001) el 60-70 % del K intercambiable del suelo parecería estar por debajo de los 20 cm, por lo que su participación en la nutrición vegetal podría ser de importancia.

Simonsson et al. (2007) encontraron que el efecto de los balances de largo plazo sobre el K intercambiable de cinco suelos llegó a observarse hasta los 110 cm

en algunos suelos, si bien fue más obvio en las capas superficiales. Los balances también causaron variaciones en el K no intercambiable, aunque la tendencia fue menos clara, y en algunos suelos esta fracción tendió a aumentar con la profundidad mientras que en otros se mantuvo constante. Goli-Kalanpa et al. (2008) estudiaron las fracciones K en solución, K intercambiable y K no intercambiable para las profundidades de 0-30 y 30-60 cm. Las fracciones soluble e intercambiable presentaron mayores valores en los primeros 30 cm del suelo en comparación con las muestras tomadas a 30-60 cm, mientras el K no intercambiable no presentó diferencias. En condiciones de pastoreo, Carey y Metherell (2003a) realizaron un muestreo a distintas profundidades (0-7,5; 7,5-15 y 15-30 cm) en un suelo franco limoso, donde el contenido de K intercambiable y de reserva aumentó con la profundidad. Según los autores, la mayor concentración en profundidad podría estar reflejando las pérdidas por lixiviación que ocurren al aumentar el ciclado de K debido al pastoreo y el retorno en las deyecciones.

Parece claro entonces que cultivos con capacidad de explorar capas más profundas del suelo tendrán mayor capacidad de absorción de K. Por este motivo, Barbazán et al. (2011a) sostienen que la información acerca de la disponibilidad de K en capas más profundas (> 15-20 cm) permitiría complementar el análisis de suelos y mejorar la estimación de posibles respuestas a la fertilización. Esto es considerado por algunos sistemas de recomendación de fertilización potásica que integran el contenido de K intercambiable del subsuelo para la definición del nivel crítico (e.g. Sawyer et al., 2002 en Iowa). Sin embargo, se debe considerar que el crecimiento radicular en el subsuelo puede ser inhibido por condiciones químicas y/o físicas desfavorables (Ishaq et al., 2001), lo que podría impedir el acceso de los cultivos al K disponible en el subsuelo.

1.2.4. Pérdidas de potasio

Las pérdidas de K por lixiviación son muy variables y se relacionan significativamente con la textura del suelo, pudiendo ser cantidades despreciables en suelos de textura fina hasta cantidades importantes en suelos arenosos (Öborn et al. 2005, Bertsch y Thomas, 1985). De acuerdo con lo revisado por varios autores

(Barré et al. 2008b, Öborn et al. 2005, Andrist-Rangel et al. 2007, Carey y Metherell 2003a) en sistemas de zonas templadas, las pérdidas de K por lixiviación estarían entre 1,5 y 46 kg K ha⁻¹ año⁻¹. Sin embargo, la cantidad lixiviada en una situación particular dependerá del tipo de suelo, el clima, la rotación y el manejo de la nutrición (Andrist-Rangel et al., 2007) y en sistemas extensivos podría ser sobreestimada si se utilizan valores estándar para una región o tipo de suelo (Öborn et al., 2005). Havlin et al. (2005) sostienen que la fuente de K también puede influir en la lixiviación: comparado con el KCl, las fuentes SO₄⁻² y PO₄⁻² exhiben una mayor adsorción aniónica en sitios de intercambio. Entonces, con menos aniones en solución disponibles para ser lixiviados, menos K⁺ será lixiviado.

Según lo reportado por Simonsson et al. (2007), en condiciones de no fertilización las pérdidas por lixiviación serían bajas (2,1-5,8 kg K ha⁻¹ año⁻¹) y poco afectadas por el uso de fertilizantes potásicos en suelos con gran cantidad de arcilla o buena exploración radicular. En suelos de textura arenosa o con poca profundidad de arraigamiento vegetal la lixiviación también fue baja en condiciones de no fertilización, pero aumentó considerablemente por efecto de la fertilización (14-24 kg K ha⁻¹ año⁻¹) (Simonsson et al., 2007). De acuerdo con Bertsch y Thomas (1985) ha sido demostrado que la presencia de cultivos en el suelo reduce las pérdidas de K por lixiviación, lo que explicaría el efecto de la profundidad de enraizamiento encontrado por Simonsson et al. (2007). En el mismo sentido, Jobbágy y Jackson (2001) sugieren que el rol de la lixiviación en la distribución vertical de los nutrientes está subordinada a la redistribución que generan las plantas al absorber K desde capas profundas y depositarlo más cerca de la superficie durante su descomposición. A nivel nacional, Casanova y Ferrando (2003) estudiaron, mediante lisímetros, las pérdidas de bases por lixiviación en cinco suelos (tres Brunosoles, un Vertisol y un Argisol) con variaciones en textura desde franco arenoso a arcilloso, cultivados de manera continua con cebada durante tres años. Con una precipitación acumulada de 2.863 mm, el K lixiviado durante los tres años del experimento estuvo en el rango de 65-135 kg K ha⁻¹; y aumentó a 110-170 kg K ha⁻¹ cuando se realizó un riego equivalente a 150 mm luego de la siembra.

Según Bertsch y Thomas (1985), a pesar de existir poca información sobre las pérdidas por erosión y escurrimiento, las cantidades pueden ser significativas. Las pérdidas de nutrientes por escurrimiento dependen del momento en que ocurre el escurrimiento en relación al momento de aplicación del nutriente (Shipitalo et al., 2013). Bertol et al. (2007) determinaron contenidos de K en agua de escorrentía en el rango de 1,3 a 9,0 g L⁻¹, estando los mayores valores asociados al sistema de siembra directa y al contenido de K intercambiable en la profundidad 0-2,5 cm. Shipitalo et al. (2013) estudiaron el efecto de diferentes laboreos y uso del suelo sobre las pérdidas de nutrientes en cuencas agrícolas durante 16 años. En condiciones de siembra directa, con aplicaciones promedio de 38,5 kg K ha⁻¹ año⁻¹, las pérdidas por escorrentía fueron en promedio 11,9 kg K ha⁻¹ año⁻¹, el 31% del K aplicado. En condiciones de laboreo con cincel las pérdidas fueron menores, 8 kg K ha⁻¹ año⁻¹ para aplicaciones promedio de 31,5 kg K ha⁻¹ año⁻¹ (25% del K aplicado), pero las pérdidas de suelo por erosión fueron mayores. En el trabajo de Bertol et al. (2007), el contenido promedio de K en los sedimentos erosionados fue menor que el contenido en la capa más superficial del suelo (0-2,5 cm).

La mayoría de los trabajos que estudian balances de largo plazo con distintas rotaciones y manejo del K no consideran las entradas por deposición ni las pérdidas por lixiviación y escorrentía (Singh y Bansal 2010, Madaras y Lipavský 2009, Barré et al. 2008b, Andrist-Rangel et al. 2007, Blake et al. 1999).

1.3. SITUACIÓN NACIONAL

Los suelos del Uruguay se caracterizan por presentar una alta variabilidad en sus contenidos de K intercambiable, tal como lo evidencian distintos relevamientos de suelos realizados en condiciones casi prístinas (Altamirano et al., 1979) o en situaciones de producción (Bordoli et al. 2012, Morón y Quincke 2010, Barbazán et al. 2007, Morón y Baethgen 1996). Hernández et al. (1988) caracterizaron las diferentes fracciones de K en 13 suelos de Uruguay, encontrando que el contenido de K total osciló entre 0,06 y 0,69% con una media de 0,27%. El contenido de K no intercambiable de esos suelos varió en el rango de 0,13 a 3,35 cmol_c kg⁻¹, con valores

de K intercambiable entre 0,11 y 1,5 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y K en solución entre 0,0038 y 0,0311 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

Molfino (2013) estimó que el área potencialmente agrícola del Uruguay es ligeramente superior a 2.400.000 hectáreas, considerando suelos que soportarían un uso agrícola de alta intensidad (Vertisoles y Brunosoles Éútricos vérticos) y otros donde es necesario un uso menos intensivo, rotando con pasturas (Brunosoles Éútricos [Subéútricos] Típicos y Lúvicos). La mayoría de estos suelos en condiciones naturales presentaban valores de K intercambiable por encima del nivel crítico (0,34 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; Barbazán et al., 2011a) e incluso por encima del rango considerado marginal para cultivos de invierno (0,36-0,45 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; García Lamothe y Quincke, 2012). Según los datos de K intercambiable presentados por Altamirano et al. (1979), de los suelos con mayor potencial agrícola, aquellos con mayor posibilidad de presentar deficiencias de K serían los pertenecientes a las unidades La Carolina, Kiyú, Trinidad, Tala Rodríguez y Baigorria. En los suelos agrícolas de menor intensidad de uso, los contenidos de K intercambiable serían marginales en las unidades Arroyo Blanco, Cuchilla de Corralito, Espinillar, Blanquillo y Sarandí de Tejera. Sin embargo, como se discutirá más adelante, algunos de estos suelos se desarrollaron sobre materiales ricos en minerales potásicos (eg. suelos de la unidad Kiyú desarrollados a partir de lodolitas de la Formación Libertad) por lo que su clasificación como marginales, tomando como referencia únicamente el K intercambiable, podría conducir a errores.

Todos los suelos definidos por Molfino (2013) como agrícolas pertenecen al Orden de Suelos Melánicos, caracterizados por su alto contenido de materia orgánica, alta CIC y alto nivel de bases (Durán y García, 2007). Los minerales arcillosos dominantes en estos suelos son de tipo 2:1, casi siempre mica (illita) y esmectita; la caolinita aparece sólo como mineral subordinado (Durán y García, 2007). Altamirano y Puentes (1975), citados por Durán y García (2007) estudiaron las arcillas de dos Brunosoles de las asociaciones Libertad y Young concluyendo que la illita y la montmorillonita eran los minerales dominantes en ambos perfiles. La proporción de montmorillonita aumentaba en el horizonte argilúvico en relación al horizonte A, mientras que la proporción de illita evolucionaba en el sentido opuesto.

Pazos (1981) estudió la mineralogía de la fracción arcilla de 13 suelos que luego fueron utilizados por Hernández et al. (1988) para un estudio sobre la capacidad de suministro de K de los suelos (Cuadro 1.1). De esos suelos, cinco tendrían potencial agrícola según la clasificación de Molino (2013): Vertisol de Itapebí-Tres Árboles desarrollado sobre sedimentos cuaternarios derivados de Basalto; Brunosol de Young desarrollado sobre Formación Fray Bentos; Vertisol de La Carolina desarrollado sobre lodolitas cuaternarias sobre Cristalino; Brunosol de San Gabriel – Guaycurú sobre Cristalino alterado y Brunosol de Bequeló sobre Formación Fray Bentos. La presencia de illita fue importante en los Brunosoles desarrollados sobre Fray Bentos (Bequeló, Young) y dominante en el Brunosol de San Gabriel Guaycurú desarrollado sobre Cristalino, lo que explicaría los altos contenidos de K (Hernández et al. 1988, Pazos 1981). Brunosoles desarrollados sobre lodolitas de la Formación Libertad también tendrían predominancia de illita y altos contenidos de K (Da Silva 1967, citado por Durán y García 2007, Pazos 1981, Puentes y Altamirano 1975, citados por Pazos 1981).

En los Vertisoles estudiados por Pazos, la arcilla predominante fue la montmorillonita, lo que coincide con otros trabajos nacionales sobre el tema (Altamirano y Puentes 1975, citados por Durán y García 2007, Da Silva 1967, citado por Durán y García 2007, Carnelli y Guarinoni 1976, citados por Pazos 1981, Puentes y Altamirano 1975, citados por Pazos 1981). En los vertisoles estudiados en esos trabajos, la illita o el interstratificado illita-esmectita estarían presentes como minerales asociados (Durán y García 2007, Pazos 1981). Según Durán y García (2007) los suelos Melánicos contienen en sus fracciones gruesas minerales primarios alterables como feldespatos, micas y, en menor proporción, inosilicatos, por lo que el proceso de meteorización química repone las bases perdidas por lixiviación manteniendo un alto nivel de éstas.

Además de la variación en la mineralogía y en los contenidos de K, Hernández et al. (1988) encontraron diferencias importantes en la capacidad de suministro de K en el corto y largo plazo por parte de los distintos suelos. Como se observa en el Cuadro 1.1 y en la Figura 1.4 para algunos de los suelos estudiados, los suelos con mayores contenidos de illita tuvieron una mayor capacidad de suministro de K y

lograron mantener ese suministro en el tiempo. La presencia de minerales tipo mica estaría asociada a procesos de liberación lenta de K desde formas no intercambiables lo que generaría que el suministro de K permanezca en niveles más elevados en el tiempo (Hernández et al., 1988).

Cuadro 1.1. Contenido de K en diferentes fracciones químicas y mineralogía de la fracción arcilla de suelos con potencial agrícola (Hernández et al., 1988).

Suelo	K total	K no int	K int	K sol	Mineralogía arcilla			
					----- cmol _c kg ⁻¹ -----	DOM	ACC	MEN
Vertisol I-TA	4,54	0,52	0,36	0,0060	M	-	C	IM
Brunosol Yg	10,74	1,55	0,57	0,0096	M-I	-	C	-
Vertisol LC	5,20	0,76	0,28	0,0091	M	-	I-C	IM
Brunosol SG-G	15,99	3,35	0,45	0,0089	I	M	Mh	-
Brunosol Bq	17,58	2,50	1,50	0,0132	M	I	C	-

Mineralogía arcilla: DOM Dominante; ACC accesoria; MEN menores cantidades; INT interestratificado. M montmorillonita; I illita; C caolinita; Mh metahalloisita; IM interestratificado Illita-Montmorillonita. Asociación de suelos a escala 1:1.000.000: I-TA Itapebí-Tres Árboles; Yg Young; LC La Carolina; SG-G San Gabriel Guaycurú; Bq Bequeló (MAP/DSF, 1976).

Al estudiar la respuesta a la fertilización en un experimento macetero, los Hernández et al. (1988) encontraron que, en los suelos de texturas medias y pesadas con predominancia de minerales tipo mica (Brunosol SG-G), la extracción de K no se diferenció entre los tratamientos fertilizados y el testigo. Suelos con mineralogía tipo mica presentan bajos porcentajes de utilización como consecuencia de una alta reposición a partir de formas no intercambiables y/o altos mecanismos de retención (Hernández et al., 1988). En estos suelos, el K no intercambiable tuvo una participación importante en el aporte de K, correspondiendo más del 50% del K absorbido por el raigrás a la liberación de K no intercambiable en los tratamientos testigo (Hernández et al., 1988).

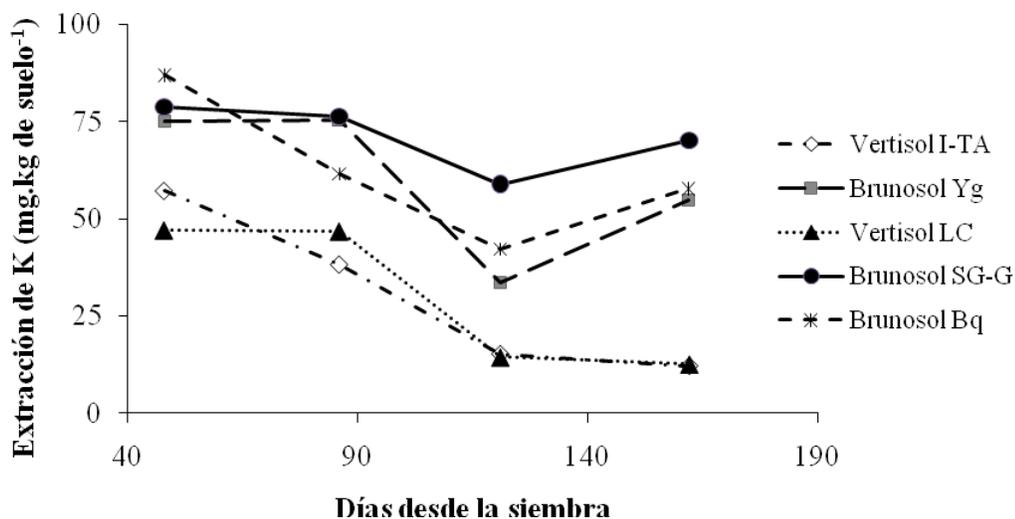


Figura 1.4. Evolución de la extracción de K por el raigrás en suelos con potencial agrícola (Hernández et al., 1988).

En un relevamiento de 179 chacras de *Lotus corniculatus L.*, Barbazán et al. (2007) encontraron que los contenidos más altos de K en planta se encontraban en cultivos sobre suelos arcillosos del litoral oeste desarrollados sobre Formación Fray Bentos. El 14% de las muestras vegetales contenía valores menores a la concentración crítica estimada ($14,0 \text{ g kg}^{-1}$) correspondiendo a cultivos en suelos de texturas livianas y bajo K intercambiable, desarrollados sobre Areniscas Cretácicas y otras areniscas del litoral oeste o sobre Areniscas de Tacuarembó en el noreste (Barbazán et al., 2007).

Los contenidos de K medio a alto y la presencia de illita o interestratificados illita-esmectita en la arcilla de la mayoría de los suelos agrícolas, sumado a un sistema de producción poco extractivo, explican el escaso uso de la fertilización potásica en agricultura. Las recomendaciones nacionales para este nutriente, dada la escasa respuesta encontrada, se limitaban a cultivos exigentes (papa, remolacha) en suelos arenosos o muy cultivados (Oudri et al., 1976). Estos autores planteaban como nivel crítico de K intercambiable un valor tentativo de $0,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. En suelos más livianos se consideraban como suficientes los valores mayores a $0,25 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y en suelos de textura arenosa incluso valores mayores a $0,15 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Casanova,

1996). Sin embargo, esto generó un balance sistemáticamente negativo de K, agravado en los últimos años por la intensificación agrícola y el aumento de la producción de soja. Este balance negativo de K, sumado a las pérdidas por erosión, causó una disminución en los contenidos de K intercambiable en los suelos y un aumento en la frecuencia de situaciones de cultivos con déficit o respuesta a K.

Morón et al. (2008) encontraron, para 30 predios lecheros de Florida, una disminución en los valores de K intercambiable en suelos con praderas o verdes al compararlos con sitios de referencia (mismo suelo no perturbado). Similares resultados habían encontrado los mismos autores para el departamento de Colonia (Morón et al., 2006). Para 48 chacras destinadas a cultivos en el departamento de Soriano, Morón y Quincke (2010) reportaron una disminución promedio de aproximadamente 40% del contenido de K intercambiable. En esas situaciones también disminuyó la participación del K en la CIC, con valores de K/CIC para los sitios de referencia de 5,10% y 4,26% para las profundidades de 0-7,5 y 7,5-15 cm y valores de 3,12% y 2,32% para los suelos bajo agricultura (Alejandro Morón, comunicación personal, 17 de noviembre de 2014). Si bien las disminuciones reportadas son considerables, en la mayoría de los casos los niveles de K intercambiable de las chacras se encontraba todavía por encima del nivel crítico recomendado por Oudri et al. (1976). Por otro lado, Bautes et al. (2009) sobre 19 chacras de suelos de Areniscas Cretácicas encontraron un promedio de 0,28 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (0,15-0,45 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) de K intercambiable. El 47% de las muestras presentó valores de K intercambiable igual o por debajo del nivel crítico tentativo para suelos de texturas medias, 0,25 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (Bautes et al., 2009).

Trabajos donde se midió la concentración de K en planta o la respuesta a la fertilización demuestran que hay situaciones donde este nutriente es una limitante. En un relevamiento de chacras comerciales con el cultivo de alfalfa, entre el 20 y 50% de las situaciones presentaron cultivos con concentraciones subóptimas de K en planta, según el valor crítico de referencia sea 20 o 25 g kg^{-1} respectivamente (Morón, 2000). Cano et al. (2007) reportaron para el departamento de Salto deficiencias de K en cultivos de verano en un predio dedicado a la agricultura (para grano y ensilaje) en rotación con verdes y praderas. Los análisis de suelo estuvieron

entre 0,10 a 0,20 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y existió respuesta a la fertilización potásica en maíz. Morón y Baethgen (1996) realizaron un relevamiento de 104 chacras de maíz para silo en establecimientos lecheros de dos zonas de Uruguay, encontrando que aproximadamente la mitad de los cultivos muestreados presentaban niveles sub-óptimos de K (menos de 17,1 g kg^{-1}). Como posibles causas, los autores citan la alta extracción de K que implica el uso de reservas forrajeras, la falta de uso de fertilizantes potásicos y la gran variabilidad de los suelos en su capacidad de suministro de este nutriente. Según los autores, para este caso particular podría haber problemas de interferencia y competencia entre la absorción de K y Mg por las plantas de maíz.

Bordoli et al. (2012) relevaron el estado nutricional de 178 chacras destinadas al cultivo de soja, las cuales tuvieron un contenido de K intercambiable promedio de 0,56 (0,08-2,5) $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, presentando el 23% de las muestras valores inferiores al nivel crítico. Considerando una concentración crítica de K en hoja de 17,6 g kg^{-1} , el 39% de los cultivos relevados tenía contenidos de K insuficientes, y esta situación fue observada incluso en algunos suelos con valores de K intercambiable medios o altos. Los autores consideran que el sistema de siembra directa podría estar interfiriendo en la absorción del K. Algunos de los trabajos ya mencionados, y otros, también reportaron deficiencias o respuesta a la fertilización sobre suelos con valores de K intercambiable por encima del nivel crítico (Coitiño et al. 2013, Bautés et al. 2009, Morón y Baethgen 1996). Bautés et al. (2009) consideraron que esto se debería a las concentraciones relativas de otros nutrientes (Ca y Mg) que estarían interfiriendo con la disponibilidad del K. Las deficiencias en plantas de maíz encontradas por Morón y Baethgen (1996) ocurrieron aún cuando los valores promedio de K intercambiable fueron medios a altos en ambas zonas (0,44 a 0,60 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Según los autores, el nivel de suficiencia de K intercambiable sería algo mayor que el utilizado en Uruguay, especialmente para suelos de texturas medias a pesadas.

Estos antecedentes más recientes demostraron la necesidad de revisar los niveles críticos y las estrategias de fertilización recomendadas, así como la importancia de profundizar en el estudio de este nutriente. Barbazán et al. (2011a)

integraron la información generada en 50 experimentos de respuesta de cultivos a K, incluyendo diferentes suelos, cultivos, historia de chacra y condiciones climáticas en sistemas de siembra directa. Para un rendimiento relativo de 90%, el nivel crítico estimado fue de $0,34 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Figura 1.5), aunque de los 10 sitios con valores entre $0,20$ y $0,30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ se observó respuesta significativa sólo en dos sitios (Barbazán et al., 2011a). Según los autores, el nivel crítico encontrado se encuentra dentro del rango óptimo de las recomendaciones actuales para el cinturón maicero de Estados Unidos, por lo que lo consideran un valor razonable. Este nivel crítico también es similar al rango de $0,25\text{--}0,34 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, reportado como crítico para suelos de Australia (Li et al. 2001, citados por Holland et al., 2014). Posteriormente, Barbazán et al. (2011b) estudiaron el efecto de la textura del suelo o el tipo de cultivo (invierno o verano) sobre este nivel crítico, encontrando que el mismo prácticamente no cambió para ese grupo de experimentos.

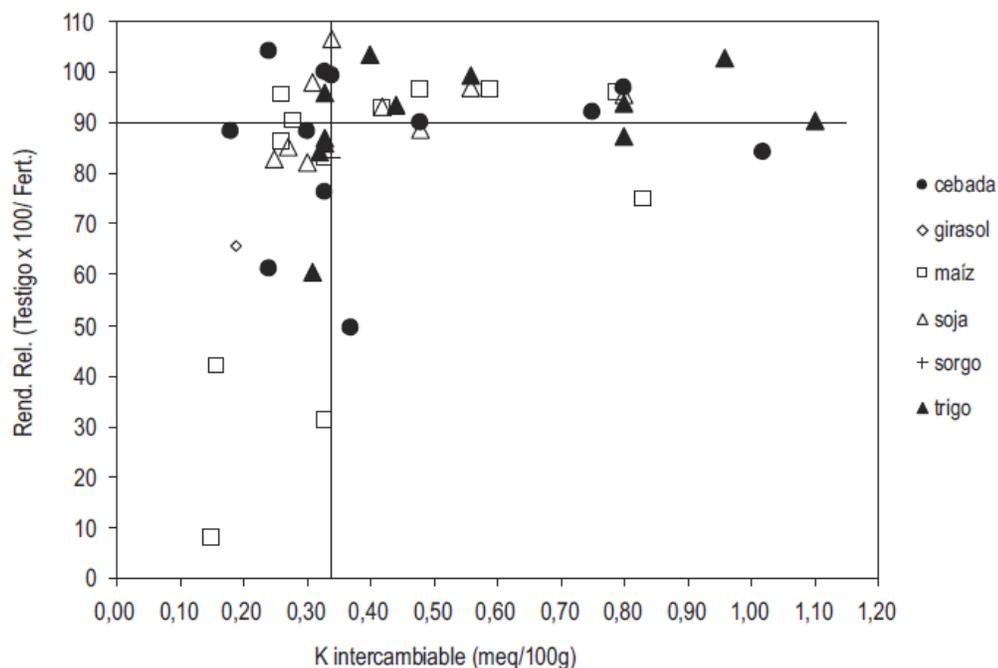


Figura 1.5. Nivel crítico de K intercambiable en suelo para los principales cultivos de secano (Barbazán et al., 2011a).

Entre el 2010 y el 2012, Barbazán et al. (2013a) realizaron 57 experimentos nuevos de respuesta a la fertilización en cultivos, en suelos con contenidos de K intercambiable entre 0,13 y 1,22 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, e integraron esa información a la publicada previamente. Tomando el conjunto de los datos el nivel crítico estimado fue algo mayor al sugerido, pero si se consideran solo los experimentos con el cultivo de soja el nivel crítico para el nuevo conjunto de datos fue un poco menor (Barbazán et al., 2013a).

Otro aspecto fundamental para el manejo del nutriente es conocer qué dosis de fertilizante es necesaria en suelos deficientes para conseguir aumentar los contenidos de K intercambiable hasta el nivel objetivo. Teóricamente serían necesarios 117 $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ para aumentar 0,1 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ el contenido de K de un suelo considerando una profundidad de 20 cm, una densidad de 1,25 g cm^{-3} , y que no existen pérdidas de K por fijación o lavado (88 $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ si la profundidad de muestreo es 15 cm). Barbazán et al. (2011b) estimaron el equivalente fertilizante en 36 suelos por medio de incubaciones en condiciones controladas, reportando que se precisaban dosis de entre 184 y 221 $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ para aumentar 0,1 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ el valor de K intercambiable. Cuando el equivalente fertilizante fue calculado en condiciones de campo, para 15 cultivos de soja muestreados 45-50 días luego de la fertilización, el equivalente promedio fue de 173 $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ y estuvo entre 71 y 500 $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ (Barbazán et al., 2013b). Sin embargo, en los experimentos de Bautés et al. (2009), los incrementos de K intercambiable debido a la fertilización fueron muy bajos ($< 0,02 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) y la fertilización tuvo un efecto significativo únicamente en un tercio de las chacras estudiadas. Coitiño et al. (2014) encontraron que la variación del K intercambiable entre la siembra de un cultivo de soja y la siembra del otro año fue afectada significativamente por la fertilización. En condiciones de no fertilización el K intercambiable disminuyó ($-0,07 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), mientras que aumentó por efecto del agregado de 60 o 240 $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ ($+0,01$ y $+0,05 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente).

Las diferencias en el efecto de la fertilización sobre el K intercambiable del suelo se deberían a la capacidad de fijación de K de cada suelo y a su poder buffer o tampón. En cuatro suelos, del Pino et al. (2012) estudiaron el efecto del agregado de K sobre el K intercambiable y el K en solución, encontrando un aumento lineal en el

K disponible por efecto de la fertilización pero con variaciones según el tipo de suelo. El suelo de textura franco arenosa y muy bajo contenido de arcilla presentó un bajo poder tampón, con un aumento importante del K en solución por el agregado de K, y también una baja capacidad de fijación de K en formas no intercambiables (del Pino et al., 2012). Los demás suelos, con mayor contenido de arcilla, tuvieron un mayor poder de retención del K agregado en el complejo de intercambio (menor contenido de K en solución) y también una mayor cantidad de K fijado en formas no intercambiable (del Pino et al., 2012). En función de lo discutido en secciones previas, se podría suponer que parte del K fijado en formas no intercambiables (y, por lo tanto, no estimado por el análisis de suelo) podría estar disponible para los cultivos siguientes.

También se han estudiado otros aspectos que hacen a la dinámica del K en sistemas agrícolas como ser la liberación del K inmovilizado en los rastrojos (Barbazán et al., 2011c), la variación espacial del nutriente (Coitiño et al., 2014) o el efecto del secado de la muestra sobre la cantidad de K intercambiable extraído (Barbazán et al., 2013a). Un resumen de estos trabajos y sus principales resultados pueden consultarse en trabajos de publicación reciente (Barbazán et al. 2013a y b, Barbazán et al. 2012, Barbazán et al. 2011b). Sin embargo, a excepción del trabajo de Hernández et al. (1988) ya presentado, no se cuenta a nivel nacional con estimaciones de cuál es el aporte del K no intercambiable de los suelos a la nutrición vegetal o de la disponibilidad del K fijado.

1.4. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DEL POTASIO DISPONIBLE

Las metodologías utilizadas para la determinación del contenido de K de los suelos varían según la fracción de K que se pretenda determinar, variando por lo tanto la relación entre el K extraído y el efectivamente disponible para los cultivos. Además, el comportamiento de cada método de análisis puede variar según el tipo de suelo (de la Horra et al., 1993), por lo que el ajuste de un método no es universal y debe ser estudiado para los suelos de cada región. En esta sección se hará foco sobre los métodos más promisorios para la determinación del K disponible y para la cuantificación de las reservas que pueden aportar a la nutrición de los cultivos.

El K intercambiable es considerado la fuente primaria de K para las plantas; por lo tanto, el objetivo de la mayoría de los métodos utilizados para estimar la necesidad de fertilización es cuantificar esta fracción (Knudsen et al., 1982). Para medir el K intercambiable, la mayor parte de los autores revisados utilizaron la extracción con acetato de amonio 1 N a pH 7 (NH_4OAc), lo que concuerda con lo comentado por Knudsen et al. (1982) y Barbagelata y Mallarino (2013) de que es el método más usado para determinar la disponibilidad de K. Según Knudsen et al. (1982), el K intercambiable es definido específicamente como el extraído con NH_4OAc menos el K soluble en agua. En suelos que no son salinos, el K en solución puede ser ignorado por estar presente en niveles mínimos (Helmke y Sparks, 1996), por lo que en la práctica se considera intercambiable a todo el K extraído con NH_4OAc , incluyendo el K en solución.

Si bien existen otros métodos para la determinación del K intercambiable, como el NH_4Cl 1 M (Moody y Bell 2006, Martin y Sparks 1983), acetato de bario 0,5 M (Jackson, 1985), BaCl_2 0,1 M, NaCl 1 M y H_2SO_4 0,025 M (Zarrabi y Jalali, 2008), estos métodos no tendrían un comportamiento superior al NH_4OAc , salvo en algunas situaciones particulares. Zarrabi y Jalali (2008) encontraron que el NH_4OAc fue, de seis métodos evaluados, el que menor correlación tuvo con el K absorbido por plantas de trigo creciendo en invernáculo. Sin embargo, el estudio se realizó en regiones áridas y semiáridas del oeste de Irán sobre suelos calcáreos, donde según Knudsen et al. (1982) el método del BaCl_2 es preferible. Otros métodos, como Mehlich-1 o Mehlich-3, tienen la ventaja de extraer varios nutrientes simultáneamente, pero a los efectos de la determinación del K intercambiable su correlación con el NH_4OAc es muy alta y no serían mejores estimadores del K disponible. Para suelos de Iowa, Barbagelata (2006) reportó una alta correlación entre los métodos NH_4OAc y Mehlich-3 ($R^2 = 0,967$), donde ambos extrajeron cantidades de K muy similares y no se diferenciaron en la predicción de la respuesta a K en maíz y soja.

En suelos de la pampa argentina, de la Horra et al. (1995) encontraron que el NH_4OAc fue el método más correlacionado con el K absorbido por plantas de raigrás en macetas, solamente igualado por el método de resinas (Cuadro 1.2). Los autores

recomiendan el primer método, por ser más simple y porque ambos extraen cantidades semejantes de K. Avellaneda y Jauregui (1995) también reportaron mejor comportamiento del NH_4OAc frente a los otros métodos utilizados para estimar la absorción de K, pero el desempeño del método de resinas fue pobre. En el trabajo de Darunsontaya et al. (2010), en suelos caoliníticos, el método que mejor se correlacionó con la extracción vegetal también fue el NH_4OAc .

A pesar de ser el método más usado, la utilidad del NH_4OAc ha sido cuestionada por no estar siempre bien correlacionado con la respuesta vegetal y por no tener en cuenta la liberación de K desde formas menos lábiles durante el ciclo del cultivo. Resultados de Wang et al. (2010) mostraron buen desempeño del NH_4OAc si se analizan individualmente los suelos, pero el método no permitió una correcta estimación del K disponible para una serie de suelos con diferencias en la disponibilidad de K no intercambiable. Algunos trabajos han encontrado una mejora en la predicción del K disponible al realizar la extracción con NH_4OAc en la muestra de suelo húmeda, sin secar en estufa (Barbagelata y Mallarino 2013, Schulte y Corey 1965) mientras que otros apuntan a la cuantificación de las reservas de K.

El objetivo de la mayoría de los análisis de suelo es proveer una medida de la disponibilidad vegetal de un nutriente, ya sea midiendo su intensidad (disponibilidad inmediata), cantidad (disponibilidad total) o su capacidad buffer (Kopittke y Menzies, 2007). Según Sharpley (1989), con el NH_4OAc se cuantifica el K fácilmente disponible para la absorción vegetal, por lo que estaría representando una medida de intensidad. Sin embargo, como ya se discutió en secciones previas, en condiciones intensivas de cultivo, fracciones de K no intercambiable podrían participar en la nutrición vegetal. Dado que el NH_4OAc no mide el K no intercambiable que puede estar disponible para las plantas, ni las relaciones entre las diferentes fracciones de K del suelo, este método por sí solo no siempre da una estimación fiable de su disponibilidad (Cox et al., 1999). En este sentido, Moody y Bell (2006) encontraron que, a pesar de que la absorción de K de plantas creciendo en invernáculo estuvo altamente correlacionada con los niveles de NH_4OAc , la absorción vegetal fue en promedio 35% mayor que los cambios en el K intercambiable. Estimar las reservas de K permitiría conocer la capacidad de un suelo

de suministrar K en condiciones de extracción muy intensa, donde el K intercambiable no es la única fuente de K para los cultivos.

De acuerdo con Helmke y Sparks (1996), los métodos para determinar el K no intercambiable son numerosos, incluyendo: ácido nítrico 1 N en ebullición (HNO_3), ácido clorhídrico caliente, electro-ultrafiltración, tetrafenilborato de sodio (NaTPB) y resinas de intercambio catiónico. Por definición, el K no intercambiable correspondería a la diferencia entre el K extraído con HNO_3 y el K intercambiable extraído con NH_4OAc (Knudsen et al., 1982) siendo el HNO_3 el método más utilizado para caracterizar la fracción no intercambiable. Según McLean y Watson (1985), el hervido con HNO_3 es principalmente un proceso de disolución mientras que el NaTPB y las resinas de intercambio catiónico serían métodos de equilibrio.

Por ser un fuerte oxidante y utilizarse a altas temperaturas, el HNO_3 oxida la materia orgánica y destruye la estructura tridimensional de los minerales, permitiendo la liberación del K no intercambiable (de la Horra et al., 1995). Sin embargo, durante la extracción con HNO_3 la disolución ácida de los minerales del suelo podría causar una liberación de K desde formas muy poco disponibles (Moody y Bell, 2006). De la Horra et al. (1995) encontraron que éste método fue el menos sensible a las disminuciones de K en suelos debido a la historia de cultivo, no presentando correlación con la disminución del K absorbido por raigrás entre suelos cultivados y sin cultivar. Resultados similares reportan Moody y Bell (2006) al observar que hubo una mayor absorción de K por la planta que el reflejado en los cambios del K extraído con HNO_3 . En el Cuadro 1.2 se presenta un resumen de trabajos donde distintos métodos de extracción de K fueron comparados en condiciones intensivas de cultivo, por medio de experimentos maceteros en invernáculo. Si bien en algunos casos el poder predictivo del HNO_3 fue bueno, no se destaca generalmente como el mejor método para estimar la disponibilidad de K de los suelos, probablemente por la extracción de fracciones de muy baja labilidad.

De acuerdo con Helmke y Sparks (1996), el método de resinas de intercambio catiónico saturadas con hidrógeno o calcio también ha sido ampliamente utilizado para determinar el K no intercambiable. Según los autores, la principal ventaja de las resinas de intercambio es que éstas actúan como una fuente para el K liberado, lo

cual previene la inhibición del proceso. Sin embargo, no todos los trabajos revisados reportaron un buen desempeño de este método y, aun cuando la estimación del K disponible fue buena, no es recomendado frente al NH_4OAc (Surapaneni et al. 2002b, Avellaneda y Jauregui 1995, de la Horra et al. 1995). Además, una de las mayores desventajas de este método es que las resinas son caras y que es un procedimiento tedioso y que lleva mucho tiempo (Helmke y Sparks, 1996).

Según Scott et al. (1960), si durante su extracción el K liberado no es retirado de la solución podría existir un efecto bloqueante sobre la liberación de al menos una parte del K no intercambiable. La acumulación del K reemplazado puede ser reducida usando extracciones sucesivas o métodos de lixiviación, pero esto es laborioso debido a la liberación relativamente lenta del K no intercambiable (Scott et al., 1960). Otra opción sería el uso del NaTPB ($\text{NaB}(\text{C}_6\text{H}_5)_4$) ya que el anión $\text{B}(\text{C}_6\text{H}_5)_4^-$ se combina con el K y precipita como tetrafenilborato de K ($\text{KB}(\text{C}_6\text{H}_5)_4$), mientras el Na^+ actúa como intercambiador para el K^+ interlaminar (Cox et al. 1996, McLean y Watson 1985). Según Cox et al. (1999, 1996), este proceso simula la acción de las raíces y genera liberación de K, por lo que tendría mayor capacidad de estimar el K no intercambiable que puede estar disponible para las plantas durante el ciclo del cultivo. Este método fue desarrollado por Scott et al. (1960) y modificado luego por varios autores (Cox et al. 1996, Jackson 1985, Scott y Reed 1962a; Scott y Reed 1962b, Scott y Reed 1960). Cox et al. (1999) simplificaron el método desarrollado en 1996 de forma de hacerlo más práctico y, más allá de modificaciones puntuales, éste es el método en el cual se basan la mayoría de los trabajos más recientes (Fernández et al. 2008, Murashkina et al. 2007, Barbagelata 2006, Carey y Metherell 2003a, Schindler et al. 2002).

En condiciones de alta intensidad de extracción de K, y con períodos cortos de incubación, el NaTPB tuvo una mejor capacidad de predecir la absorción vegetal que el NH_4OAc en la mayoría de los trabajos revisados (Cuadro 1.2). Según Cox et al. (1999) a medida que aumenta el tiempo de incubación la correlación entre el K extraído y el absorbido por las plantas disminuye porque la cantidad de K no intercambiable extraída aumenta. A pesar de que con altas concentraciones y tiempos de incubación prolongados se puede extraer la mayoría del K total de un suelo,

tiempos de contacto relativamente cortos serían adecuados para extraer la fracción disponible para las plantas (Jackson, 1985). Esto explicaría porque la mayoría de los trabajos que probaron este método con tiempos cortos de incubación (menores a 1 hora) lograron estimar correctamente el K disponible para consumo vegetal, pero no así los que utilizaron períodos prolongados (72-168 horas) (Cuadro 1.2).

Cox et al. (1999) estudiaron también la capacidad del NaTPB de estimar los cambios en el K del suelo debido a la extracción por los cultivos o a agregados de K vía fertilizante. El NaTPB fue capaz de estimar cambios en el balance de K con independencia del tipo de suelo, mientras que el comportamiento del NH_4OAc dependió en mayor medida de las características de cada suelo. Al estudiar la evolución del K del suelo en función del aumento de la extracción por los sucesivos cortes del raigrás, Jackson (1985) también encontró que el NaTPB reflejó mejor estos cambios que el NH_4OAc . El NH_4OAc disminuyó rápidamente y luego tuvo poca variación, mientras que el NaTPB presentó una disminución más gradual, indicando que una gran cantidad de K de reserva fue liberada luego de que ocurrió la mayor reducción del K intercambiable (Jackson, 1985). En base a estos resultados, el NaTPB parece ser un método promisorio para estimar la disponibilidad de K en sistemas intensivos y monitorear los cambios en los contenidos de K del suelo. Sin embargo en condiciones de campo, donde la intensidad de extracción de K no es tan alta, la ventaja del NaTPB sobre el NH_4OAc como indicador de la disponibilidad de K y su evolución no parece ser tan concluyente.

Cuadro 1.2. Capacidad de distintos métodos de determinación de K de estimar el K absorbido por las plantas en condiciones de alta presión de extracción (experimentos maceteros).

Método	Relación	N° suelos	Cultivo	Referencia
NH ₄ OAc	R ² = 0,79 - 0,88	30	<i>Lolium perenne</i>	Avellaneda y Jauregui (1995) ¹
HNO ₃	R ² = 0,59 - 0,72			
H ₂ CO ₃	R ² = 0,49 - 0,75			
K soluble	R ² = 0,23 - 0,69			
Resinas	R ² = 0,29 - 0,55			
NH ₄ OAc	r = 0,92	5 (* 6 tratamientos)	<i>Medicago sativa</i>	Conyers y McLean (1969) ²
HNO ₃	r = 0,91			
HCl 0,5 N	r = 0,91			
NaTPB 72 h	r = 0,86			
Mg(OAc) ₂ 0,5 N	r = 0,79			
H ₂ SO ₄ +HClO ₄ +HF	r = 0,72			
NH ₄ OAc	r ² = 0,89	11	<i>Triticum aestivum</i>	Cox et al. (1999) ³
NaTPB 1 min	r ² = 0,98			
NaTPB 5 min	r ² = 0,98			
NaTPB 15 min	r ² = 0,95			
NH ₄ OAc	R ² = 0,97	18	<i>Panicum maximum</i>	Darunsontaya et al. (2010) ⁴
HNO ₃	R ² = 0,62			
NaTPB 168 h	R ² = 0,45			
NH ₄ OAc	r = 0,95	9	<i>Lolium multiflorum</i>	de la Horra et al. (1995)
Mehlich I	r = 0,96			
Resinas	r = 0,95			
CaCl ₂	r = 0,78			
HNO ₃ (100 °C)	r = 0,93			
HNO ₃ (113°C)	r = 0,90			
NH ₄ OAc	r = 0,94	9	<i>Medicago sativa</i>	Hunter y Pratt (1957)
HNO ₃	r = 0,84			
H ₂ SO ₄	r = 0,99			
QTK	r ² = 0,35	13	<i>Lolium perenne</i>	Jackson (1985) ⁵
NH ₄ OAc	ns			
Acetato de Bario	r ² = 0,77			
NaTPB 16 h	r ² = 0,90			
Kc	r ² = 0,44			
QTK	r ² = 0,53	25		
NH ₄ OAc	r ² = 0,51			
NaTPB 16 h	r ² = 0,94			
Kc	r ² = 0,27			
NH ₄ OAc	R ² = 0,73	72	<i>Medicago sativa</i>	Liu y Bates (1990) ⁶
Mehlich 3	R ² = 0,72			
AB-DTPA	R ² = 0,70			
NaCl	R ² = 0,61			
HNO ₃	R ² = 0,76			

Cuadro 1.2. (Continuación). Capacidad de distintos métodos de determinación de K de estimar el K absorbido en condiciones de alta presión de extracción.

Método	Relación	N° suelos	Cultivo	Referencia
CaCl ₂	r = 0,83	11	<i>Panicum maximum</i>	Moody y Bell (2006)
NH ₄ OAc	r = 0,92			
HNO ₃	r = 0,97			
NaTPB 15 min	r = 0,99			
NaTPB 60 min	r = 0,95			
CaCl ₂	r = 0,75	27	<i>Avena sativa</i>	
NH ₄ OAc	r = 0,99			
HNO ₃	r = 0,74			
NaTPB 15 min	r = 0,89			
NaTPB 60 min	r = 0,77			
NH ₄ OAc	r = 0,31	16	<i>Avena sativa</i>	Oelsgle et al. (1975)
NaTPB 15 min	r = 0,64			
NH ₄ OAc seco	r = 0,79	9	<i>Lolium perenne / Avena sativa</i>	Schulte y Corey (1965) ⁷
NH ₄ OAc húmedo	r = 0,97			
NaTPB 15 min	r = 0,99			
Δ NaTPB 16 h	r = 0,98			
QTK	R ² = 0,64	19	<i>Lolium perenne</i>	Surapaneni et al. (2002a); Surapaneni et al. (2002b) ⁸
NH ₄ OAc	R ² = 0,60			
Resinas	R ² = 0,61			
Kc	R ² = 0,33			
Step K	R ² = 0,46			
HNO ₃	R ² = 0,92			
NaTPB 16 h	R ² = 0,84			
QTK + Kc	R ² = 0,88			
NH ₄ OAc + Kc	R ² = 0,89			
NH ₄ OAc	r ² = 0,28	4 (*5 dosis K)	<i>Lolium perenne</i>	Wang et al. (2010) ⁹
NaTPB 30 min	r ² = 0,57			
NaTPB 60 min	r ² = 0,83			
NaTPB 120 min	r ² = 0,86			

¹Avellaneda y Jauregui (1995) – valores mayores de R² corresponden a la ecuación ajustada según textura

²Conyers y McLean (1969) – 6 tratamientos: testigo, 2 dosis de K, 3 relaciones suelo arena

³Cox et al. (1999) – ajuste del NH₄OAc sin dos suelos que se escapaban de la tendencia general

⁴Darunsontaya et al. (2010) – NaTPB: extracción del K en 1 g de arcilla y convertido a K en suelo en función del contenido de arcilla

⁵Jackson (1985) – QTK: extracción con NH₄OAc durante 2 min; Kc según Blakemore et al. (1972), citados por Jackson (1985)

⁶Liu y Bates (1990) – AB-DTPA: NH₄HCO₃ 1 M + DTPA 0,005 M (pH 7,6) 15 min. Rel suelo:sol 1:2

⁷Schulte y Corey (1965) – K extraído con NH₄OAc se realizó en muestra seca y en muestra húmeda; NaTPB sin NaCl. ΔNaTPB 16 h: diferencia en la cantidad extraída antes y después del cultivo

⁸Surapaneni et al. (2002a, b) – QTK: extracción con NH₄OAc durante 2 min; Kc y Step K: extracción secuencial con HNO₃ según Blakemore et al. (1987), citados por Surapaneni et al. (2002a, b); HNO₃: primera extracción del método Kc

⁹Wang et al. (2010) – NaTPB sin el agregado de NaCl

Schindler et al. (2002) compararon la capacidad de distintos métodos en estimar la concentración de K en plantas de maíz en suelos de Dakota, para condiciones de campo (ocho suelos) y condiciones de invernáculo (cuatro suelos). Encontraron que cualquiera de los métodos evaluados serían buenos estimadores del K disponible, presentando los métodos CaCl_2 y NH_4OAc un desempeño superior (Cuadro 1.3). Sostienen que dada la mineralogía de los suelos estudiados (dominancia de montmorillonita) no se esperaba que la fijación del K agregado fuera considerable y sí que los métodos de estimación de la fracción más lábil presentaran buen ajuste (CaCl_2 y NH_4OAc).

Cuadro 1.3. Coeficientes de regresión entre los distintos métodos evaluados y la concentración de K en hojas de maíz (Schindler et al., 2002).

Método	Campo	Invernáculo
NH_4OAc	0,68	0,56
CaCl_2 0,01M	0,73	0,67
NaTPB 5 min	0,63	0,71
NaTPB 15 min	0,62	0,72

Barbagelata (2006) comparó la capacidad de tres métodos (NH_4OAc , Mehlich-3 y NaTPB) de estimar el nivel crítico de K para maíz y soja en 54 suelos de Iowa, utilizando tres modelos: Cate-Nelson, Lineal-Plateau y Cuadrático-Plateau. En función del modelo los ajustes (R^2) para la estimación del nivel crítico en maíz estuvieron en el rango de 0,24-0,28; 0,25-0,33 y 0,29-0,32 para NH_4OAc , Mehlich-3 y NaTPB respectivamente. Para el cultivo de soja, los valores de R^2 fueron 0,18-0,24 para NH_4OAc , 0,21-0,24 para Mehlich-3 y 0,42-0,44 para NaTPB. Sin embargo, según el autor, estos resultados no permiten concluir que el NaTPB haya sido consistentemente mejor en predecir el nivel crítico lo que, sumado al hecho de que es un método bastante más costoso y laborioso, hacen que no recomiende su adopción.

Fernández et al. (2008) estudiaron, durante dos años, la capacidad del NH_4OAc y del NaTPB en predecir la respuesta a K en el cultivo de soja en un suelo franco limoso de Indiana con distintos niveles de K. Encontraron que el NaTPB fue mejor

estimador de la disponibilidad de K un año, pero a lo largo de los dos años el NH_4OAc fue igual o mejor. Evaluaron también la capacidad de cada método en reflejar los cambios en el suelo debido a la extracción del cultivo, correlacionando lo extraído por éste con la diferencia en los valores de K entre el suelo cultivado y un testigo en barbecho. En el primer año, el NaTPB se comportó mejor (NaTPB: $r^2=0,438$, $b=1,140$; NH_4OAc : $r^2=0,427$, $b=1,478$). Sin embargo, en el segundo año (año seco), el ajuste fue muy bajo para el NH_4OAc ($r^2=0,231$ $p=0,11$) y el NaTPB no fue capaz de reflejar los cambios en el K extraído ($r^2=0,003$). Resultados similares son comentados por Edmeades et al. (2010) para suelos de Nueva Zelanda, quienes sostienen que hay muy poca evidencia para apoyar la visión de que el NaTPB es superior al NH_4OAc en términos de predecir la producción total de las pasturas. El NaTPB tendría mejor desempeño en suelos con bajos niveles de K intercambiable pero que no presentaron respuesta a la fertilización (Edmeades et al., 2010).

Los trabajos que evaluaron el NaTPB en condiciones de campo no obtuvieron resultados concluyentes que permitan recomendar el NaTPB sobre los métodos rutinarios de estimación de la fracción intercambiable (Edmeades et al. 2010, Fernández et al. 2008, Barbagelata 2006, Carey y Metherell 2003a, Schindler et al. 2002). El NaTPB no sería un peor estimador del K disponible o de los balances pero, al no ser consistentemente mejor, su mayor laboriosidad y costo no lo harían adecuado para el uso como análisis de rutina. Estas diferencias entre las conclusiones de los experimentos de invernáculo y de campo podrían deberse a la mayor presión de extracción de K que ocurre en las macetas por el menor volumen de suelo explorado, lo que genera mayor agotamiento del K intercambiable (Schindler et al., 2002). Otros autores (Edmeades et al. 2010, Carey y Metherell 2003b) sostienen además que no considerar la absorción de K por debajo de la profundidad de muestreo (7,5 cm) podría generar errores a la hora de calcular los balances de K. Además, según Fernández et al. (2008) el NaTPB sería igual de sensible que el NH_4OAc bajo algunas condiciones ambientales como períodos de sequía, que podrían influir en los procesos de fijación y liberación de K. Moody y Bell (2006) reportaron suelos con valores altos de reservas pero que no actúan como buffer para la absorción vegetal, por lo que destacan la importancia de llevar adelante estudios

mineralógicos. Los autores que no encontraron mejor desempeño en el NaTPB recomiendan más estudios pero en general no desestiman el método ya que sería una buena opción para conocer las reservas de K (e.g. Fernández et al. 2008, Moody y Bell 2006, Carey y Metherell 2003b).

2. DINÁMICA DEL POTASIO EN SUELOS AGRÍCOLAS DEL LITORAL
OESTE DEL URUGUAY
POTASSIUM DYNAMICS IN WESTERN URUGUAYAN
AGRICULTURAL SOILS

Agustín Núñez

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA)

Ruta 50 km 11 (70006), Colonia (Uruguay); +598-45748000; anunez@inia.org.uy;

Autor de contacto

Alejandro Morón

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA)

Ruta 50 km 11 (70006), Colonia (Uruguay); +598-45748000;

alejandromoron.uy@gmail.com

Título breve: Dinámica del potasio

Palabras clave: potasio no intercambiable, reservas de potasio, illita, tetrafenilborato de sodio

Keywords: nonexchangeable potassium, potassium reserves, illite, sodium tetraphenylboron

2.1. RESUMEN

Conocer la dinámica del potasio (K) y cuantificar las reservas que aportan a la nutrición de los cultivos es fundamental para un correcto manejo de este nutriente. Los objetivos de este trabajo, realizados en suelos agrícolas de Uruguay, fueron: (i) evaluar un indicador que permita cuantificar el *pool* de reserva de K de los suelos y (ii) estudiar el comportamiento de los diferentes suelos frente a la fertilización. Para esto, se instaló un experimento en invernáculo con el cultivo de raigrás perenne (*Lolium perenne*, cv. Horizon) en seis suelos fertilizados previo a la siembra con 0, 100, 200 y 400 mg K kg suelo⁻¹. El experimento duró 320 días durante los cuales se realizaron cinco evaluaciones de rendimiento y concentración de K en planta, generándose distintos balances. En cada una de esas evaluaciones se determinó la evolución del K en suelo con dos métodos: acetato de amonio 1 N (NH₄OAc) y tetrafenilborato de sodio con 5 minutos de incubación (NaTPB). Suelos con mayor contenido de illita tuvieron mayor capacidad de suministro de K ($p < 0,05$) lo que fue mejor estimado por el NaTPB ($R^2 = 0,96$) que por el NH₄OAc ($R^2 = 0,73$). Los balances de K también estuvieron mejor correlacionados con el NaTPB que con el NH₄OAc ($R^2 = 0,72$ y $0,63$ respectivamente), aunque ninguno de los métodos tuvo la capacidad de reflejar los balances positivos. Sin embargo, los balances positivos generados con incubaciones en condiciones controladas, sin crecimiento vegetal, sí fueron detectados por ambos métodos y nuevamente el NaTPB tuvo un mejor comportamiento (NH₄OAc, $R^2 = 0,88$; NaTPB, $R^2 = 0,97$). El NaTPB extrae, además del K intercambiable, una parte del K no intercambiable lo que explicaría su mejor estimación del K disponible y la mayor capacidad de reflejar los balances de K en los suelos en condiciones de alta intensidad de extracción.

2.2. SUMMARY

Knowledge of potassium (K) dynamics and the quantification of plant-available K reserves are essential for the right management of this nutrient. The objectives of this study, conducted in Uruguayan agricultural soils, were: (i) to evaluate a method of soil analysis that allows the quantification of nonexchangeable K that is plant-available and (ii) to compare soil responses to K fertilization. Perennial ryegrass (*Lolium perenne*, cv. Horizon) was grown in six agricultural soils fertilized with 0, 100, 200 and 400 mg K kg⁻¹ in a greenhouse experiment. Five measurements of yield and plant K concentration were done along 320 days, resulting in different soil K balances. Ammonium acetate- (NH₄OAc) and sodium tetraphenylboron- (NaTPB; 5 min extraction period) extractable K was determined in two soil samples for every treatment at every evaluation. Illitic soils had more plant-available K ($p < 0.05$) which was better estimated with the NaTPB ($R^2 = 0.97$) than with the NH₄OAc method ($R^2 = 0.78$). Moreover, soil K balances were also better correlated with NaTPB than with NH₄OAc ($R^2 = 0.73$ and 0.63 , respectively), but none of the methods were suitable for identifying positive K balances. However, when the positive balances were established by K addition and incubation without plant growth, both methods had a good relationship with the K balances, and again the NaTPB was better than the NH₄OAc ($R^2 = 0.98$ and 0.88 , respectively). The superior estimation of plant-available K and the strongest relationship with soil K balance of the NaTPB method was due to the capacity of this method to extract exchangeable K plus a proportion of nonexchangeable K that is plant-available.

2.3. INTRODUCCIÓN

Investigaciones recientes reportaron disminuciones en los contenidos de potasio (K) intercambiable en suelos agrícolas de Uruguay y cultivos con deficiencia o respuesta a la fertilización con K (Barbazán *et al.*, 2007; Morón *et al.*, 2009; Morón & Quincke, 2010; Barbazán *et al.*, 2011; Bordoli *et al.*, 2012). Esta situación ha determinado que el uso de la fertilización potásica sea cada vez más frecuente en la agricultura. A partir de la información generada en 50 experimentos, Barbazán *et al.* (2011) establecieron 133 mg kg^{-1} de K intercambiable como nivel crítico para la mayoría de los cultivos de secano. Sin embargo, esta información muestra una marcada variabilidad de comportamiento en los suelos con niveles inferiores al mencionado nivel crítico, lo que podría explicarse en parte por diferencias en la dinámica y reservas de K de esos suelos.

Las plantas absorben el K desde la solución del suelo, el cual es rápidamente repuesto por el K intercambiable y más lentamente por el K no intercambiable (McLean & Watson, 1985; Zörb *et al.*, 2014). En general, el stock de K intercambiable es suficiente para satisfacer los requerimientos de un cultivo (Sparks & Huang, 1985) por lo que su determinación con acetato de amonio 1 N a pH 7 (NH_4OAc) es el método más utilizado como indicador de la disponibilidad de K. Sin embargo, en condiciones de extracción muy intensa el K no intercambiable o de reserva puede ser una fuente efectiva de K para los cultivos (Hernández *et al.*, 1988; Cox *et al.*, 1999; Schindler *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2010). Por esto, utilizar únicamente el K determinado con NH_4OAc como indicador de su disponibilidad puede llevar a errores de manejo, principalmente en las decisiones de fertilización de suelos con contenidos de K intercambiable cercanos al nivel crítico. Además de las consecuencias en el corto plazo, la falta de ajuste del indicador podría afectar en el mediano y largo plazo el monitoreo de la evolución de la disponibilidad de K en el suelo. La falta de ajuste del K intercambiable como indicador del K disponible será mayor cuanto mayor sea el contenido y disponibilidad de reservas de un suelo, lo que depende en gran medida del contenido de arcillas 2:1, especialmente illita (Sharpley, 1989; Cox *et al.*, 1996, 1999; Barré *et al.*, 2008; Römheld & Kirkby, 2010; Wang *et al.*, 2010).

Para estimar correctamente la disponibilidad de K se debería utilizar un indicador que extraiga el K intercambiable más la fracción de K no intercambiable efectivamente disponible para las plantas (Cox *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 2010). Si bien el ácido nítrico 1 N en ebullición ha sido el método tradicional para la estimación del K no intercambiable, la disolución ácida de los minerales del suelo durante la extracción podría causar una liberación de K desde formas muy poco disponibles (Moody y Bell, 2006). En condiciones de alta intensidad de extracción de K, el método del tetrafenilborato de sodio (NaTPB), desarrollado por Scott *et al.* (1960) y modificado luego por otros investigadores (Jackson, 1985; Cox *et al.*, 1999) parece ser la mejor opción para lograr este objetivo. La extracción de K con NaTPB simula la acción de las raíces, agotando el K en la solución del suelo y promoviendo la liberación de K intercambiable y no intercambiable (Cox *et al.*, 1999). La cantidad de K extraído con este método depende del tiempo de incubación, recomendándose en general tiempos relativamente cortos (minutos a horas) cuando el objetivo es determinar la fracción de K disponible para un cultivo (Jackson, 1985; Cox *et al.*, 1999). En un experimento macetero con varios cultivos de trigo, Cox *et al.* (1999) encontraron que la extracción de K con NaTPB con 5 minutos de incubación se correlacionó mejor con el K disponible que el NH₄OAc ($r^2 = 0,980$ y $0,889$ respectivamente). En condiciones de alta intensidad de extracción de K, la mayoría de los trabajos revisados coinciden en un mejor comportamiento del NaTPB frente al NH₄OAc para la determinación del K disponible (Schulte & Corey, 1965; Oelsligle *et al.*, 1975; Jackson, 1985; Schindler *et al.*, 2002; Surapaneni *et al.*, 2002a y b; Moody & Bell, 2006; Wang *et al.*, 2010).

Para una producción sustentable es esencial contar con estimaciones de las reservas de K de los suelos, de forma de ajustar la fertilización para asegurar que el K no está siendo agotado (Moody & Bell, 2006). Es necesario por lo tanto un método que refleje adecuadamente los cambios que ocurren en el contenido de K de los suelos como resultado del balance generado entre las entradas y salidas de K del sistema. La investigación nacional se ha enfocado principalmente en evaluar la respuesta vegetal al K y la capacidad predictiva del NH₄OAc, siendo escasos los

trabajos que consideran otros indicadores o la relación entre los balances de K y los cambios en su disponibilidad.

La hipótesis de este trabajo fue que es posible cuantificar, además del K intercambiable, la fracción más lábil de las reservas y lograr así una mejor estimación del K disponible y de los cambios en los contenidos de K de los suelos. Los objetivos fueron, para suelos agrícolas del litoral del Uruguay: (i) identificar un indicador que permita cuantificar el *pool* de reserva de K de los suelos, mejorando la estimación del K efectivamente disponible para las plantas y (ii) estudiar el comportamiento de los diferentes suelos frente a la fertilización y distintos balances de K.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. Suelos

Se seleccionaron seis suelos del departamento de Soriano, en el Litoral Oeste de Uruguay, bajo uso agrícola continuo en siembra directa durante al menos los últimos tres cultivos. El objetivo fue seleccionar suelos con contenidos de K intercambiable medio a bajo y diferencias en algunas características que determinan la dinámica y disponibilidad de K: textura, material parental, capacidad de intercambio catiónico (CIC), reservas estimadas de K. En otoño de 2011, los suelos fueron muestreados con calador a 0-15 cm de profundidad colectando 120 kg de suelo en un radio aproximado de 15 m alrededor de un punto georeferenciado. Luego las muestras se pasaron sin moler por un tamiz de 7 mm y se secaron al aire.

Previo al análisis físico-químico, las muestras fueron secadas en estufa a 40 °C y molidas hasta un tamaño menor a 2 mm, en las Tablas 2.1 y 2.2 se presentan las principales características de los suelos estudiados. Se determinó el contenido de carbono orgánico por medio de combustión a 900 °C y detección de CO₂ por infrarrojo utilizando un equipo LECO *Truspec*; la medición del pH se realizó con una relación suelo:agua 1:2,5 y determinación potenciométrica. La textura se determinó por el método de Bouyoucus (Bouyoucus, 1962) y la CIC a partir de la suma de bases totales (Jackson, 1964) y acidez titulable (Camargo *et al.*, 1986).

El K intercambiable se extrajo con NH₄OAc 1 N a pH 7 (Jackson, 1964) y se determinó además el K extractable con NaTPB (Cox *et al.*, 1999). La extracción de K con NaTPB se realizó incubando sin agitar 0,5 g de suelo con 3 mL de solución extractiva (NaB(C₆H₅)₄ 0,2 M + EDTA 0,01 M + NaCl 1,7 M) durante 5 minutos a temperatura ambiente. Luego se agregaron 25 mL de una solución NH₄Cl 0,5 M + CuCl₂ 0,11 M para detener la reacción, se llevó a plancha a 150°C y se dejó hervir hasta disolución del precipitado (30-45 minutos de ebullición). El extracto se llevó a volumen final de 50 mL, se dejó reposar y se filtró una alícuota de 20 mL del sobrenadante con papel de filtro *Whatman* 42 en frascos conteniendo tres gotas de HCl 6 M. La lectura de K en los extractos de cada técnica se realizó por emisión con un equipo *Perkin Elmer AAnalyst 700*.

Tabla 2.1. Principales características físico-químicas de los suelos estudiados.

Id	Tipo de suelo ^a	UM ^b	C org %	pH (agua)	Ar -----	L %	Ac -----
A	Argisol Dístrico Ócrico	CC	0,86	5,4	81	10	8
B	Brunosol Subéutrico Lúvico	CC	1,41	5,2	75	10	14
C	Brunosol Éutrico Típico vértico	Bq	2,64	5,6	50	27	24
D	Brunosol Subéutrico/Éutrico	CC	1,28	5,4	71	12	16
E	Brunosol Éutrico Típico vértico	LC/Ri	3,03	6,0	34	30	36
F	Brunosol Éutrico Típico mod prof	FB	2,37	6,0	44	30	26

^aClasificación de los suelos según *Soil Taxonomy*: A-ArgialbolTípico, B-Argiudol Abrúptico, C-Argiudol Páquico, D-Argiudol Abrúptico, E-Argiudol vértico, F-Hapludol Típico

^bAsociación de suelos a escala 1:1.000.000 según *Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay*
CC: Cuchilla del Corralito. Bq: Bequeló. LC/Ri: La Carolina/Risso. FB: Fray Bentos (MAP/DSF, 1976). Ar: arena, L: limo, Ac: arcilla

La caracterización mineralógica de los suelos fue realizada mediante difracción de rayos X en roca total y arcillas en el Centro de Investigaciones Geológicas de La Plata (Universidad de La Plata-Argentina) a partir de la metodología propuesta por Moore y Reynolds (1997). No se encontraron diferencias importantes en la mineralogía de la roca total ni en la cristalinidad de los minerales arcillosos, por lo que se presentan únicamente los datos sobre mineralogía de la fracción arcilla (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Mineralogía de la fracción arcilla, CIC y contenido de K de los suelos estudiados.

Suelo	I-Mi ^a	Sm ^b	I-Sm ^c	Caol ^d	Cl ^e	CIC ₇ ^f	K int ^g	NaTPB ^h	K-res ⁱ
	----- % -----					cmol _c kg ⁻¹	---- mg K kg de suelo ⁻¹ --		
A	--	55	20	15	10	7,0	78	135	58
B	t	70	5	20	5	12,4	72	125	53
C	15	55	20	5	5	22,8	187	377	190
D	5	50	5	40	t	12,4	109	188	79
E	t	90	10	t	t	34,8	211	370	159
F	15	75	10	--	--	23,4	230	608	378

^a Illita-Mica (t: trazas < 1%)

^b Esmectita

^c Interestratificado illita-esmectita

^d Caolinita

^e Clorita

^f Capacidad de intercambio catiónico a pH 7

^g Potasio intercambiable determinado con acetato de amonio 1 N a pH 7 (Jackson, 1964)

^h Potasio determinado con tetrafenilborato de sodio 5 minutos de incubación (Cox et al., 1999)

ⁱ Potasio de reserva (NaTPB – K int)

2.4.2. Capacidad de aporte de potasio y respuesta a la fertilización

Con el objetivo de conocer la capacidad de aporte de K de los suelos se instaló un experimento en invernáculo con cultivo de raigrás perenne (*Lolium perenne*, cv. Horizon) en macetas conteniendo 0,9 kg de suelo seco. Para generar distintos niveles de disponibilidad inicial de K, previo a la siembra se agregaron 0, 100, 200 y 400 mg K kg de suelo⁻¹ utilizando una solución de KCl. Se agregaron luego 50 mL de una solución nutritiva libre de K (Waugh & Fitts, 1966) y se mantuvo cada maceta a capacidad de campo durante una semana para que se estableciera el equilibrio entre los distintos *pools* de K. En mayo de 2011 se sembraron 20 semillas de raigrás por maceta dejando 16 plantas una vez ocurrida la germinación. Para evitar deficiencias de otros nutrientes, se agregaron 50 mL de la solución nutritiva libre de K luego de cada corte y el contenido de agua se mantuvo cercano a capacidad de campo mediante riegos periódicos. Los cortes se realizaron a 2 cm de altura desde el suelo cada cinco semanas aproximadamente hasta que el crecimiento se detuvo por falta de K.

Para estudiar la asociación entre la absorción acumulada de K por el raigrás y los cambios en la disponibilidad de K del suelo fue necesario realizar un muestreo frecuente de los suelos. Para evitar que esto afectara la relación suelo-planta, y asegurar además un muestreo representativo, el experimento se inició con 18 repeticiones y en cada momento de muestreo dos macetas por tratamiento fueron retiradas del experimento, siendo éstos los momentos de evaluación o sacrificio. Dependiendo de la cantidad de muestra vegetal cosechada, los sacrificios se hicieron cada uno o dos cortes, agrupando en este último caso el material cosechado en dos cortes. Se realizaron un total de nueve cortes y cinco sacrificios hasta que el crecimiento vegetal se detuvo, finalizando el experimento con ocho repeticiones.

En cada sacrificio, el suelo de las dos repeticiones retiradas se separó de los restos vegetales, se secó en estufa a 40°C y se molió para analizar el contenido de K con NH₄OAc y NaTPB. Las muestras de vegetal (suma de cortes + macollos) se secaron en estufa a 60°C y se determinó el rendimiento de materia seca y la concentración de K por vía seca de acuerdo a la metodología propuesta por Bataglia (1983). El contenido de K de las raíces fue evaluado en algunas repeticiones siendo siempre muy bajo, menor al 5% del total acumulado en la parte aérea del primer sacrificio. Debido a la poca cantidad de K contenido en las raíces y a la dificultad de lograr una correcta recuperación y limpieza de éstas sin que el K se pierda durante el lavado, se decidió despreciar el contenido de las raíces.

Para los tratamientos testigo se determinó la absorción de K desde formas no intercambiables en todo el período a partir de la fórmula propuesta por Surapaneni *et al.* (2002a):

$$\text{Aporte de K no int} = K \text{ absorbido} - \Delta K \text{ int} \quad (1)$$

Donde: $K \text{ absorbido}$ (mg K absorbido kg de suelo⁻¹) = cantidad total de K removida por el raigrás

$\Delta K \text{ int}$ (mg K int kg de suelo⁻¹) = cambio de K intercambiable en el suelo durante el experimento: $K \text{ int antes del cultivo} - K \text{ int luego del cultivo}$

En los tratamientos fertilizados se estimó la recuperación aparente del fertilizante a partir de la fórmula:

$$\% \text{ Recuperación aparente} = \frac{(\text{Extracción tmo} - \text{Extracción testigo}) * 100}{\text{Dosis tmo}} \quad (2)$$

Donde: % *Recuperación aparente* = cantidad de K absorbido por el raigrás que se supone proveniente del fertilizante

Extracción tmo (mg K kg de suelo⁻¹) = cantidad de K total removida por el raigrás para el tratamiento con la dosis *x* en un suelo dado

Extracción testigo (mg K kg de suelo⁻¹) = cantidad de K total removida por el raigrás en el tratamiento testigo de ese suelo

Dosis tmo (mg K kg de suelo⁻¹) = cantidad de K agregada en el tratamiento *x*

2.4.3. Destino del potasio agregado (incubaciones)

Para conocer el destino del K agregado se realizó un experimento complementario donde se incubaron muestras de 0,1 kg de suelo tamizado a 7 mm con dosis de 0, 200 y 400 mg K kg de suelo⁻¹. El K se agregó con una solución de KCl, se mezcló bien con el suelo y las muestras fueron mantenidas cercanas a capacidad de campo y a 25°C durante 30, 60 y 90 días. Una vez terminada la incubación correspondiente, las muestras fueron secadas a 40°C y molidas hasta un tamaño menor a 2 mm para la determinación de K con NH₄OAc y NaTPB.

2.4.4 Análisis de los datos

En el invernáculo el experimento se planteó como un factorial de 6 suelos x 4 dosis de K con un diseño de bloques completos al azar. Las determinaciones vegetales se realizaron en los ocho bloques que estuvieron presentes durante todo el experimento de forma de contar con datos balanceados y respetar los supuestos para el análisis de la varianza. Para el análisis de las medidas en suelo se utilizaron las dos repeticiones analizadas en cada sacrificio, considerando a los bloques anidados dentro de cada sacrificio. Dado que las observaciones vegetales no se realizaron en las mismas unidades experimentales que las observaciones de suelo, la relación suelo-vegetal se estudió a partir de las medias de los tratamientos.

Las incubaciones con agregado de K se realizaron en un experimento factorial de 6 suelos x 3 dosis de K x 3 tiempos de incubación, utilizando un diseño completamente aleatorizado con tres repeticiones.

Para conocer la capacidad de cada método de análisis de K de reflejar los cambios ocurridos en el suelo se estudió la relación entre los cambios en los valores de K de los suelos (ΔK) y los distintos balances generados en los experimentos. Se realizaron análisis de regresión lineal para estudiar la capacidad de los distintos métodos de determinación de K de estimar la dinámica del K de los suelos (suministro de K a las plantas, aporte de K no intercambiable, balances de K). Para el análisis estadístico se utilizaron los programas Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2014) y SAS[®] versión 9.2 (SAS Institute, Cary, North Carolina, USA).

2.5. RESULTADOS

2.5.1. Comportamiento vegetal

2.5.1.1. Extracción de potasio

Se encontraron diferencias en la capacidad de aporte de K de los suelos, en su capacidad de mantener el aporte en el tiempo y en el efecto de la fertilización sobre la extracción de K ($p < 0,01$). En los tratamientos testigo de los suelos A, B, D y E, el crecimiento del raigrás prácticamente se detuvo luego de los 190 días de cultivo, mientras que en los suelos C y F el crecimiento se prolongó hasta los 320 días (Figura 2.1a). En los suelos C y E, la extracción inicial de K fue similar, pero luego de los 190 días el suelo E no fue capaz de mantener el suministro de K en cantidades suficientes para el crecimiento vegetal. Cuando los suelos fueron fertilizados con 400 mg K kg de suelo⁻¹ (Figura 2.1b), la disponibilidad de K para el cultivo fue mayor y permitió mantener el crecimiento vegetal durante todo el período de estudio.

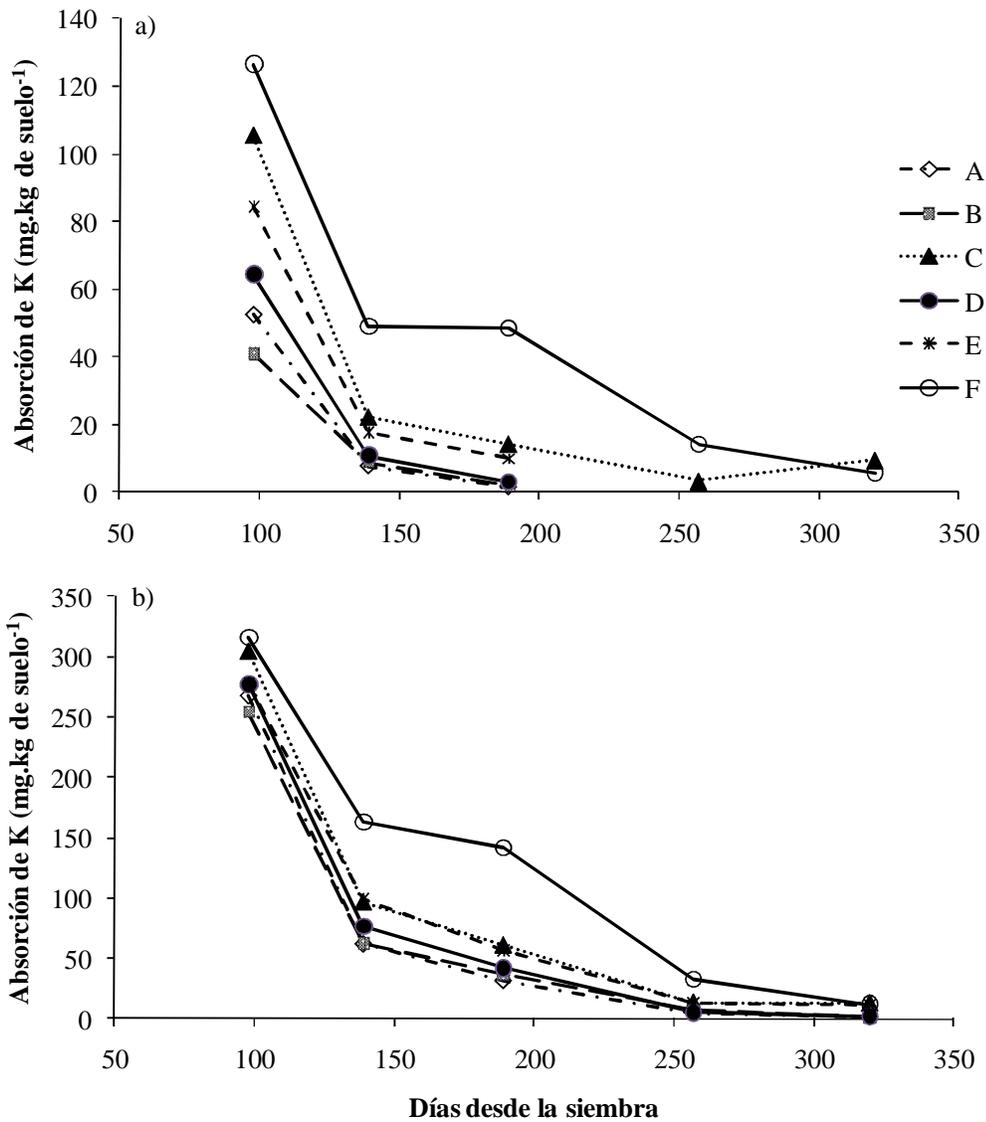


Figura 2.1. Evolución de la extracción de K por el raigrás en cada suelo para: a) los tratamientos testigo y b) con agregado de 400 mg K kg de suelo⁻¹.

Existió un efecto significativo de la interacción suelo*dosis sobre la extracción acumulada de K ($p < 0,01$; Figura 2.2) encontrándose una respuesta cuadrática a la fertilización. Existió una interacción positiva entre el contenido de K del suelo y la respuesta a la fertilización, siendo ésta mayor en el suelo F.

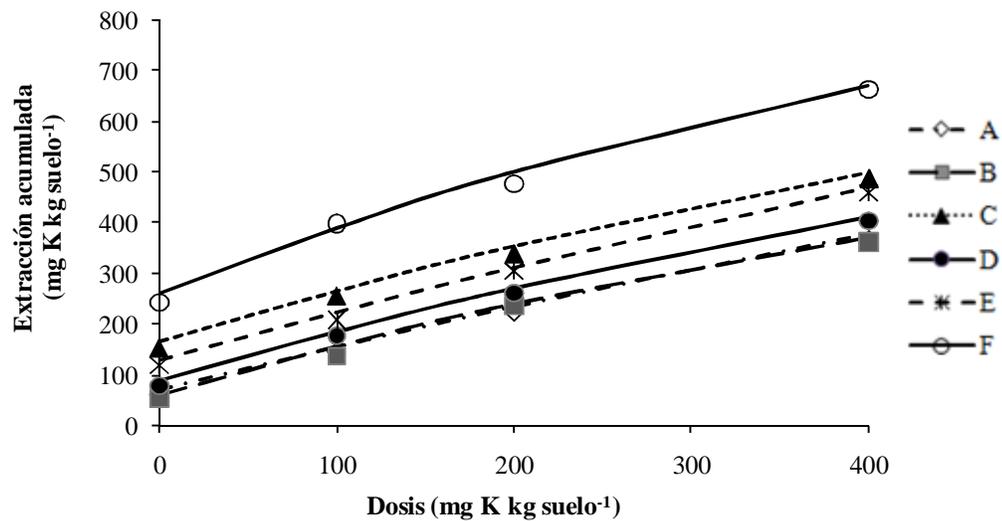


Figura 2.2. Extracción acumulada de K en cada suelo según dosis. Los puntos corresponden a los valores observados, líneas a la respuesta simulada

2.5.1.2. Recuperación aparente del fertilizante

Existió efecto significativo de la interacción suelo*dosis*sacrificio sobre la recuperación aparente del fertilizante ($p < 0,01$) que se muestra en la Figura 2.3 para cuatro de los suelos estudiados. Durante el primer sacrificio, la recuperación fue mayor en los tratamientos con menor agregado de K, pero a partir del segundo sacrificio, la dosis no tuvo efecto sobre la cantidad de fertilizante recuperado en los suelos A a E. En el suelo F, la recuperación aparente de K del tratamiento con agregado de 100 mg K kg de suelo⁻¹ fue mayor durante los tres primeros sacrificios, superando el 100% de recuperación aparente ya en el segundo sacrificio.

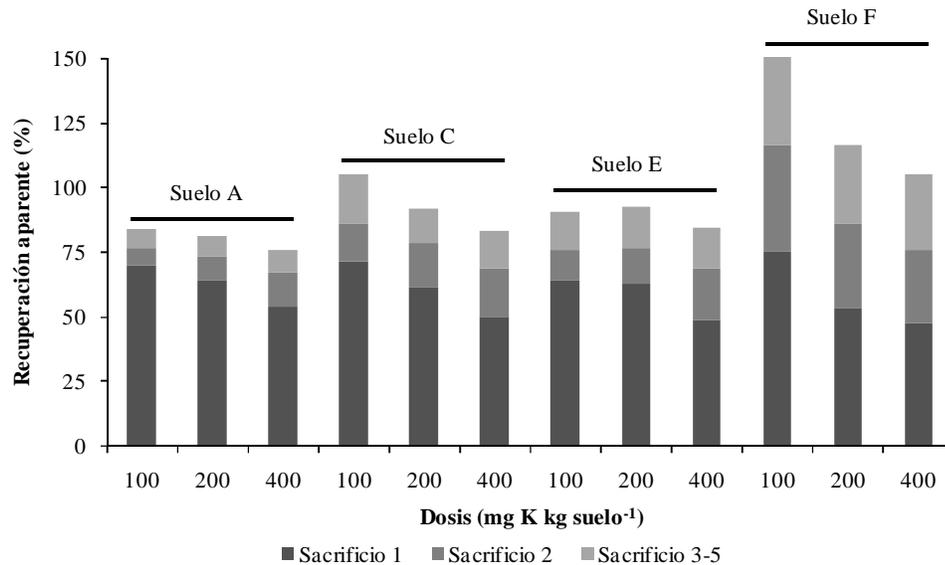


Figura 2.3. Recuperación aparente del fertilizante según dosis y sacrificio para cuatro de los suelos estudiados.

La recuperación aparente total de K de los suelos A a E estuvo entre 76 y 100% del fertilizante agregado, siendo la mayor recuperación en el primer sacrificio, entre 60 y 80% del total recuperado. El suelo F tuvo una recuperación aparente mayor al 100%, con una mejor distribución en los distintos sacrificios ya que en el primero se recuperó menos de la mitad del total.

2.5.2. Relación suelo vegetal

2.5.2.1. Aporte de potasio no intercambiable

Se encontró efecto significativo del tipo de suelo sobre el aporte de K no intercambiable al cultivo ($p < 0,01$), siendo el rol de las reservas muy variable entre suelos (Figura 2.4). Mientras en el suelo E las reservas no fueron una fuente efectiva de K para las plantas, en el suelo F el K no intercambiable disponible representó el 42% del total de K absorbido.

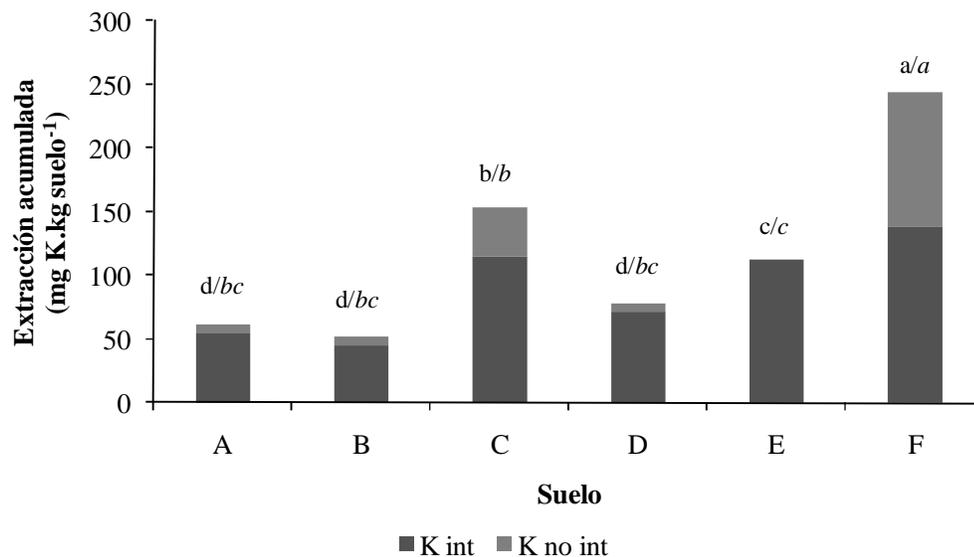


Figura 2.4. Contribución del K intercambiable y K no intercambiable a la absorción total de K en el tratamiento testigo de cada suelo para todo el período de evaluación. Letras distintas indican diferencias en absorción total, cursivas diferencias en el aporte de K no int ($p < 0,05$).

2.5.2.2. Capacidad predictiva de los análisis de potasio en condiciones de no fertilización

El NaTPB fue un mejor indicador de la disponibilidad de K que el NH_4OAc , con la ventaja agregada de trabajar en un rango más amplio de valores lo cual permitiría una mayor diferenciación entre suelos (Figuras 2.5 y 2.6).

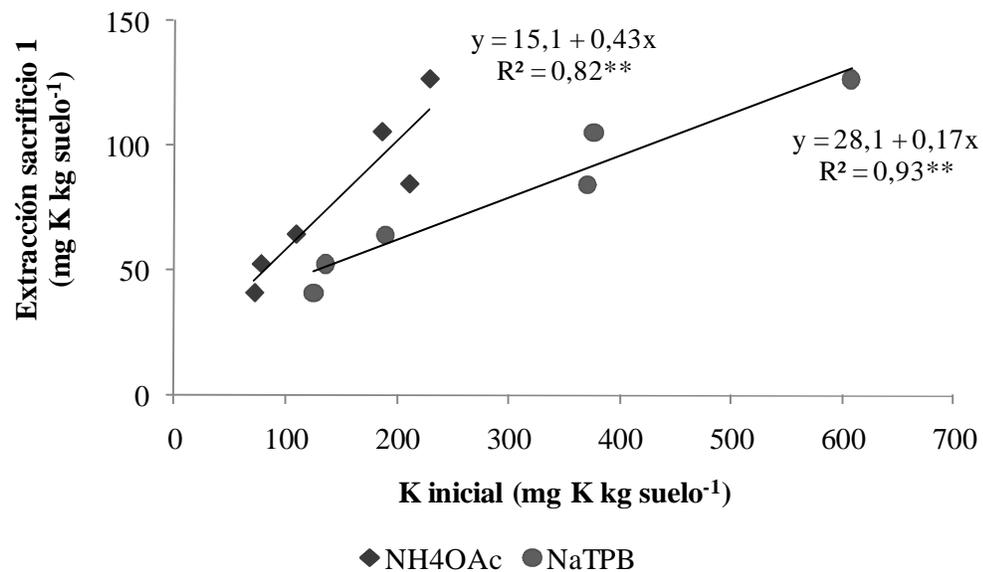


Figura 2.5. Extracción de K por el raigrás en el sacrificio 1 en los tratamientos testigo en función del contenido de K en el suelo según método de extracción.

A medida que aumentó la presión de extracción (mayor número de cortes) disminuyó la capacidad del NH₄OAc de predecir la extracción realizada por el raigrás. Este indicador explicó el 82% de la variación de extracción entre suelos a los 98 días de cultivo (primer sacrificio), pero cuando se consideró todo el experimento (320 días) disminuyó su capacidad predictiva ($R^2 = 0,73$). El NaTPB en cambio explicó mejor la variación en extracción durante todo el experimento ($R^2 = 0,93$ y $0,96$ para 98 y 320 días de cultivo, respectivamente).

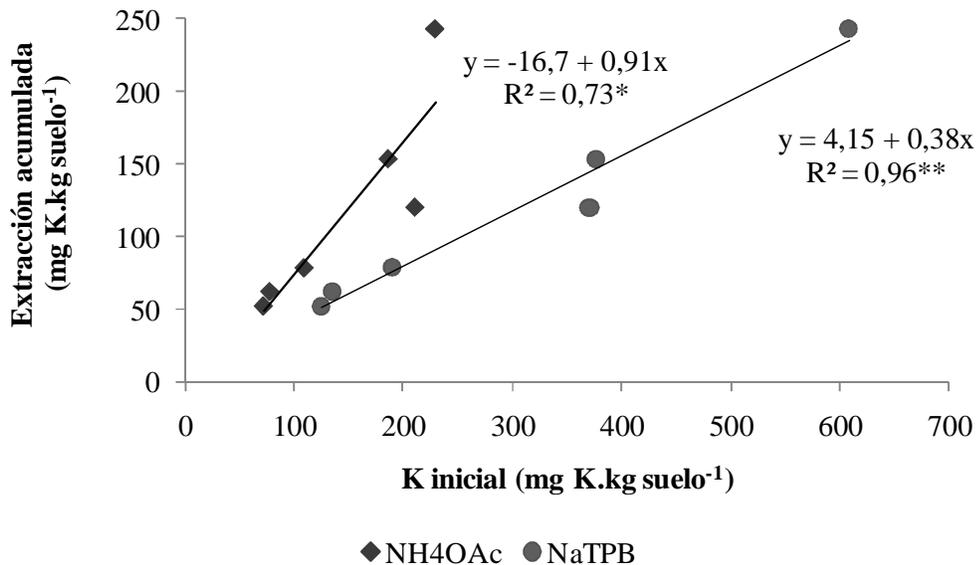


Figura 2.6. Extracción acumulada de K por el raigrás en los tratamientos testigo en función del contenido de K en el suelo según método de extracción.

2.5.2.3. Capacidad predictiva de los análisis de potasio en condiciones de fertilización

El contenido de K del suelo al final de un sacrificio puede considerarse equivalente al K disponible para el crecimiento vegetal durante el siguiente sacrificio. Para evaluar la capacidad predictiva de los análisis de suelo en condiciones de fertilización, se comparó entonces el contenido de K del suelo en un sacrificio con el comportamiento vegetal del siguiente sacrificio. En la Figura 2.7 se presenta la relación entre el contenido de K en suelo en el sacrificio 3 y la extracción vegetal en el sacrificio 4 para el conjunto de los suelos estudiados. La variación de K en el suelo explicó 46 y 71 % de la variación en absorción del raigrás según el método utilizado haya sido NH₄OAc o NaTPB, respectivamente. Se observa sin embargo que los métodos no logran diferenciar las dosis dentro de cada suelo, explicándose la dispersión en el eje x por las diferencias entre suelos y no por los diferentes niveles de K generados con la fertilización. En los demás sacrificios el coeficiente de determinación de estas relaciones fue menor al presentado en la Figura 2.7 a modo de ejemplo.

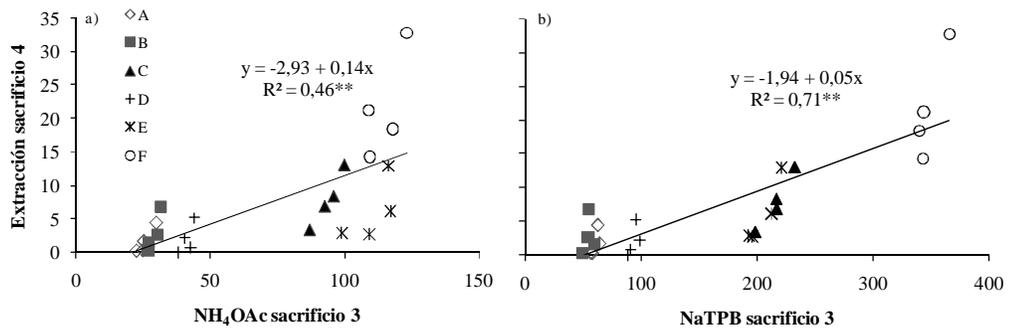


Figura 2.7. Extracción del raigrás en el sacrificio 4 en función del K en el suelo al final del sacrificio 3 determinado: a) con NH₄OAc o b) NaTPB. Todos los valores en mg K kg suelo⁻¹.

2.5.2.4. Balances en invernáculo

Los experimentos maceteros permiten una estimación precisa de los balances de K, ya que las entradas (fertilización) y salidas (extracción vegetal) son fácilmente cuantificables, y estos balances pueden ser comparados con los cambios en el K del suelo (ΔK). Al comparar gráficamente la relación entre el balance generado (eje x) y el ΔK (eje y), la diferencia entre los datos observados y la línea 1:1 estima la magnitud de los procesos de fijación y liberación de K de los suelos. Esta relación permite también comparar distintos métodos de determinación de K, ya que el método que mejor estime los cambios en el K disponible será aquel que más se acerque a la línea 1:1. Los diferentes balances de K generados en el invernáculo fueron mejor reflejados por el NaTPB que por el NH₄OAc (Figuras 2.8 y 2.9). Por cada unidad de cambio en el balance sólo hubo un cambio de 0,29 unidades en el NH₄OAc, mientras que la variación del NaTPB fue de 0,62 unidades.

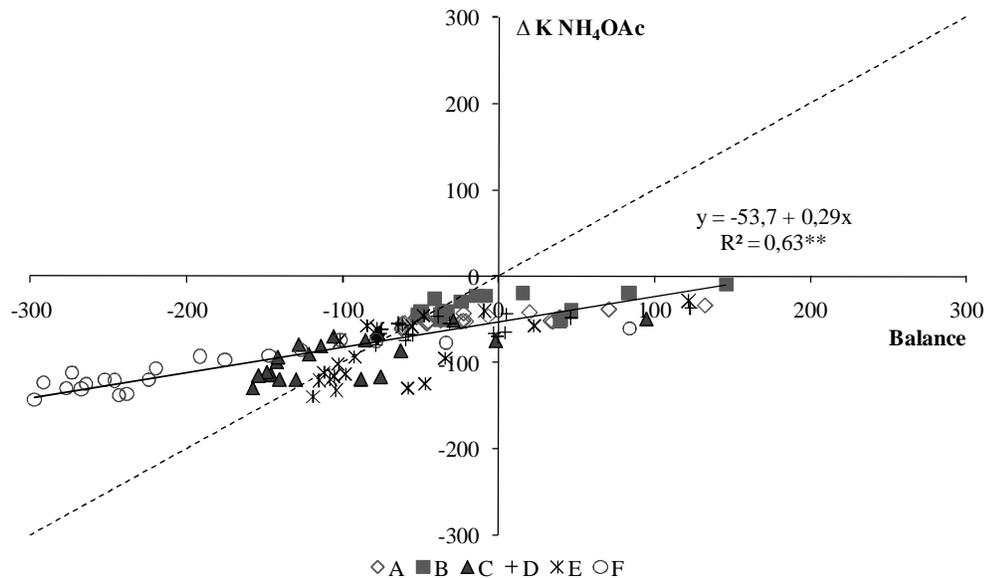


Figura 2.8. Variación en el contenido de K extraído con NH_4OAc de los suelos en función de los balances de K generados en el invernáculo para todo el período de estudio. Todas las unidades en $\text{mg K kg suelo}^{-1}$. Cada punto representa el balance dado por el tratamiento de fertilización (entrada de K) y la extracción total (salida) debido al tiempo de cultivo. La línea continua representa la regresión entre ambas variables, la línea punteada la relación 1:1.

Cuando los balances en el invernáculo fueron positivos (la fertilización excedió lo extraído por el raigrás), ninguno de los dos métodos tuvo la capacidad de reflejar esta situación y hubo siempre una disminución en el valor de K en el suelo. Esta disminución en los análisis de K ocurrió aún frente a excedentes importantes de K, de hasta $150 \text{ mg K kg de suelo}^{-1}$ equivalente al doble del K intercambiable inicial de los suelos más pobres. Cuando los balances fueron negativos existió una liberación de K no intercambiable hacia el complejo de intercambio, aumentando la cantidad de K liberado a medida que los balances se volvieron más negativos (diferencia entre la regresión y la línea 1:1 en Figura 2.8).

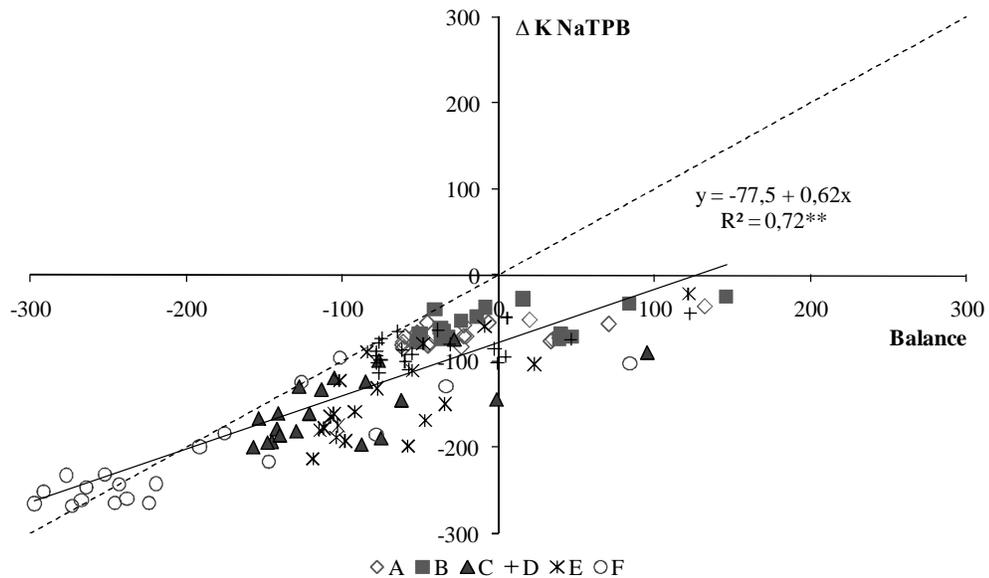


Figura 2.9. Variación en el contenido de K extraído con NaTPB de los suelos en función de los balances de K generados en el invernáculo para todo el período de estudio. Todas las unidades en $\text{mg K kg suelo}^{-1}$. Cada punto representa el balance dado por el tratamiento de fertilización (entrada de K) y la extracción total (salida) debido al tiempo de cultivo. La línea continua representa la regresión entre ambas variables, la línea punteada la relación 1:1.

2.5.3. Destino del potasio agregado (incubaciones)

Existió efecto significativo de la interacción suelo*dosis sobre el contenido de NH_4OAc final ($p < 0,01$) y también del tiempo de incubación ($p < 0,01$). La cantidad final de K intercambiable fue mayor a los 90 que a los 30 o 60 días de incubación (246 vs 223 $\text{mg K kg de suelo}^{-1}$) mostrando que parte del K fijado al inicio fue liberado con un mayor tiempo de incubación. Si bien existió efecto significativo de la interacción suelo*dosis*tiempo de incubación sobre el contenido de NaTPB ($p = 0,04$), las medias de cada tratamiento de suelo*dosis no presentaron diferencias según tiempo de incubación ($p > 0,05$) por lo que se trabajó con el promedio de las tres incubaciones. A diferencia de lo ocurrido en el invernáculo, ambos métodos reflejaron los balances positivos generados con las incubaciones (Figura 2.10), encontrándose nuevamente un mejor comportamiento del NaTPB en comparación

con el NH_4OAc . El 87% del K agregado como fertilizante se vio reflejado por un aumento en el valor de NaTPB, mientras que sólo el 58% del K agregado quedó en el complejo de intercambio y pudo ser cuantificado con el NH_4OAc .

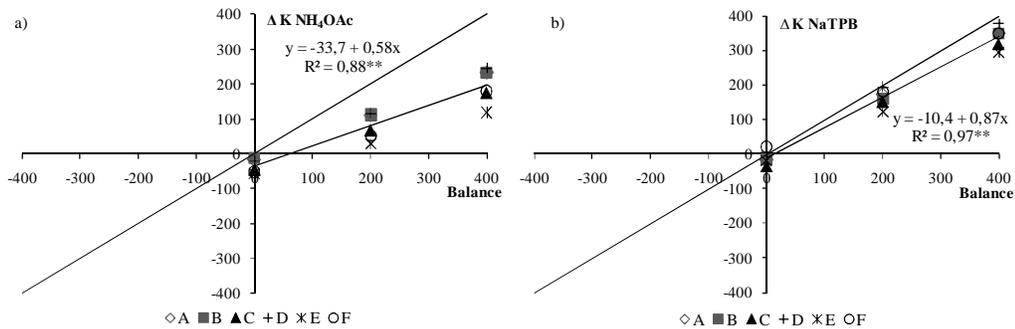


Figura 2.10. Variación en el contenido de K de los suelos en función del balance de K para el promedio de 30, 60 y 90 días de incubación: a) variación NH_4OAc ; b) variación NaTPB. Todas las unidades en $\text{mg K kg suelo}^{-1}$.

2.6. DISCUSIÓN

Los suelos estudiados se diferenciaron no sólo en el aporte de K sino también en su capacidad de mantener el suministro en el tiempo, lo cual era esperable según sus diferencias en textura, mineralogía y concentración de K. Los suelos A, B y D, pertenecientes a la unidad millón Cuchilla de Corralito, tuvieron contenidos bajos de arcilla y poca presencia de illita en esta fracción, lo que explicaría los bajos contenidos de CIC_7 y sobre todo de K (Tablas 2.1 y 2.2). El contenido de K intercambiable de estos suelos estuvo por debajo del nivel crítico reportado por Barbazán et al. (2011) y además las reservas de K fueron menores a los contenidos de K intercambiable. Por este motivo, en condiciones de no fertilización, el suministro de K de estos suelos fue bajo y no logró cubrir los requerimientos vegetales luego de los 190 días de cultivo (Figura 2.1a). Los suelos C y F, de textura más fina y con mayor contenido de illita, presentaron mayores cantidades de K intercambiable y de reserva, y tuvieron por eso mayor capacidad de aporte de K, logrando mantener el crecimiento vegetal durante todo el experimento. Estos fueron también los suelos donde el K no intercambiable tuvo una mayor participación

(Figura 2.4), mientras que los suelos donde el aporte de las reservas fue mínimo no pudieron mantener altos niveles de producción.

La concentración de K de reserva de los suelos C y E fue similar (Tabla 2.2) pero no la magnitud de su aporte de K desde formas no intercambiables (Figura 2.4). En el suelo E la esmectita fue la arcilla dominante lo que, sumado al contenido de arcilla, explicaría su alta CIC_7 y contenido de K intercambiable por encima del nivel crítico pero con menor aporte de K de reserva que los suelos illíticos. La absorción de K intercambiable desde los suelos C y E fue similar y explicaría la similitud de extracción en los tres primeros sacrificios, mientras que el aporte de K no intercambiable sería la causa de las diferencias de crecimiento hacia el final del experimento (Figura 2.1 y Figura 2.4). Por lo tanto, las diferencias en la labilidad del K no intercambiable serían la causa de las diferencias en la capacidad de mantener el aporte de K en el tiempo, lo que no fue correctamente estimado por el NaTPB.

La importancia de la mineralogía, y principalmente el contenido de illita, en la dinámica y disponibilidad de las reservas ha sido reportada en numerosos trabajos (Hernández *et al.*, 1988; Cox *et al.*, 1996; Cox & Joern, 1997; Barré *et al.*, 2008). Sin embargo, los suelos C y F, con el mismo contenido de illita, presentaron diferencias en el aporte de K no intercambiable al raigrás, estando la magnitud del aporte más relacionado al nivel de reservas estimado con NaTPB (Tabla 2.2 y Figura 2.4). Considerar la mineralogía de los suelos junto con el tamaño del *pool* de K de reserva parecería ser la mejor aproximación para estimar el K no intercambiable realmente disponible para las plantas.

Cuando el K intercambiable disminuye hasta cierto nivel crítico, alcanza un estado de equilibrio (*steady state*) y una cantidad significativa de K no intercambiable puede estar disponible para las plantas (Cox *et al.*, 1999). La disminución en el poder predictivo del NH_4OAc con el aumento de la presión de extracción dada por un mayor tiempo de cultivo (Figura 2.5 vs Figura 2.6) se debió entonces a un aumento en la participación del K no intercambiable. Con el NaTPB se logró una mejor estimación del K disponible, tanto inicial como acumulado, sin problemas de suelos que se apartaran de la tendencia general, lo que muestra la capacidad del método de estimar el K disponible en suelos con características

diferentes. A pesar de la estrecha relación entre el *pool* de K extraído por el NaTPB y el *pool* desde el cual las plantas absorben el K del suelo ($R^2 = 0,96$) la pendiente de 0,38 indica que existió una sobreestimación del K disponible (Figura 2.6).

Existió respuesta a la fertilización aún en los suelos con mayor contenido de K, lo que se debería a la alta presión de extracción generada en este tipo de experimentos (Figura 2.2). La mayor respuesta a la fertilización en el suelo F se debió probablemente a la capacidad de las plantas de realizar consumo de lujo de K (Cox *et al.*, 1999) y la ausencia de otras limitantes para el crecimiento. Con el agregado de K se logró que el crecimiento vegetal se mantuviera en el tiempo con plantas más vigorosas, lo que explicaría la alta recuperación aparente del fertilizante (Figura 2.3). El mayor crecimiento vegetal probablemente generó una mayor absorción del K nativo del suelo en los tratamientos fertilizados frente al testigo y esto explicaría los valores de recuperación aparente mayores al 100% del K agregado. En el suelo F la mejor distribución de la recuperación del K entre sacrificios probablemente se deba al mayor contenido de K del suelo y al mayor aporte desde formas no intercambiables, que permitió mantener altos niveles de suministro durante más tiempo.

Sólo un tercio de los balances de K en el invernáculo se reflejaron en cambios en el K extraído con NH_4OAc (pendiente 0,29) lo que evidencia la importancia de los procesos de fijación y liberación de K en estos suelos (Figura 2.8). El suelo E se separó de la tendencia general de los balances negativos y estuvo más cercano a la relación 1:1, confirmando el escaso aporte de K no intercambiable de este suelo. Nuevamente el NaTPB tuvo un mejor comportamiento que el NH_4OAc , evidenciando la estrecha relación entre la fracción de K que extrae este método y la que participa en la nutrición de los cultivos (Figura 2.9). A pesar del mejor comportamiento del NaTPB como estimador de los balances negativos, ninguno de los métodos fue capaz de detectar el aumento en la disponibilidad de K generado a partir del excedente de fertilizante. El K remanente fue entonces fijado en formas no extraíbles por ninguno de los dos métodos, lo que generó dos interrogantes: (i) si el cultivo fue o no capaz de utilizar el K fijado y (ii) cómo fue el comportamiento de los métodos de análisis en condiciones sin crecimiento vegetal. Para contestar el primer

interrogante se analizó la capacidad predictiva de ambos métodos en condiciones de fertilización, mientras que las incubaciones aportaron a la respuesta del segundo cuestionamiento.

Ambos métodos fallaron en predecir el comportamiento vegetal luego del primer sacrificio, siendo capaces de diferenciar entre suelos pero no de estimar las diferencias de disponibilidad de K generadas por la fertilización (Figura 2.7). Esto, sumado a la alta recuperación aparente del fertilizante, muestra que el proceso de fijación que afectó la cantidad de K extraída por ambos métodos no impidió la absorción vegetal del K remanente. La capacidad de absorción de K no intercambiable varía entre especies e incluso entre genotipos, siendo el raigras conocido por su capacidad de absorción de formas no intercambiables de K (Zörb *et al.*, 2014). Además, las plantas poseen distintos mecanismos de adaptación frente a deficiencias de K como ser acidificación del medio extracelular o absorción activa con sistemas de alta afinidad por el K (Hafsi *et al.*, 2014; Oosterhuis *et al.*, 2014). Algunos autores sostienen también que la disponibilidad del K fijado proveniente del fertilizante sería mayor que la disponibilidad del K no intercambiable nativo del suelo (MacLean, 1968; Cox *et al.*, 1996) por lo que la fijación del K y la posterior falta de predicción del NH_4OAc sería esperable.

Wang *et al.* (2010) trabajando con una modificación del NaTPB (0,2 M NaBPh_4 + 0,01 M EDTA con 60 minutos de incubación) sí lograron estimar las diferencias de disponibilidad de K generadas por la fertilización inicial en cuatro suelos, aún luego de un cultivo de arroz en macetas. Sin embargo, en este trabajo este método fue utilizado en pruebas preliminares encontrándose una estrecha relación con el método propuesto por Cox *et al.* (1999), por lo que no se espera que su uso mejore la estimación de los balances positivos. Además, en el trabajo de Wang *et al.* (2010) también el NH_4OAc (aunque en menor medida) fue capaz de estimar las diferencias de disponibilidad de K generadas por la fertilización en algunos suelos, lo que tampoco sucedió en nuestro trabajo.

Cuando los balances positivos fueron generados a partir de incubaciones sin crecimiento vegetal y en condiciones controladas de humedad y temperatura ambos métodos fueron capaces de reflejar el aumento en la disponibilidad de K (Figura

2.10). La tasa de fijación del K agregado fue en promedio 42%, lo que explica que el NH_4OAc haya sido capaz de recuperar poco más de la mitad del K agregado. Con el NaTPB, en cambio, la mayor parte del K agregado fue detectado (87%) confirmando la capacidad de este método de estimar con mayor precisión el *pool* de K responsable de las variaciones en la disponibilidad del nutriente. Cox *et al.* (1999) compararon ambos métodos a través de los balances de K y también encontraron un mejor comportamiento del NaTPB, aunque los balances positivos fueron realizados únicamente con incubaciones durante 6 meses.

De acuerdo a nuestros resultados, la interacción suelo-planta promovió la fijación de K en formas que no fueron detectables por ninguno de los métodos evaluados pero que sí estuvieron disponibles para la absorción vegetal. Algunos de los trabajos citados podrían explicar la liberación de K por efecto del crecimiento vegetal, pero no hay una hipótesis clara sobre qué podría estar promoviendo la fijación de K en estas condiciones. Si bien hay antecedentes de que ciclos de humedecimiento y secado y condiciones de reducción podrían favorecer la fijación de K (Shen & Stucki, 1994; Cox *et al.*, 1999) los riegos periódicos buscaban mantener las condiciones de humedad cercanas a capacidad de campo. El efecto del tiempo de incubación sobre los niveles finales de K sugiere que el equilibrio entre las distintas fracciones de K podría cambiar dependiendo del plazo temporal considerado. En las incubaciones, una vez agregado el K, las condiciones controladas permitirían alcanzar un equilibrio entre las fracciones, mientras que en el invernáculo existió extracción vegetal hasta el momento en que cada maceta fue sacrificada. Dado que los suelos agrícolas se encuentran casi siempre en un estado de desequilibrio con respecto a las transformaciones de K (Sparks, 1987) tal vez un mayor plazo de tiempo entre el fin del crecimiento vegetal y el análisis de suelo hubiera permitido alcanzar un nuevo equilibrio entre las fracciones. Más estudios serían necesarios para conocer la capacidad de ambos métodos de reflejar los balances de K en plazos de tiempo mayores y comprobar si el equilibrio cambia con el tiempo.

2.7. CONCLUSIONES

Los suelos estudiados presentaron diferencias importantes en su capacidad de suministro de K al cultivo de raigrás y en la capacidad de mantener el aporte en el tiempo. Parte de estas diferencias estuvieron explicadas por el K intercambiable y parte por la cantidad y labilidad de las reservas de K, siendo mayor el aporte de K no intercambiable en los suelos con mayor contenido de illita. La extracción con NaTPB cuantifica parte de las reservas de K, lo que explica su mejor estimación del K disponible que la extracción con NH₄OAc.

La extracción de K con NH₄OAc fue más afectada por los procesos de fijación y liberación que la extracción con NaTPB, por lo que este último método sería más adecuado para reflejar los balances de K. En condiciones de fertilización y crecimiento vegetal, ninguno de los métodos tuvo la capacidad de reflejar los balances positivos de K, pero las plantas sí lograron extraer el K remanente con una alta eficiencia de uso del fertilizante. Cuando los suelos fueron incubados con K en condiciones controladas existió un aumento en la cantidad de K extraída con ambos métodos, nuevamente con un mejor comportamiento del NaTPB frente al NH₄OAc.

2.8. BIBLIOGRAFÍA

- Barbazán, MM; MG Ferrando & J Zamalvide. 2007. Estado nutricional de *Lotus corniculatus* L. en Uruguay. *Agrociencia Uruguay* 11(1):22-34.
- Barbazán, MM; C Boutes; L Beux; JM Bordoli; JD Cano; O Ernst; A García-Lamothe; FO García & A Quincke. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia Uruguay* 15(2):93-99.
- Barré, P; C Montagnier; C Chenu; L Abbadie & B Velde. 2008. Clay minerals as a soil potassium reservoir: observation and quantification through X-ray diffraction. *Plant and Soil* 302(1-2):213-220.
- Bataglia, OC; AMC Furlani; JPF Teixeira & JR Gallo (Eds). 1983. Métodos de análise química de plantas. Instituto Agronômico de Campinas. Campinas; IAC. Boletim, 78 pp.

- Bordoli, JM; MM Barbazán & L Rocha. 2012. Soil nutritional survey for soybean production in Uruguay. *Agrociencia Uruguay* 16(3):76-83.
- Bouyoucus GJ. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.* 54(5):464-465.
- Camargo, OA de; AC Moniz; JA Jorge & JMAS Valadares (Eds). 1986. *Metodos de análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas. Boletim Técnico N° 106. IAC (SP) Brasil.*
- Cox, AE; BC Joern & CB Roth. 1996. Nonexchangeable Ammonium and Potassium Determination in Soils with a Modified Sodium Tetraphenylboron Method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60(1):114-120.
- Cox, AE & BC Joern. 1997. Release kinetics of nonexchangeable potassium by sodium tetraphenylboron in midwestern soils. *Soil Sci.* 162(8):588-598.
- Cox, AE; BC Joern; SM Brouder & D Gao. 1999. Plant-available potassium assessment with a modified Sodium Tetraphenylboron method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(4):902-911.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2014. InfoStat versión 2014. [En línea] 30 de julio de 2014. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>
- Hafsi, C; A Debez & C Abdelly. 2014. Potassium deficiency in plants: effects and signaling cascades. *Acta Physiol. Plant.* 36(5):1055-1070.
- Hernández, J; O Casanova & JP Zamalvide. 1988. Capacidad de suministro de potasio en suelos del Uruguay. *Boletín de Investigación N° 19, Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay.* 20 pp.
- Jackson, BLJ. 1985. A modified sodium tetraphenylboron method for the routine determination of reserve-potassium status of soil. *N. Z. J. Exp. Agric.* 13:253-262.
- Jackson, ML (Ed). 1964. *Análisis químico de suelos. Ediciones Omega S.A. Barcelona.* 662 p.
- MacLean, AJ. 1968. Fixation of potassium added to soils and its recovery by plants. *Can. J. Soil. Sci.* 48(3):307-313.

- MAP/DSF. 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes. Montevideo, Uruguay.
- McLean, EO & ME Watson. 1985. Soil measurements of plant-available potassium. En: RD Munson (Ed.). Potassium in agriculture. Pp. 277-308. ASA, CSSA, SSSA.
- Moody, PW & MJ Bell. 2006. Availability of soil potassium and diagnostic soil tests. *Aust. J. Soil Res.* 44(3):265-275.
- Moore, DM & RC Reynolds. 1989. X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals, Oxford University Press, Oxford
- Morón, A; A García-Lamothe; J Molfino; L Dabalá; A Quincke & A Berger. 2009. Calidad de Suelos y Productividad en Sistemas Agrícolas de Soriano. En: Jornada AUSID. Pp. 1-7. Soriano, Uruguay.
- Morón, A & A Quincke. 2010. Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el departamento de Soriano. En: Jornada Técnica El Efecto de la Agricultura en la Calidad de los Suelos y Fertilización de Cultivos. Pp. 5-9. INIA La Estanzuela, Actividades de Difusión: 605. Mercedes, Uruguay.
- Oelshlegel, DD; EC Doll; C Valvedre. 1975. Potassium Release Characteristics of Selected Peruvian Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 39(5):891-896.
- Oosterhuis, D; D Loka; E Kawakami & W Pettigrew. 2014. The physiology of potassium in crop production. *Adv. Agron.* 126:203-233.
- Römheld, V & EA Kirkby. 2010. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Plant Soil.* 335(1-2):155-180.
- Schindler, FV; HJ Woodard & JJ Doolittle. 2002. Plant available potassium assessment through chemical prediction methods. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33(9&10):1473-1484.
- Schulte, EE & RB Corey. 1965. Extraction of Potassium from Soils with Sodium Tetraphenylboron. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 29(1):33-35.
- Scott, AD; RR Hunziker & JJ Hanway. 1960. Chemical Extraction of Potassium from Soils and Micaceous Minerals With Solutions Containing Sodium

- Tetraphenylboron. I. Preliminary Experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 24(3):191-194.
- Sharpley, AN. 1989. Relationship Between Soil Potassium Forms and Mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52(4):1023-1028.
- Shen, S & JW Stucki 1994. Effects of iron oxidation state on the fate and behavior of potassium in soils. En: J Havlin & J Jacobson (Eds.). *Soil Testing: Prospects for Improving Nutrient Recommendations*. Pp. 173-185. ASA, CSSA, and SSSA. (SSSA Special Publication Number 40).
- Sparks, DL. 1987. Potassium Dynamics in Soils. *Adv. Soil Sci.* 6:1-63.
- Sparks, DL & PM Huang. 1985. Physical chemistry of soil potassium. En: RD Munson (Ed.). *Potassium in agriculture*. Pp. 202-276. ASA, CSSA, SSSA.
- Surapaneni, A; RW Tillman; JH Kirkman; PEH Gregg & AHC Roberts. 2002a. Potassium-supplying power of selected Pallic soils of New Zealand 1. Pot trial study. *N. Z. J. Agric. Res.* 45(2):113-122.
- Surapaneni, A; RW Tillman; JH Kirkman; PEH Gregg & AHC Roberts. 2002b. Potassium-supplying power of selected Pallic soils of New Zealand 2. Soil testing procedures. *N. Z. J. Agric. Res.* 45(2):123-128.
- Wang, H-Y; H-X Sun; J-M Zhou; W Cheng; C-W Du & X-Q Chen. 2010. Evaluating Plant-Available Potassium in Different Soils Using a Modified Sodium Tetraphenylboron Method. *Soil Sci.* 175(11):544-551.
- Waugh, DL & JW Fitts (Eds.). 1966. *Estudios de interpretación de análisis de suelo: laboratorio y macetas*. Estación Experimental Agrícola de la Universidad de Carolina del Norte: International Soil Testing Inc. Boletín Técnico N° 3. 36 pp.
- Zörb, C; M Senbayram & E Peiter. 2014. Potassium in agriculture – Status and perspectives. *J. Plant Physiol.* 171(9):656-669.

3. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES GLOBALES

Según nuestros resultados, en condiciones de alta intensidad de extracción, algunos suelos agrícolas tienen una baja capacidad de suministro de K por lo que probablemente la fertilización potásica sea necesaria. Sin embargo, las condiciones de un experimento macetero serían poco extrapolables a condiciones de campo ya que existe una alta presión de extracción (baja relación suelo-planta) en un periodo corto de tiempo y sin otras limitantes para el crecimiento. Para estimar la relación entre la presión de extracción de K del invernáculo y la realidad productiva se comparó la extracción que realiza el cultivo de soja con la capacidad de aporte de K de los suelos estudiados.

La extracción promedio de K de los testigos de los seis suelos fue de 118 mg K kg⁻¹, lo que correspondería (considerando una profundidad de 20 cm y una densidad aparente de 1,25 g cm⁻³) a 295 kg K ha⁻¹. Suponiendo que un cultivo de soja que rinde 3.000 kg ha⁻¹ extrae en el grano aproximadamente 51 kg K ha⁻¹ (García y Correndo, 2013) en menos de seis cultivos se lograría una extracción similar a la ocurrida en el invernáculo. El agotamiento del K del suelo será obviamente más rápido en los suelos más pobres, donde la extracción realizada por el raigrás fue comparable a la de tres cultivos de soja, y de menor relevancia en los suelos más ricos en K. Esta comparación, realizada a modo de ejercicio, no tiene en cuenta al menos dos factores fundamentales que influyen en la disponibilidad del K: (i) que los cultivos son capaces de absorber el K disponible por debajo de los 20 cm de suelo y (ii) que la extracción de los cultivos ocurrirá en un plazo mucho mayor de tiempo, lo que permitiría que el K de fracciones muy poco lábiles pase lentamente a formas disponibles. A pesar de esto parece claro que en suelos con baja capacidad de suministro de K, o baja capacidad de mantener el aporte en el tiempo, la fertilización potásica en el corto a mediano plazo será indispensable para el logro de altos rendimientos.

En nuestro trabajo los suelos que presentaron menor capacidad de suministro de K fueron los de la unidad Cuchilla de Corralito, desarrollados a partir de sedimentos cuaternarios sobre Cretáceo y con esmectita y caolinita como arcillas dominantes. El Brunosol de La Carolina/Risso, desarrollado a partir de sedimentos

cuaternarios sobre Cristalino y con dominancia de esmectita, no pudo mantener el suministro de K en el tiempo ya que las reservas no estuvieron disponibles para el vegetal. Por otro lado, los suelos con influencia de la Formación Fray Bentos (unidades Bequeló y Fray Bentos) presentaron cantidades considerables de illita e interestratificados illita-esmectita y fueron los suelos con mayor capacidad de aporte de K al raigrás y donde las reservas tuvieron mayor disponibilidad. La riqueza de K de Brunosoles desarrollados sobre Fray Bentos y su alta capacidad de aporte de K en el tiempo confirma lo reportado por otros autores (Barbazán et al. 2007, Hernández et al. 1988).

Para ser útil un método para la determinación de K debe ser aplicable a una población de suelos diferentes y no a un suelo en particular (Conyers y McLean, 1969), por eso en este trabajo se hizo énfasis en las tendencias generales de los balances. Sin embargo, las diferencias entre suelos no fueron únicamente en su capacidad de aporte de K al raigrás, sino también en el comportamiento frente a la fertilización y en la fijación del K agregado durante las incubaciones. Los suelos con bajo contenido de arcilla y mínima presencia de illita presentaron los menores contenidos de K y también los menores valores de fijación (suelos de Cuchilla de Corralito, 36% tasa de fijación promedio). Los suelos que tuvieron illita como mineral arcilloso asociado, además de la mayor capacidad de aporte de K ya comentada, tuvieron una tasa de fijación superior que fue en promedio de 44% del K agregado. La mayor fijación en estos suelos sería consecuencia del contenido de illita en cantidades significativas y la presencia en estas arcillas de sitios específicos para la fijación de K (Barré et al., 2008a y b). El suelo E (Brunosol de LC/Ri) a pesar de no tener illita fue el que fijó la mayor cantidad de K en formas no intercambiables (56%). Esto podría ser consecuencia de su baja saturación de K ($K/CIC_7 = 1,6\%$) y su mínimo aporte de K no intercambiable al raigrás, lo que estaría indicando un agotamiento de las reservas y una mayor presencia de sitios activos para la fijación. Independientemente de esto, el proceso de fijación afectó a todos los suelos cuando se agregó K en las incubaciones y, sobre todo, en las macetas cultivadas. En cualquiera de los casos, la fijación estimada fue mayor que la cantidad de K que no

pudo ser recuperada por el raigrás, mostrando que parte del K fijado lo fue en formas disponibles para el consumo vegetal.

La fijación afectará la capacidad predictiva del análisis de suelo, lo que dificulta la estimación del K disponible en suelos con historia de fertilización y aumenta la dosis necesaria para subir el valor de análisis de suelo (equivalente fertilizante). Sin embargo, si el K fijado resulta una fuente efectiva para los cultivos entonces este proceso no es necesariamente negativo, ya que estaría previniendo pérdidas del nutriente por lixiviación y/o escurrimiento. En el invernáculo, la recuperación aparente fue alta mostrando que esta fracción de K estuvo disponible, pero serían necesarios trabajos de campo para confirmar si ocurre lo mismo en condiciones de menor presión de extracción. A pesar de esto, el mejor comportamiento del NaTPB frente al NH_4OAc , tanto en la estimación del K disponible como en la recuperación del K agregado, sustentan la hipótesis de que al menos parte del K fijado lo es en formas no intercambiables de mayor labilidad. Sin embargo, el NaTPB tampoco fue un buen indicador de la disponibilidad del K agregado en el invernáculo, evidenciando que parte del fertilizante pasó a formas no extraíbles con este método pero sí disponibles para el consumo vegetal. Aumentando el tiempo de incubación con NaTPB se aumenta la extracción de K lo que permitiría recuperar una mayor cantidad del K agregado, pero con el riesgo de extraer fracciones de K que no aportan a los cultivos en el mediano plazo. En base a la bibliografía revisada, un mayor tiempo de incubación no parece ser la solución a este problema ya que se extrae K desde fracciones muy poco lábiles y la relación entre el NaTPB y la extracción vegetal empeora.

Solo un tercio de los balances del invernáculo, generados por la diferencia entre la fertilización y la extracción vegetal, fueron reflejados por cambios en la cantidad de K extraída con NH_4OAc . Esto, como ya se discutió, muestra la importancia de los procesos de fijación y liberación en la dinámica de este nutriente y plantea además la interrogante sobre la validez del NH_4OAc como método para monitorear la evolución del K del suelo. Según los resultados de los balances, las disminuciones en la disponibilidad de K serían mayores que las evaluadas a partir del NH_4OAc ya que los niveles de K intercambiable se mantendrían a costa de las

reservas del suelo. Realizar, además del análisis tradicional, un seguimiento de la evolución de las reservas de K podría ayudar a la definición de estrategias de fertilización para evitar llegar a situaciones de agotamiento del K de los suelos.

Durante el experimento existieron fracciones de K no determinadas con el NH_4OAc que fueron de importancia para la nutrición vegetal y participaron activamente de los procesos de fijación y liberación. Con el uso del NaTPB, al extraer además del K intercambiable la fracción más lábil de las reservas, se logró una mejor estimación de estas fracciones, por lo que este método parece ser una opción válida para estimar el K disponible. Según la información revisada sobre métodos de determinación del K disponible (resumida en el Cuadro 1.2) el mejor comportamiento del NaTPB era esperable dadas las condiciones de alta intensidad de extracción logradas en el experimento macetero.

Sin embargo, los trabajos que evaluaron el NaTPB en condiciones de campo no encontraron resultados tan concluyentes sobre la superioridad de este método comparado con el NH_4OAc (e.g. Edmeades et al. 2010, Fernández et al. 2008, Barbagelata 2006, Schindler et al. 2002). Esto podría deberse a las diferencias de intensidad de extracción que existen entre experimentos como el realizado en este trabajo y las condiciones de producción agrícola, donde existen otros factores que influyen en la disponibilidad del nutriente. En experimentos maceteros la relación suelo-vegetal es muy baja y el período de tiempo en el que ocurre la extracción es mucho más corto, lo que genera un agotamiento más rápido del K intercambiable y magnifica la participación de las reservas. Por otro lado, en condiciones de campo, si no hay limitantes para el crecimiento radicular, las plantas pueden absorber K desde capas más profundas del suelo y extraen una cantidad de K mucho menor por unidad de tiempo. En estas condiciones es más probable que el *pool* de K intercambiable sea suficiente para cubrir las demandas de K de un cultivo, y existe además más tiempo para un reestablecimiento del K intercambiable y un nuevo equilibrio entre las distintas fracciones de K. Además, dado el equilibrio dinámico que existe entre las distintas fracciones de K, es esperable que en suelos con contenidos muy bajos de K intercambiable (e.g. $< 0,20 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) las reservas de K también sean bajas, mientras que suelos altos en K intercambiable (e.g. $> 0,50 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) también

tengan concentraciones importantes de K de reserva. Sumado a esto, el NaTPB es un método más laborioso y costoso que la extracción con NH_4OAc , por lo que no se espera su adopción como método de rutina.

A pesar de lo comentado previamente, existen situaciones donde la estimación del K con NH_4OAc ha demostrado no ser un indicador fiable de la disponibilidad de K o de la probabilidad de respuesta a la fertilización. Ejemplo de estas situaciones son suelos con contenidos de K intercambiable cercanos al nivel crítico (e.g. 0,20 – 0,40 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), donde variaciones en los contenidos de K de reserva pueden influir en la respuesta a la fertilización, o situaciones de producción muy intensiva. En estas condiciones, donde las reservas de K pueden tener una participación activa en la nutrición de los cultivos, el NaTPB podría aportar información valiosa que mejore el manejo de este nutriente. También sería un método de gran utilidad para caracterizar las reservas de K de los suelos y monitorear su evolución de mediano-largo plazo, logrando una mejor estimación de los cambios en la disponibilidad de K para los cultivos y la sustentabilidad de los sistemas de producción. Más estudios son necesarios para conocer cómo es la evolución del K en el largo plazo y la utilidad del NaTPB en condiciones de producción, así como la información que otras mediciones pueden aportar para mejorar la estimación del K disponible (e.g. estimación del K disponible por debajo de la profundidad de muestreo).

Otras áreas en las que se debería profundizar, y ya hay algunos trabajos nacionales en esa dirección, es en el estudio de la mineralogía de los suelos y sus relaciones de causa-efecto con la dinámica del K. También sería importante conocer cómo afectan los balances de largo plazo el agotamiento de K del suelo, el destino del K agregado y la eficiencia de uso del fertilizante por parte de los cultivos. Las disciplinas de mejoramiento genético y agricultura de precisión también son áreas desde las que se podría mejorar el manejo de este nutriente, realizando un uso más eficiente y sustentable del mismo.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Altamirano A, Da Silva H, Duran A, Echevarria A, Panario D, Puentes R. 1979. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, Tomo III: Descripción de las unidades de suelos. Montevideo: MAP/DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes). 273 p.
- Andrist-Rangel Y, Edwards AC, Hillier S, Öborn I. 2007. Long-Term K Dynamics in Organic and Conventional Mixed Cropping Systems as Related to Management and Soil Properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 122(4): 413 – 426.
- Attoe OJ, Truog E. 1946. Exchangeable and Acid-Soluble Potassium as Regards Availability and Reciprocal Relationships. *Soil Science Society of America Journal*, 10(C): 81 – 86.
- Avellaneda MO, Jauregui MA. 1995. Comparing Potassium Soil Tests with a Flexible Function and a Modifier Variable. *Soil Science Society of America Journal*, 59(4): 1081 – 1085.
- Barbagelata PA. 2006. Evaluation of Potassium Soil Tests and Methods for Mapping Soil Fertility Properties in Iowa Corn and Soybean Fields. Tesis Ph.D. Ames, IA, USA. Iowa State University. (Retrospective Theses and Dissertations; no. 1797). 111 p.
- Barbagelata PA, Mallarino AP. 2013. Field Correlation of Potassium Soil Test Methods Based on Dried and Field-Moist Soil Samples for Corn and Soybean. *Soil Science Society of America Journal*, 77(1): 318 – 327.
- Barbazán MM, Bordoli JM, Coitiño J, del Pino A, Hoffman E, Mazzilli S. 2013a. Efectos de la aplicación de potasio en suelos del Uruguay: avances. En: Simposio Potasio en Sistemas Agrícolas de Uruguay (2013, Mercedes, Soriano, Uruguay. Montevideo: FAGRO/CANPOTEX/IPNI. pp 33-38.
- Barbazán MM, Bordoli JM, Coitiño J, del Pino A, Hoffman E, Mazzilli S. 2013b. Avances en estudios de potasio en Uruguay. En: Simposio Fertilidad (2013, Rosario, Santa Fe, Argentina). Nutrición de los cultivos para la intensificación productiva sustentable. Acassuso: IPNI. pp 151-155.

- Barbazán MM, Bautes C, Beux L, Bordoli JM, Califra A, Cano JD, del Pino A, Ernst O, García-Lamothe A, García FO, Mazzilli S, Quincke A. 2012. Soil Potassium in Uruguay: Current Situation and Future Prospects. *Better Crops*, 96(4): 21 – 23.
- Barbazán MM, Bautes C, Beux L, Bordoli JM, Cano JD, Ernst O, García-Lamothe A, García FO, Quincke A. 2011a. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia Uruguay* 15(2): 93 – 99.
- Barbazán MM, del Pino A, Bordoli JM, Califra A, Mazzilli S, Ernst O. 2011b. La problemática del K en Uruguay: situación actual y perspectivas de corto y mediano plazo. En: II Simposio Nacional de Agricultura (2º, 2011, Paysandú, Uruguay). [Trabajos]: los nutrientes en el sistema de producción. Montevideo: Facultad de Agronomía. Grupo Interdisciplinario de Agricultura. pp. 21-33.
- Barbazán MM, Fiorelli MJ, Rodríguez J, del Pino A, Mazzilli S, Ernst O. 2011c. Liberación de potasio desde rastrojos de maíz y soja y variación en el suelo. En: Simposio Fertilidad (2011, Rosario, Santa Fe, Argentina). La nutrición de cultivos integrada al sistema de producción. Acassuso: IPNI. pp 156-160.
- Barbazán MM, Ferrando MG, Zamalvide J. 2007. Estado nutricional de *Lotus corniculatus L.* en Uruguay. *Agrociencia Uruguay* 11(1): 22 – 34.
- Barber SA. 1985 Potassium availability at the soil-root interface and factors influencing potassium uptake. En: Munson RD. (Ed.). Potassium in agriculture. Madison: ASA, CSSA, SSSA. 309 – 324.
- Barré P, Velde B, Fontaine C, Catel N, Abbadie L. 2008a. Which 2:1 Clay Minerals Are Involved in the Soil Potassium Reservoir? Insights from Potassium Addition or Removal Experiments on Three Temperate Grassland Soil Clay Assemblages. *Geoderma*, 146(1-2): 216 – 223.
- Barré P, Montagnier C, Chenu C, Abbadie L, Velde B. 2008b. Clay Minerals as a Soil Potassium Reservoir: Observation and Quantification through X-Ray Diffraction. *Plant and Soil*, 302(1-2): 213 – 220.

- Barré P, Velde B, Abbadie L. 2007. Dynamic Role of 'illite-Like' Clay Minerals in Temperate Soils: Facts and Hypotheses. *Biogeochemistry*, 82(1): 77 – 88.
- Bataglia OC, Furlani AMC, Teixeira JPF, Gallo JR. 1983. Métodos de análise química de plantas. Campinas, Brasil: IAC. (Boletim técnico no 78). 48 p.
- Bautes C, Barbazán MM, Beux L. 2009. Fertilización potásica inicial y residual en cultivos de secano en suelos sobre Areniscas Cretácias y transicionales. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 41: 1 – 8.
- Bertol I, Engel FL, Mafra AL, Bertol OJ, Ritter SR. 2007. Phosphorus, Potassium and Organic Carbon Concentrations in Runoff Water and Sediments under Different Soil Tillage Systems during Soybean Growth. *Soil and Tillage Research*, 94(1): 142 – 150.
- Bertsch PM, Thomas GW. 1985. Potassium Status of Temperate Region Soils. En: Munson RD. (Ed.). *Potassium in agriculture*. Madison: ASA, CSSA, SSSA. 131 – 162.
- Blake L, Mercik S, Koerschens M, Goulding KWT, Stempen S, Weigel A, Powlson DS. 1999. Potassium Content in Soil, Uptake in Plants and the Potassium Balance in Three European Long-Term Field Experiments. *Plant and Soil*, 216(1-2): 1 – 14.
- Blank RR. 2010. Effect of Temperature on Potassium and Sodium Exchange in a Sierra Nevada Riparian Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 74(1): 105 – 106.
- Bolan NS, Adriano DC, Curtin D. 2003. Soil Acidification and Liming Interactions With Nutrient and Heavy Metal Transformation and Bioavailability. *Advances in Agronomy*, 78: 215 – 271.
- Bordoli JM, Barbazán MM, Rocha L. 2012. Soil Nutritional Survey for Soybean Production in Uruguay. *Agrociencia Uruguay* 16(3): 76 – 83.
- Bouyoucus GJ. 1962. Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analysis of Soils. *Agronomy Journal*, 54(5): 464 – 465.
- Broadley M, Brown P, Cakmak I, Ma JF, Rengel Z, Zhao F. 2012. Beneficial elements. En: Marschner P. (Ed.). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3a. ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. 249 – 270.

- Camargo, OA de, Moniz AC, Jorge JÁ, Valadares JMAS. 1986. Metodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronómico de Campinas. Campinas, Brasil: IAC. (Boletim Técnico no. 106). 94 p.
- Cano JD, Ernst O, García F. 2007. Respuesta a la fertilización potásica en maíz para grano en suelos del noroeste de Uruguay. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 36: 9 – 12.
- Carey PL, Metherell AK. 2003a. Rates of Release of Non-Exchangeable Potassium in New Zealand Soils Measured by a Modified Sodium Tetraphenyl-Boron Method. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 46(3): 185 – 197.
- Carey PL, Metherell AK. 2003b. Monitoring Long-Term Changes in Reserve Potassium in Some New Zealand Soils Using a Modified Sodium Tetraphenyl-Boron Method. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 46(3): 199 – 213.
- Casanova ON. 1996. Potasio: consideraciones sobre su situación en el Uruguay. En: Morón A, Martino D, Sawchik J. (Eds.). *Manejo y fertilidad de suelos*. Montevideo: INIA (Serie Técnica no. 76). 57-62.
- Casanova ON, Ferrando MG. 2003. Cuantificación mediante lisímetros del lavado de bases en suelos, bajo dos regímenes hídricos. *Agrociencia Uruguay* 7(2): 39 – 48.
- Churchman GJ, Lowe DJ. 2012. Alteration, Formation, and Occurrence of Minerals in Soils. En: Huang PM, Li Y, Summer ME. (Eds.). *Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes*. 2ª. ed. Boca Raton, FL: CRC Press. v. 1. 20.1–20.72.
- Coitiño J, Ernst O, Barbazán MM. 2014. Variabilidad espacial de la respuesta de soja a la fertilización con potasio. En: Congreso Uruguayo de Suelos (1º), Encuentro de la SUCS (4º, 2014, Colonia del Sacramento, Uruguay). *Intensificando el conocimiento del suelo y medio ambiente para producir más y mejor: presentaciones orales*. [En línea] 3 noviembre 2014. <http://www.suelos.com.uy/pdf/73.pdf>
- Coitiño J, Mazzoni P, Cadenazzi M, Ernst O. 2013. Fósforo, potasio y azufre en trigo: Levantando restricciones al rendimiento entre zonas de productividad.

- En: Simposio Fertilidad (2011, Rosario, Santa Fe, Argentina). La nutrición de cultivos integrada al sistema de producción. Acassuso: IPNI. pp 171-173.
- Conti ME, de la Horra AM, Effron D, Zourarakis D. 2001. Factors Affecting Potassium Fixation in Argentine Agricultural Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32(17&18): 2679 – 2690.
- Conti ME, García F. 2005. Potasio del suelo. En: García F, Echeverría H. (Eds.). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Balcarce: Ediciones INTA. 123 – 137.
- Conyers ES, McLean EO. 1969. Plant Uptake and Chemical Extractions for Evaluating Potassium Release Characteristics of Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 33(2): 226 – 230.
- Cox AE, Joern BC, Brouder SM, Gao D. 1999. Plant-Available Potassium Assessment with a Modified Sodium Tetraphenylboron Method. *Soil Science Society of America Journal*, 63(4): 902 – 911.
- Cox AE, Joern BC. 1997. Release Kinetics of Nonexchangeable Potassium by Sodium Tetraphenylboron in Midwestern Soils. *Soil Science*, 162(8): 588 – 598.
- Cox AE, Joern BC, Roth CB. 1996. Nonexchangeable Ammonium and Potassium Determination in Soils with a Modified Sodium Tetraphenylboron Method. *Soil Science Society of America Journal*, 60(1): 114 – 120.
- Darunsontaya T, Suddhiprakarn A, Kheoruenromne I, Gilkes RJ. 2010. A Comparison of Extraction Methods to Assess Potassium Availability for Thai Upland Soils. En: *World Congress of Soil Science (19°, 2010, Brisbane, Australia)*. *Soil Solutions for a Changing World. Soil Minerals and Sustainability*. Viena, Austria: IUSS. pp 1-4.
- De la Horra AM, Conti ME, Sanguesa V, Moretti M. 1995. Potasio: comparación del comportamiento de diferentes métodos en suelos cultivados y sin cultivar. *Turrialba*, 45(1-2): 27 – 32.
- De la Horra AM, Conti ME, Defrieri RL. 1993. Potasio disponible, utilización de los extractantes acetato de amonio y Bray-Kurtz. *Ciencia del Suelo*, 10-11(1-2): 107 – 112.

- Del Pino A, Barbazán MM, Rodríguez J. 2012. Destino del potasio agregado en suelos de la zona agrícola de Uruguay. En: Congreso Latinoamericano de La Ciencia del Suelo (19°), Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, (23°, 2012, Mar del Plata, Argentina). Latinoamérica unida protegiendo sus suelos. [s.l.]: AACCS. CD-ROM. 6 p.
- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW. 2014. InfoStat versión 2014. [En línea]. Córdoba, Argentina: UNC. Grupo InfoStat. 30 julio 2014. Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>
- Dibb DW, Thompson JR. 1985. Interaction of potassium with other nutrients. En: Munson RD. (Ed.). Potassium in agriculture. Madison: ASA, CSSA, SSSA. 515-534.
- DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2013. Producción [En línea]. En: Anuario estadístico agropecuario 2013. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). Consultado 4 noviembre 2014. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-anuario-2013,O,es,0>,
- Durán A, García F. 2007. Suelos del Uruguay. Origen, Clasificación, Manejo y Conservación. Montevideo: Hemisferio Sur. v.1, 334 p.
- Edmeades DC, Morton JD, Waller JE, Metherell AK, Roberts AHC, Carey PL. 2010. The Diagnosis and Correction of Potassium Deficiency in New Zealand Pastoral Soils : A Review. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 53(2): 151 – 173.
- Fernández FG, Brouder SM, Beyrouthy CA, Volenec JJ, Hoyum R. 2008. Assessment of Plant-Available Potassium for No-Till, Rainfed Soybean. *Soil Science Society of America Journal* 72(4): 1085 – 1095.
- García-Lamothe A, Quincke A. 2012. El potasio en la producción de cultivos de invierno. En: Jornada Cultivos de Invierno (2012, Mercedes, Uruguay). La Estanzuela: INIA. (Serie Actividades de Difusión no. 677). pp 9-14.
- García F, Correndo A. 2013. Cálculo de requerimientos nutricionales de cultivos extensivos. En línea 15 de julio de 2014. IPNI Cono Sur. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>

- Goli-Kalanpa E, Roozitalab MH, Malakouti MJ. 2008. Potassium Availability as Related to Clay Mineralogy and Rates of Potassium Application. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(17-18): 2721 – 2733.
- Gonzalez MG, Moreno G, Conti ME, de la Horra AM. 1999. Cambios en la fijación-liberación de potasio en Argiudoles con distintos tipos de arcillas y saturación potásica. *Ciencia del Suelo*, 17(1): 27 – 30.
- Hafsi C, Debez A, Abdelly C. 2014. Potassium Deficiency in Plants: Effects and Signaling Cascades. *Acta Physiologiae Plantarum*, 36(5): 1055 – 1070.
- Havlin JL, Beaton JD, Tisdale SL, Nelson WL. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers, an Introduction to Nutrient Management*. 7a ed. New Jersey: Pearson Education. 515 p.
- Helmke PA, Sparks DL. 1996 Lithium, Sodium, Potassium, Rubidium and Cesium. En: Sparks DL. (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Madison, WI: ASA, SSSA. (Soil Science Society of America Book Series no. 5). 551-574.
- Hernández J, Casanova ON, Zamalvide JP. 1988. Capacidad de suministro de potasio en suelos del Uruguay. *Boletín de Investigación*. Montevideo: Facultad de Agronomía, 19: 20 p.
- Holland J, Conyers M, Orchard B, Poile G. 2014. Soil potassium relationships, uptake efficiency and availability for six distinctive soils in central and southern New South Wales, Australia. *Soil Research*, 52(2): 129-139.
- Hunter AH, Pratt PF. 1957. Extraction of Potassium from Soils by Sulfuric Acid. *Soil Science Society of America Journal*, 21(6): 595 – 598.
- Ishaq M, Ibrahim M, Hassan A, Saeed M, Lal R. 2001. Subsoil Compaction Effects on Crops in Punjab, Pakistan : II. Root Growth and Nutrient Uptake of Wheat and Sorghum. *Soil & Tillage Research*, 60(3-4): 153 – 161.
- Jackson BLJ. 1985. A Modified Sodium Tetraphenylboron Method for the Routine Determination of Reserve-Potassium Status of Soil. *New Zealand Journal of Experimental Agriculture*, 13: 253 – 262.
- Jackson, ML. 1964. *Análisis químico de suelos*. Barcelona: Omega S.A. 662 p.

- Jobbágy EG, Jackson RB. 2001. The Distribution of Soil Nutrients with Depth : Global Patterns and the Imprint of Plants. *Biogeochemistry*, 53(1): 51 – 77.
- Kirkman JH, Basker A, Surapaneni A, MacGregor AN. 1994. Potassium in the Soils of New Zealand - A Review. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 37(2): 207 – 227.
- Knudsen D, Peterson GA, Pratt PF. 1982. Lithium, Sodium, and Potassium. En: Page AL. (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2a ed. Madison, WI: ASA (Agronomy N° 9). 225-246.
- Kopittke PM, Menzies NW. 2007. A Review of the Use of the Basic Cation Saturation Ratio and the 'Ideal' Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2): 259 – 265.
- Lester GE, Jifon JL, Makus DJ. 2010. Impact of Potassium Nutrition on Food Quality of Fruits and Vegetables: A Condensed and Concise Review of the Literature. *Better Crops*, 94(1): 18 – 21.
- Lipiec J, Stepniewski W. 1995. Effects of Soil Compaction and Tillage Systems on Uptake and Losses of Nutrients. *Soil & Tillage Research*, 35(95): 37 – 52.
- Liu YD, Laird DA, Barak P. 1997. Release and Fixation of Ammonium and Potassium under Long-Term Fertility Management. *Soil Science Society of America Journal*, 61(1): 310 – 314.
- Liu L, Bates TE. 1990. Evaluation of Soil Extractants for the Prediction of Plant-Available Potassium in Ontario Soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 70(4): 607 – 615.
- MacLean, AJ. 1968. Fixation of potassium added to soils and its recovery by plants. *Canadian Journal of Soil Science*, 48(3): 307 – 313.
- Madaras M, Lipavský J. 2009. Interannual Dynamics of Available Potassium in a Long-Term Fertilization Experiment. *Plant Soil Environment*, 55(8): 334 – 343.
- Malavolta E. 1985. Potassium Status of Tropical and Subtropical Region Soils. En: Munson RD. (Ed.). *Potassium in agriculture*. Madison: ASA, CSSA, SSSA. 163-200.

- MAP/DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes). 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Montevideo, Uruguay.
- Marschner H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2a ed. New York: Academic Press. 889 p.
- Martin HW, Sparks DL. 1983. Kinetics of Nonexchangeable Potassium Release from Two Coastal Plain Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 47(5): 883 – 887.
- McLean EO, Watson ME. 1985. Soil Measurements of Plant-Available Potassium. En: Munson RD. (Ed.). *Potassium in agriculture*. Madison: ASA, CSSA, SSSA. 277-308.
- Molfino JH. 2013. Potencial agrícola, algunos cálculos para agricultura en secano. *Cangüé. Paysandú: Facultad de Agronomía*. 33: 14 – 18.
- Moody PW, Bell MJ. 2006. Availability of Soil Potassium and Diagnostic Soil Tests. *Australian Journal of Soil Research*, 44(3): 265 – 275.
- Moore DM, Reynolds RC. 1989. *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*, Oxford University Press, Oxford
- Morón A, Quincke A. 2010. Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el departamento de Soriano. En: *Jornada Técnica El efecto de la agricultura en la calidad de los suelos y fertilización de cultivos (2010, Mercedes, Uruguay)*. La Estanzuela: INIA (Serie Actividades de Difusión n° 605). pp 5–9.
- Morón A, García-Lamothe A, Molfino JH, Dabalá L, Quincke A, Berger A. 2009. Calidad de Suelos y Productividad en Sistemas Agrícolas de Soriano. En: *Jornada AUSID (2009, Soriano, Uruguay)*. pp 1-7.
- Morón A. 2008. Relevamiento del estado nutricional y la fertilidad del suelo en cultivos de trébol blanco en la zona Este del Uruguay. En: Bermúdez R, Ayala W. (Eds.). *Seminario de actualización técnica: fertilización fosfatada de pasturas en le región Este*. Montevideo: INIA (Serie Técnica n° 172). 17-30.

- Morón A, Molfino JH, Sawchik J, Califra A, Lazbal E, Ibáñez V, La Manna A, Malcourti E. 2008. Calidad de suelos en las principales áreas de producción lechera de Uruguay: Avances en el Departamento de Florida. En: Jornada Técnica Calidad de Suelos (2008, Colonia, Uruguay). La Estanzuela: INIA (Serie Actividades de Difusión n°556). pp 1-6.
- Morón A, Molfino JH, Sawchik J, Califra A, Lazbal E, La Manna A, Malcourti E. 2006. Calidad del suelo en las principales áreas de producción lechera de Uruguay: Avances en el Departamento de Colonia. En: Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. (20°, 2006, Salta-Jujuy, Argentina). Cd-rom. pp 9-13.
- Morón A. 2000. Fertilidad de suelos y estado nutricional. En: Rebuffo M, Risso D, Restaino E. (Eds.). Tecnología en alfalfa. Montevideo: INIA (Boletín de Divulgación n° 69). 37-52.
- Morón A, Baethgen W. 1996. Relevamiento de la fertilidad en los suelos bajo producción lechera en Uruguay. Montevideo: INIA (Serie Técnica n° 73). 16 p.
- Mortland M, Lawton K, Uehara G. 1957. Fixation and Release of Potassium by Some Clay Minerals. *Soil Science Society of America Journal*, 21(4): 381 – 384.
- Murashkina MA, Southard RJ, Pettygrove GS. 2007. Potassium Fixation in San Joaquin Valley Soils Derived from Granitic and Nongranitic Alluvium. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1): 125 – 132.
- Öborn I, Andrist-Rangel Y, Askegaard M, Grant C, Watson C, Edwards A. 2005. Critical Aspects of Potassium Management in Agricultural Systems. *Soil Use and Management*, 21(1): 102 – 112.
- Oelsligle DD, Doll EC, Valvedre C. 1975. Potassium Release Characteristics of Selected Peruvian Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 39(5): 891 – 896.
- Officer SJ, Tillman RW, Palmer AS, Whitton JS. 2006. Variability of Clay Mineralogy in Two New Zealand Steep-Land Topsoils under Pasture. *Geoderma*, 132(3-4): 427 – 440.

- Oosterhuis D, Loka D, Kawakami E, Pettigrew W. 2014. The Physiology of Potassium in Crop Production. *Advances in Agronomy*, 126: 203 – 233.
- Oudri N, Castro JL, Doti R, Carbonell de AS. 1976. Guía para fertilización de cultivos. Montevideo: MAP/CIAAB/DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger. Dirección de Suelos y Fertilizantes). 47p.
- Pazos J. 1981. Identificación de los minerales arcillosos de los suelos utilizados en un ensayo de dinámica de potasio. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 80 p.
- Raheb A, Heidari A. 2012. Effects of Clay Mineralogy and Physico-Chemical Properties on Potassium Availability under Soil Aquic Conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(4): 747 – 761.
- Rich CI. 1968. Mineralogy of Soil Potassium. En: Kilmer VJ. (Ed.). *The Role of Potassium in Agriculture*. Madison, WI: ASA. 79-108.
- Römheld V, Kirkby EA. 2010. Research on Potassium in Agriculture: Needs and Prospects. *Plant and Soil*, 335(1-2): 155 – 180.
- Sawyer JE, Mallarino AP, Killorn R, Barnhart SK. 2002. *A General Guide for Crop Nutrient and Limestone Recommendations in Iowa*. Iowa: Iowa State University. 20 p.
- Schindler FV, Woodard HJ, Doolittle JJ. 2003. Reduction–Oxidation Effects on Soil Potassium and Plant Uptake. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34(9-10): 1407 – 1419.
- Schindler FV, Woodard HJ, Doolittle JJ. 2002. Plant Available Potassium Assessment Through Chemical Prediction Methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(9-10): 1473 – 1484.
- Schulte EE, Corey RB. 1965. Extraction of Potassium from Soils with Sodium Tetraphenylboron. *Soil Science of America Journal*, 29(1): 33 – 35.
- Scott AD, Reed MG. 1962a. Chemical Extraction of Potassium from Soils and Micaceous Minerals With Solutions Containing Sodium Tetraphenylboron: II. Biotite. *Soil Science Society of America Journal*, 26(1): 41 – 45.

- Scott AD, Reed MG. 1962b. Chemical Extraction of Potassium from Soils and Micaceous Minerals With Solutions Containing Sodium Tetrphenylboron: III. Illite. *Soil Science Society of America Journal*, 26(1): 45 – 48.
- Scott AD, Hunzikeb RR, Hanway JJ. 1960. Chemical Extraction of Potassium from Soils and Micaceous Minerals With Solutions Containing Sodium Tetrphenylboron. I. Preliminary Experiments. *Soil Science Society of America Journal*, 24(3): 191 – 194.
- Scott AD, Reed MG. 1960. Determination of the Precipitated Potassium in Sodium Tetrphenylboron - Micaceous Mineral Systems. *Soil Science Society of America Journal*, 24(4): 326 – 327.
- Sharpley AN. 1989. Relationship Between Soil Potassium Forms and Mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 52(4): 1023 – 1028.
- Shen S, Stucki JW. 1994. Effects of Iron Oxidation State on the Fate and Behavior of Potassium in Soils. En: Havlin J, Jacobson J. (Eds.). *Soil Testing: Prospects for Improving Nutrient Recommendations*. Madison: ASA, CSSA, SSSA. (SSSA Special Publication n° 40). 173-185.
- Shipitalo MJ, Owens LB, Bonta JV, Edwards WM. 2013. Effect of No-Till and Extended Rotation on Nutrient Losses in Surface Runoff. *Soil Science Society of America Journal*, 77(4): 1329 – 1337.
- Simonsson M, Hillier S, Öborn I. 2009. Changes in Clay Minerals and Potassium Fixation Capacity as a Result of Release and Fixation of Potassium in Long-Term Field Experiments. *Geoderma*, 151(3-4): 109 – 120.
- Simonsson M, Andersson S, Andrist-Rangel Y, Hillier S, Mattsson L, Öborn I. 2007. Potassium Release and Fixation as a Function of Fertilizer Application Rate and Soil Parent Material. *Geoderma*, 140(1-2): 188 – 198.
- Singh K, Bansal SK. 2010. Potassium Balances and Long-Term Sustainability of Sorghum-Wheat in an Alluvial Soil of Haryana, India [En línea]. 22 noviembre 2013. http://www.ipipotash.org/udocs/eifc_no23-rf2.pdf
- Sparks DL. 1987. Potassium Dynamics in Soils. *Advances in Soil Science*, 6: 1 – 63.
- Sparks DL, Huang PM. 1985. Physical Chemistry of Soil Potassium. En: Munson RD. (Ed.). *Potassium in agriculture*. Madison: ASA, CSSA, SSSA. 202-276.

- Surapaneni A, Tillman RW, Kirkman JH, Gregg PEH, Roberts AHC. 2002a. Potassium Supplying Power of Selected Pallic Soils of New Zealand 1. Pot Trial Study. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 45(2): 113 – 122.
- Surapaneni A, Tillman RW, Kirkman JH, Gregg PEH, Roberts AHC. 2002b. Potassium-Supplying Power of Selected Pallic Soils of New Zealand 2. Soil Testing Procedures. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 45(2): 123 –128.
- Tyler G, Olsson T. 2001. Plant Uptake of Major and Minor Mineral Elements as Influenced by Soil Acidity and Liming. *Plant and Soil*, 230(2): 307 – 321.
- Wang H-Y, Sun H-X, Zhou J-M, Cheng W, Du C-W, Chen X-Q. 2010. Evaluating Plant-Available Potassium in Different Soils Using a Modified Sodium Tetraphenylboron Method. *Soil Science*, 175(11): 544 – 551.
- Waugh DL, Fitts JW. 1966. Estudios de interpretación de análisis de suelo: laboratorio y macetas. Estación Experimental Agrícola de la Universidad de Carolina del Norte: International Soil Testing Inc. Boletín Técnico N° 3. 36 p.
- White PJ. 2013. Improving Potassium Acquisition and Utilisation by Crop Plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(3): 305 – 316.
- Zarrabi M, Jalali M. 2008. Evaluation of Extractants and Quantity–Intensity Relationship for Estimation of Available Potassium in Some Calcareous Soils of Western Iran. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(17-18): 2663 – 2677.
- Zörb C, Senbayram M, Peiter E. 2014. Potassium in Agriculture – Status and Perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 171(9): 656 – 669.
- Zubillaga M, Conti ME. 1996. Availability of Exchangeable and Non-Exchangeable K in Argentine Soil with Different Mineralogy. *Z.Pflanzenernahz Bodenk*, 159(2): 149 – 153.

5. ANEXOS

Cuadro 5.1. Análisis de caracterización inicial de los suelos utilizados en los experimentos

Suelo	pH	C org	Textura (familia textural)			Clasificación	N-NH ₄	S-SO ₄
	(H ₂ O)	%	%Arena	%Limo	%Arcilla		µg N/g	µg N/g
A	5,4	0,86	81	10	8	arenoso	1,9	4,3
B	5,2	1,41	75	10	14	arenoso	2,5	5,0
C	5,6	2,64	50	27	24	franco	3,8	4,8
D	5,4	1,28	71	12	16	arenoso	2,4	3,9
E	6,0	3,03	34	30	36	franco	5,9	6,6
F	6,0	2,37	44	30	26	franco	2,9	3,5

Suelo	Ca	Mg	K	Na	Ac.Tit.	CIC ₇	Bases Totales	Sat. Bases
	----- cmol _c kg suelo ⁻¹ -----							%
A	3,7	0,7	0,20	0,04	2,3	7,0	4,7	66,8
B	6,1	1,7	0,18	0,09	4,4	12,4	8,0	64,7
C	15,0	2,4	0,48	0,10	4,8	22,8	18,0	78,9
D	7,3	1,4	0,28	0,04	3,4	12,4	9,0	72,7
E	26,1	3,9	0,54	0,09	4,2	34,8	30,6	87,8
F	18,1	1,1	0,59	0,09	3,4	23,4	19,9	85,3

Cuadro 5.2. Rendimiento del raigrás en los diferentes suelos y dosis de potasio según sacrificio

Suelo	Dosis K mg kg ⁻¹	Sacrificio	Sacrificio	Sacrificio	Sacrificio	Sacrificio
		1	2	3	4	5
		g MS kg suelo ⁻¹				
A	0	3,74	1,72	0,37	0,04	0,37
A	100	4,80	2,67	1,19	0,19	0,58
A	200	5,48	3,32	1,70	0,31	0,73
A	400	6,02	4,53	2,51	0,49	0,96
B	0	3,62	1,87	0,54	0,03	0,35
B	100	4,93	3,00	1,67	0,28	0,69
B	200	5,47	3,53	2,18	0,49	0,81
B	400	5,81	4,38	3,32	1,02	1,10
C	0	4,83	3,27	1,75	0,34	1,00
C	100	5,60	3,95	2,65	0,73	1,15
C	200	6,13	4,53	3,18	0,95	1,43
C	400	6,32	4,83	3,78	1,24	1,64
D	0	3,90	2,11	0,57	0,02	0,31
D	100	5,22	3,23	1,58	0,18	0,59
D	200	5,67	3,93	2,59	0,31	0,79
D	400	6,11	4,69	3,39	0,67	1,06
E	0	4,18	2,87	1,48	0,32	0,62
E	100	4,87	3,63	2,71	0,36	0,69
E	200	5,70	4,09	3,35	0,60	0,98
E	400	5,87	4,70	4,10	0,93	1,30
F	0	5,06	3,99	3,26	1,25	1,17
F	100	5,77	4,65	4,21	1,81	1,33
F	200	6,21	4,74	4,39	1,97	1,48
F	400	6,41	5,36	5,13	2,27	1,83

Cuadro 5.3. Concentración de K del raigrás para cada tratamiento de suelo*dosis según sacrificio

Suelo	Dosis K mg kg ⁻¹	Sacrificio	Sacrificio	Sacrificio	Sacrificio	Sacrificio
		1	2	3	4	5
		g K kg MS ⁻¹				
A	0	14,1	4,5	3,4	--	1,5
A	100	25,5	5,5	6,6	1,4	1,0
A	200	33,0	7,9	8,5	4,1	1,9
A	400	44,7	13,6	12,6	9,5	1,3
B	0	11,3	4,8	3,5	--	0,6
B	100	22,0	5,2	6,9	6,3	1,0
B	200	33,8	8,4	8,6	6,9	1,7
B	400	44,0	14,2	11,1	6,2	0,9
C	0	21,8	6,8	8,2	9,5	8,4
C	100	31,6	9,3	10,5	10,2	8,5
C	200	37,4	12,5	11,3	8,7	6,7
C	400	48,3	20,0	16,2	10,8	7,5
D	0	16,5	5,2	5,4	--	0,5
D	100	26,7	7,1	8,9	4,5	0,8
D	200	34,4	9,3	9,3	4,4	3,6
D	400	45,5	16,4	12,4	7,9	2,2
E	0	20,3	6,1	6,7	10,4	7,9
E	100	30,4	8,2	9,1	7,1	3,7
E	200	36,7	11,3	11,0	9,8	6,3
E	400	47,4	21,1	13,9	13,6	8,5
F	0	25,0	12,0	14,6	11,1	4,2
F	100	35,1	19,2	19,4	10,3	4,1
F	200	37,7	23,9	22,6	10,9	6,2
F	400	49,3	30,4	27,6	14,6	7,1

Cuadro 5.4. Extracción de K realizada por el raigrás para cada tratamiento de suelo*dosis según sacrificio

Suelo	Dosis K mg kg ⁻¹	Sacrificio	Sacrificio	Sacrificio	Sacrificio	Sacrificio
		1	2	3	4	5
		mg K kg suelo ⁻¹				
A	0	53	8	1	--	--
A	100	122	15	8	--	--
A	200	180	26	14	2	1
A	400	268	62	31	4	1
B	0	41	9	2	--	--
B	100	108	16	11	2	--
B	200	185	30	19	3	1
B	400	254	62	37	7	1
C	0	105	22	14	3	10
C	100	177	37	28	7	11
C	200	229	57	36	8	11
C	400	305	97	61	13	13
D	0	64	11	3	--	--
D	100	139	23	14	1	--
D	200	195	37	24	2	2
D	400	277	76	42	5	2
E	0	84	18	10	3	5
E	100	148	30	25	3	2
E	200	209	46	37	6	6
E	400	278	99	57	13	11
F	0	127	49	49	14	6
F	100	202	90	82	18	6
F	200	234	113	99	21	10
F	400	316	163	141	33	12

Cuadro 5.5. Potasio final determinado con NH₄OAc para cada tratamiento de suelo*dosis según sacrificio

Suelo	Dosis K	Sacrificio 1	Sacrificio 2	Sacrificio 3	Sacrificio 4	Sacrificio 5
	mg kg ⁻¹	mg K kg suelo ⁻¹				
A	0	30	23	22	18	16
A	100	34	26	25	23	22
A	200	36	31	25	26	25
A	400	44	39	30	25	26
B	0	46	30	27	26	26
B	100	49	42	27	27	22
B	200	52	49	30	30	30
B	400	62	52	31	22	20
C	0	116	107	87	72	71
C	100	120	105	93	75	57
C	200	135	112	96	67	67
C	400	137	111	100	70	67
D	0	54	47	38	40	30
D	100	62	53	43	42	37
D	200	65	55	40	42	35
D	400	72	61	44	39	43
E	0	154	137	99	90	72
E	100	165	149	109	95	92
E	200	171	153	117	98	79
E	400	182	154	116	86	81
F	0	145	132	110	93	91
F	100	156	137	118	106	87
F	200	152	138	109	99	100
F	400	169	155	123	110	105

Potasio intercambiable determinado con acetato de amonio 1 N a pH 7 (Jackson, 1964)

Cuadro 5.6. Potasio final determinado con NaTPB para cada tratamiento de suelo *
dosis según sacrificio

Suelo	Dosis K mg kg ⁻¹	Sacrificio	Sacrificio	Sacrificio	Sacrificio	Sacrificio
		1	2	3	4	5
		mg K kg suelo ⁻¹				
A	0	69	64	58	51	54
A	100	77	71	56	54	80
A	200	84	81	64	65	52
A	400	99	79	63	61	59
B	0	86	57	49	57	47
B	100	88	72	60	54	64
B	200	98	78	54	51	60
B	400	100	92	54	57	51
C	0	258	248	198	184	211
C	100	278	244	217	183	177
C	200	303	254	216	196	191
C	400	288	233	232	188	180
D	0	125	117	88	97	101
D	100	127	103	91	77	112
D	200	141	110	99	81	90
D	400	145	116	95	88	105
E	0	281	248	193	191	157
E	100	291	239	196	209	206
E	200	311	259	212	178	182
E	400	349	267	221	202	172
F	0	484	424	343	348	365
F	100	512	409	340	356	343
F	200	479	391	344	347	376
F	400	506	423	366	377	362

Potasio determinado con tetrafenilborato de sodio con 5 minutos de incubación (Cox et al., 1999)