

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EQUIVALENTE FERTILIZANTE DE POTASIO PARA ALGUNOS SUELOS
AGRÍCOLAS DE URUGUAY**

por

Ricardo Gabriel FAGGIONATO BIDEAU

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2011**

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Mónica Barbazán

Ing. Agr. Amabelia del Pino

Ing. Agr. Jorge Hernández

Fecha: 22 de diciembre de 2011

Autor:

Ricardo Gabriel Faggionato Bideau

AGRADECIMIENTOS

Para la realización del presente trabajo, su autor, contó con el apoyo de varias personas vinculadas al Departamento de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía.

Desde ya mi agradecimiento a Mónica Barbazán, por ser la tutora de este trabajo. A Amabelia del Pino y Jorge Hernández, por las correcciones y sugerencias realizadas con el propósito de enriquecer el mismo. A Jimena Rodríguez, Lucía Rocha, Sabrina Latorre, Verónica Piñeiro, Pedro Harreguy, Marcelo Ferrando, Sergio Malutín y Leticia Martínez por su ayuda en el laboratorio de análisis de suelos y plantas, en los análisis allí realizados. A Leticia Martínez además, por realizar las determinaciones de algunos de ellos.

También mi agradecimiento es para Sully Toledo, quién desempeña funciones en la biblioteca de la Facultad de Agronomía, por sus correcciones y sugerencias con respecto a las cuestiones formales para la presentación de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE CUADROS E LUSTRACIONES	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	4
2.1 EL POTASIO EN LAS ROCAS Y EN LOS SUELOS	4
2.1.1 <u>Minerales primarios</u>	7
2.1.2 <u>Minerales secundarios</u>	8
2.2 DINÁMICA DEL POTASIO EN EL SUELO	9
2.2.1 <u>Reservas de Potasio en los suelos</u>	10
2.2.1.1 Potasio en la solución.....	10
2.2.1.2 Potasio intercambiable	12
2.2.1.3 Potasio no intercambiable.....	13
2.2.2 <u>Entradas de K al suelo</u>	15
2.2.2.1 Fertilización.....	15
2.2.3 <u>Pérdidas de K del suelo</u>	17
2.2.3.1 Extracción por los cultivos	18
2.2.3.2 Lixiviación.....	19
2.2.3.3 Erosión	20
2.2.4 <u>Capacidad reguladora</u>	21
2.2.5 <u>Cantidad y tipos de arcilla como factores determinantes de la capacidad</u> <u>reguladora de los suelos</u>	23

2.2.5.1 Grupo de la Caolinita	25
2.2.5.2 Grupo de la Illita	26
2.2.5.3 Grupo de las Esmectitas	27
2.2.5.4 Minerales arcillosos no cristalinos o paracristalinos	29
2.2.5.5 Efectos del tipo de arcilla sobre la dinámica del K en el suelo	29
2.2.6 <u>Otros factores que influyen en el equilibrio</u>	
<u>de las fracciones de K en el suelo</u>	30
2.2.6.1 Interacción del K con otros nutrientes	30
2.2.6.2 pH.....	32
2.2.6.3 Humedad	33
2.2.6.4 Materia orgánica e hidróxidos	33
2.3 CONTENIDO DE POTASIO EN SUELOS DE URUGUAY	35
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	38
3.1 ORÍGEN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO.....	38
3.2 EXPERIMENTO.....	39
3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	40
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	41
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS.....	41
4.1.1 <u>Textura</u>	41
4.1.2 <u>Materia orgánica</u>	44
4.1.3 <u>Contenido de bases, CIC efectiva y pH</u>	44
4.1.4 <u>Potasio intercambiable y no intercambiable</u>	46
4.2 VARIACIÓN DEL K INTERCAMBIABLE EN LOS TRATAMIENTOS	
SIN FERTILIZAR	50

4.3 VARIACIÓN DEL K INTERCAMBIABLE EN LOS TRATAMIENTOS FERTILIZADOS.....	51
4.4 EQUIVALENTE FERTILIZANTE.....	53
4.5 RELACIÓN ENTRE EL EQUIVALENTE FERTILIZANTE Y LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS.....	57
4.6 FORMAS DE K Y EQUIVALENTE FERTILIZANTE EN SUELOS FORMADOS SOBRE SEDIMENTOS LIMO - ARCILLOSOS SOBRE EL BASAMENTO CRISTALINO.....	57
4.7 FORMAS DE K Y EQUIVALENTE FERTILIZANTE EN SUELOS FORMADOS SOBRE SEDIMENTOS ARCILLO – ARENOSOS (LIMO – ARCILLOSOS) SOBRE ARENISCAS CRETÁICAS.....	58
4.8 FORMAS DE K Y EQUIVALENTE FERTILIZANTE EN SUELOS FORMADOS SOBRE SEDIMENTOS LIMOSOS CON NIVELES CALCÁREOS SOBRE FM. FRAY BENTOS.....	58
4.9 FORMAS DE K Y EQUIVALENTE FERTILIZANTE EN SUELOS FORMADOS SOBRE SEDIMENTOS FRANCOS (LIMO – ARCILLOSOS) SOBRE FM. FRAY BENTOS.....	59
5. <u>CONCLUSIONES</u>	60
6. <u>RESUMEN</u>	61
7. <u>SUMMARY</u>	62
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	63
9. <u>ANEXOS</u>	70

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Contenido promedio de K_2O (%) en algunas rocas comunes de la corteza terrestre	4
2. Nivel relativo de K intercambiable extraído con acetato de amonio o Mehlich 3 según el nivel de K en el sub-suelo en el estado de Iowa.....	16
3. Extracción de K según cultivo y rendimiento	18
4. Extracción de K por cultivos cerealeros y oleaginosos en Argentina.....	18
5. Contenido de K en las fracciones químicas, mineralogía de la fracción arcilla y material madre de trece suelos de Uruguay	35
6. Caracterización física y química de los suelos estudiados. Parte 1.	42
7. Caracterización física y química de los suelos estudiados. Parte 2.	43
8. Prueba de Tukey entre medias, que comparan los contenidos promedios de K intercambiable entre los testigos (tratamientos sin agregado de K) según el momento de su medición.....	51
9. Prueba de Tukey entre medias que comparan los contenidos promedios de K intercambiable entre los tratamientos con K según el momento de su medición	52
10. Parámetros de la regresión empleados para la estimación del equivalente fertilizante para cada sitio, significancia y coeficiente de determinación.....	54
11. Equivalente fertilizante calculado a partir de las ecuaciones de regresión (Cuadro 10) para cada momento y sitio	55

Figura No.

1. Ciclo del Potasio en el suelo.....	9
2. Forma general de la relación Q/I y parámetros deducidos de ella.....	23
3. Modelo de arcilla expansible con las posiciones p, e, i de iones Potasio.....	24
4. Estructura atómica y cristalina de la Caolinita	25
5. Estructura atómica y cristalina de la Illita	27
6. Estructura atómica y cristalina de la Montmorillonita.....	28
7. Origen de las muestras de suelos estudiadas	38
8. Regresión entre el porcentaje de arcilla y la CIC efectiva para los 36 suelos estudiados	45
9. Regresión entre el porcentaje de materia orgánica y la CIC efectiva para los 36 suelos estudiados.....	45
10. Regresión entre el contenido de bases y el pH para los 36 suelos estudiados	46
11. Contenido promedio de K intercambiable (cmolc kg ⁻¹) según el material de origen.....	47
12. Contenido promedio de K no intercambiable (cmolc kg ⁻¹) según el material de origen.....	49
13. Relación entre el contenido de K intercambiable y el de K no intercambiable para los 36 suelos estudiados	50
14. Equivalente fertilizante promedio (kg K ₂ O ha ⁻¹) según el material de origen de los suelos	56

1. INTRODUCCIÓN

El Potasio (K) es uno de los tres macronutrientes primarios esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. La importancia de este nutriente, radica en su participación en varios procesos metabólicos, no siendo aún encontrado formando parte de compuestos estructurales (Navarro y Navarro 2003, Roldán et al. 2004). Su rol es la activación de enzimas (se conocen más de 60 activadas por este catión) que actúan en procesos tales como la fotosíntesis, la síntesis de proteínas y la síntesis de carbohidratos (Conti 2000, Navarro y Navarro 2003). Entre los tipos de enzimas que el K activa se destacan: oxidoreductasas, deshidrogenasas, transferasas, sintetetasas y quinasas (Bonilla, 2000). También tiene incidencia en el balance de agua y en el crecimiento meristemático (Bonilla 2000, Mengel y Kirby, citados por Conti 2000, Navarro y Navarro 2003). Después del Nitrógeno y el Calcio, el K es el elemento absorbido en mayores cantidades por las plantas (Roldán et al., 2004).

Desde el punto de vista agrícola, la deficiencia de K origina: reducción de los órganos de reserva, falta de resistencia a enfermedades causadas por hongos, prolongación del período vegetativo y retraso de la maduración de las semillas, menor resistencia al frío, tendencia al marchitamiento, retraso en el crecimiento radicular y descenso general de los rendimientos. Cuando ocurre exceso se originan comúnmente situaciones de deficiencia de Magnesio, Hierro y Zinc (Navarro y Navarro, 2003) y posibles problemas en la absorción y disponibilidad de Calcio y Magnesio (Bonilla, 2000).

En nuestro país, la fertilización de cultivos cerealeros y oleaginosos con K ha sido escasa en el pasado, ya que la agricultura se realizaba en suelos bien provistos de este nutriente (Hernández et al., 1988). Algunos trabajos realizados en Uruguay concluyeron que no había respuesta vegetal al agregado de K en algunos suelos (Marella et al. 1981, Colombo y Collares 1982, Hernández 1983, Pereira et al. 1983), mientras que otros encontraron que sí la hubo (Moir y Reynaert, 1962).

En la actualidad, el crecimiento del área agrícola ha ocupado suelos de menor aptitud para su desarrollo. Ejemplos de ellos, son los suelos originados a partir de areniscas cretácicas, con niveles naturales relativamente bajos de K intercambiable (Bautés et al., 2009). A este cambio de localización de la agricultura se le suman su intensificación, el uso de cultivares con mayor potencial de rendimiento y la siembra directa como herramienta para la conservación del suelo, donde la dinámica de

nutrientes presenta diferencias con las existentes en laboreo convencional (Bordoli, 2001).

Esta nueva situación de la agricultura, que comenzó en la década de los 90, hace necesario enriquecer el conocimiento de la dinámica del K en los suelos agrícolas uruguayos para integrarlos a las recomendaciones de fertilización con este nutriente. Trabajos realizados en los últimos años concluyeron que hubo deficiencia de K (Morón y Baethgen 1996, Barbazán et al. 2007, Cano et al. 2007, Baudes et al. 2009) en algunas zonas agrícolas.

El análisis del suelo es imprescindible para valorar la fertilidad de los suelos agrícolas y los resultados obtenidos sirven como base para formular recomendaciones de fertilización. Ésta, se justifica en los casos en los que exista una correlación entre los resultados analíticos y la respuesta positiva de los cultivos frente a la aplicación de fertilizantes.

Cuando hacemos recomendaciones de fertilización potásica a partir del resultado del análisis del suelo, suponemos que existe un equivalente fertilizante, definido como la cantidad de K_2O necesaria para aumentar la disponibilidad de K para las plantas en $0.1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de suelo, cuyo valor teórico es $117 \text{ kg } K_2O \text{ ha}^{-1}$, considerando una profundidad de suelo de 20 cm y una densidad aparente de $1,25 \text{ g cc}^{-1}$.

Este valor supone que el intercambio catiónico es instantáneo, que no hay fijación del K agregado o liberación del K fijado en el suelo, y que todo ocurre en los 20 cm de profundidad. Sin embargo, ese valor puede variar de acuerdo a las características de cada suelo.

Muchos son los casos conocidos en los que no fue posible hallar alguna correlación entre los resultados obtenidos en el análisis y el aumento buscado en la producción. En centenares de ensayos realizados en la India, por ejemplo, se obtuvieron buenos resultados con el agregado de K en suelos con tenores altos en K "disponible" o intercambiable, así como efectos pobres o nulos en suelos que, según el análisis, eran bajos en K (Hobt, 1978).

El porcentaje de arcilla y el tipo de mineral arcilloso predominante en cada suelo determinan la afinidad con la cual la arcilla retiene a los cationes y por consiguiente el desplazamiento del equilibrio K en solución – K intercambiable (Hipp y

Thomas, citados por Hernández et al., 1988), las dos formas de K en el suelo disponibles para las plantas en el corto plazo (Conti 2000, Aguado et al. 2002). Si estas formas de K son bajas, los suelos deben ser complementados con fertilizantes potásicos para incrementar su disponibilidad (De la Horra et al., citados por Aguado et al., 2002).

La capacidad amortiguadora (poder buffer o tampón) del suelo para K, o sea la capacidad de éste para mantener el equilibrio existente entre la concentración en solución y las formas intercambiables, evita que este nutriente se pierda por lixiviación, pero a su vez, puede existir una competencia entre la retención del suelo y la disponibilidad para las plantas, que lleva a que aún con reservas importantes de K los suelos brinden relativamente bajas cantidades en el corto plazo (Hernández, citado por Bautes et al., 2009).

Por lo tanto, los objetivos de este estudio son: 1) estimar la variación ocurrida en el contenido de K intercambiable en muestras de 36 suelos representativos de las regiones agrícolas uruguayas, luego de 30 y 60 días de ser fertilizados con K para estimar el equivalente fertilizante para cada suelo; y 2) buscar su relación con algunas de las características granulométricas y químicas de los mismos (textura, pH, materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), bases, K intercambiable y no intercambiable iniciales).

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 EL POTASIO EN LAS ROCAS Y EN LOS SUELOS

El K está ampliamente distribuido en las rocas de la tierra y en peso se estima que representa el 2,6% de la corteza terrestre (Bertsch y Thomas 1985, Conti 2000, Jackson, citado por Durán 2004, Porta et al. 2007). Se encuentra presente tanto en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas (Sheldrick, 1985) siendo el séptimo elemento más abundante de la corteza terrestre y el cuarto nutriente mineral más abundante en la litósfera (Bertsch y Thomas, 1985). En promedio, el contenido de K como K₂O en rocas ígneas es de 3,13%, y en rocas sedimentarias de 1,32% (Jackson, citado por Hernández, 1983).

Cuadro 1. Contenido promedio de K₂O (%) en algunas rocas comunes de la corteza terrestre.

ROCAS ÍGNEAS					
<u>Roca</u>	% K ₂ O	<u>Roca</u>	% K ₂ O	<u>Roca</u>	% K ₂ O
Granito	5,3	Sienita Nefelínica	5,34	Basalto Alcalino Olivínico	1,2
Granodiorita	3,1	Andesita Hipersteno	1,2	Basalto Toleítico	0,7
Sienita	6,53	Andesita Olivínica	0,6	Peridorita	0,25
		Escoria volcánica	1,2		
		Basalto Olivínico	1,6		
ROCAS SEDIMENTARIAS					
Gres	1,3	Esquistos arcillosos	3,6	Calizas	0,57

Fuente: adaptado de Mejía (1978).

La distribución del K en las rocas y su subsistencia en ellas, guarda una estrecha relación con: la magnitud de su radio iónico, su polarizabilidad, su carga y su energía de hidratación. En virtud de estas características, la red cristalina de los minerales que lo contienen, actúa como un mecanismo de sorteo o "criba" química, regulando los fenómenos de intercambio y movilidad del K, y en general, su comportamiento (Jackson, citado por Mejía, 1978).

En relación con estas características, el ión se caracteriza por:

1. Un radio iónico grande (0,133 nm), que le confiere una relativa debilidad a sus enlaces con el Oxígeno (enlaces K-O).
2. Una polarizabilidad mayor que la de los iones Ca^{+2} , Mg^{+2} y Na^+ , y menor que la de los iones NH_4^+ , Rb y Cs; y por lo mismo, mayor susceptibilidad al intercambio que los 3 primeros, pero menor que la de los 3 últimos.
3. Una muy baja energía de hidratación (34 Kcal g^{-1} ión, 1^{er} orbital), como resultado de la cual, su efecto es mínimo en la expansión del espacio interlamilar de los filosilicatos que lo contienen, comparado con el de otros cationes que comúnmente compiten con él en estas posiciones (Rich, citado por Mejía, 1978).

Siendo estas características específicas para cada catión, la composición elemental de las rocas determina en la mayoría de los casos la naturaleza de los minerales secundarios formados, e influye en la composición iónica de las soluciones acuosas en contacto con los granos minerales (Mejía, 1978).

Los principales minerales constituyentes de rocas portadores de K en su estructura son los feldespatos potásicos y las micas, siendo constituyentes de rocas plutónicas y metamórficas (granitos, sienitas, gneises, pegmatitas) y por alteración de éstas, de rocas sedimentarias (Hernández, 1983). La ortosa y variedades polimorfas constituyen un 16% de la corteza terrestre, la biotita y micas trioctaédricas un 3,8% y la muscovita un 1,4% (Ahrens, Black, citados por Hernández, 1983). En rocas ígneas como el Granito y la Riolita, los feldespatos pueden conformar hasta el 60% de su peso. En rocas sedimentarias, el contenido de estos minerales oscila entre 5 a 15% (Porta et al., 2007).

Con respecto al contenido de K en los minerales, los feldespatos potásicos tipo microclina tienen de un 7 a un 9%, la biotita de 4,5 a 7% y la muscovita de 6 a 9% (Rouché, Chevalier, citados por Hernández, 1983).

La riqueza de cationes del suelo está directamente relacionada al material madre (Bossi y Navarro, 1988), el cual, a través de su meteorización, explica los contenidos relativos de cationes en el suelo con respecto al de las capas geológicas subyacentes (Durán, citado por Casanova y Ferrando, 2003).

En los suelos, el contenido de K varía entre 0,04 y 3,5% de K₂O (Bertsch y Thomas 1985, Navarro y Navarro 2003, Durán 2004, Roldán et al. 2004), valores inferiores a los tenores de este elemento en la mayoría de las rocas (excepto calizas y rocas ígneas básicas) (Durán, 2004). Fassbender y Bornemisza (1987) citan un rango entre 0,04 y 3 % en general, y que los suelos salinos pueden alcanzar un contenido de hasta un 8 %.

Según Hernández (1992), el contenido de K total en la capa arable de los suelos es variable y puede oscilar entre unos pocos cientos de kg por hectárea en suelos de textura liviana formados sobre areniscas o cuarcitas, hasta 50.000 kg ha⁻¹ o más en suelos de textura pesada formados sobre materiales con altos contenidos de minerales portadores de K.

En general suelos derivados de rocas básicas y suelos poco meteorizados son los que tienen menores contenidos. Del contenido total de K en el suelo, entre el 90-98% está formando parte de minerales primarios, de 1 a 10% se encuentra fijado entre las láminas de arcilla 2:1 y de 1 a 2% corresponde a las formas intercambiables y solubles (Roldán et al., 2004).

La fuente primaria del K del suelo son los minerales potásicos primarios y los minerales secundarios resultantes de su alteración, aunque en suelos orgánicos la materia orgánica puede contribuir también con un aporte sustantivo (Mejía, 1978).

Las plantas obtienen el K del suelo proveniente de la meteorización de los minerales que contienen este elemento, de la mineralización de los residuos orgánicos o el que proviene de los abonos y fertilizantes. En condiciones naturales, los procesos pedogenéticos, condiciones de clima y vegetación actúan sobre los materiales presentes en el suelo y producen en mayor o menor medida la disponibilidad del nutriente (Conti, 2000). De esta manera, el contenido de K está estrechamente relacionado con su tipo de material parental y la pedogénesis (Mengel y Rahmatullah, citados por Conti, 2000).

2.1.1 Minerales primarios

La mayor parte del K en las fracciones arena y limo de los suelos se halla en los minerales clasificados como feldespatos y micas. Entre ellos, los más importantes son los feldespatos ortosa y microclina (KAlSi_3O_8) y las micas biotita ($[\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Al},\text{Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2]$) y muscovita ($\text{KA}l_2(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$) (Hernández 1983, Bertsch y Thomas 1985, Navarro y Navarro 2003, Durán 2004).

De los minerales primarios, a las micas se les confiere generalmente la mayor importancia como fuente natural del K del suelo, en razón de su menor estabilidad frente a los agentes de meteorización. Aunque los feldespatos potásicos son más abundantes y tienen por lo general un contenido mayor de K, se ha comprobado que bajo condiciones idénticas en lo que respecta al tamaño de partículas, la estabilidad relativa de estos minerales fuente decrece en el siguiente orden: feldespatos potásicos > muscovita > biotita, dado que la energía de activación de cada uno de estos minerales es de 23, 20 y 14 Kcal mol^{-1} respectivamente (Mejía, 1978). Por consiguiente, la liberación de K y por ende su disponibilidad se incrementa de los feldespatos a las micas (Schroeder, Rich, citados por Mejía 1978, Navarro y Navarro 2003).

Los feldespatos (tectosilicatos) consisten en una red tridimensional de tetraedros de silicio, donde hay alguna sustitución de Si por Al. Esta sustitución imparte una carga negativa a la estructura, la que está neutralizada por la incorporación de otros cationes de carga positiva, en este caso K (Hernández 1983, Durán 2004).

Por otro lado, las micas (filosilicatos) se constituyen de dos capas de tetraedros de Si o Al entre las que se ubica una capa de octaedros, en los que el catión central puede ser Al, Fe o Mg (Grim, Rich, citados por Hernández, 1983). Se clasifican en dioctaédricos cuando dos de los tres octaedros están ocupados por cationes trivalentes (tales como Al^{+3} o Fe^{+3}) o en trioctaédricos cuando los tres octaedros están ocupados por cationes bivalentes (tales como Mg^{+2} o Fe^{+2}). En estos minerales, ocurren sustituciones isomórficas de Si por Al en la capa de tetraedros originando exceso de cargas negativas que se contrarrestan con la entrada de cationes como el K. El tamaño de este catión le permite ocupar el hueco existente entre los oxígenos de los tetraedros, e impedir la entrada de moléculas de agua, con lo cual se acercan las unidades estructurales llevando a una compactación de la estructura e impidiendo la entrada de otros cationes (Hernández, 1983).

La liberación del K interlaminar de las micas se produce durante su transformación en minerales de arcilla. Estudios de este proceso "in vitro" y bajo condiciones naturales (Jackson et al., Wilson, Royle et al., Seddoh y Roberts, Eswaran y Re Hang, Cook y Rich, citados por Mejía, 1978) parecen indicar que en zonas templadas húmedas, e incluso en áreas tropicales poco lixiviadas y ricas en bases, la meteorización de las micas sigue en líneas generales la secuencia propuesta por Jackson et al., Schroeder, citados por Mejía (1978): Mica (10 % K) – Hidromica (6-8 % K) – Illita (4-6 % K) – Minerales arcillosos transicionales (3 % K) – Montmorillonita y Vermiculita (1 % K). En esta secuencia, ocurre una disminución progresiva del contenido de K y del tamaño de partícula y a su vez ocurre un aumento en el contenido de agua, en la superficie específica y en la capacidad de intercambio catiónico.

2.1.2 Minerales secundarios

Los minerales arcillosos son la fuente principal de K en el suelo (Holt 1978, Sardi y Debreczeni, Buhman, citados por Conti 2000, Navarro y Navarro 2003), siendo la illita, el principal mineral portador de K en la fracción arcilla de los suelos (Durán, 2004). Este y otros grupos de minerales secundarios serán tratados en el punto 2.2.5 de este trabajo.

Suelos arcillosos y limo - arcillosos son más ricos en K que los limo - arenosos y arenosos. Estas diferencias en el contenido están además influenciadas por las pérdidas del suelo debidas a la extracción por los cultivos, el lavado y la erosión (Navarro y Navarro, 2003).

La disponibilidad de K, está relacionada con la facilidad con la cual las plantas puedan obtenerlo y eso significa que debe estar disuelto como ión potasio (K^+) en la solución del suelo. Esa es la forma en la que es absorbido por la planta (Hernández 1996, Conti 2000).

2.2 DINÁMICA DEL POTASIO EN EL SUELO

Los componentes de la reserva de K en el suelo (K en la solución, K intercambiable, K no intercambiable) se encuentran en equilibrio dinámico (Jackson, Granger, citados por Mejía 1978, Andreoli y Peinemann 1984, Aguado et al. 2002, Navarro y Navarro 2003), el cual se modifica por las entradas de K al sistema a través de la fertilización y mineralización de los residuos orgánicos, y por las salidas del mismo mediante la absorción de K por los cultivos (Aguado et al. 2002, Navarro y Navarro 2003), la lixiviación y la erosión del suelo (Goulding, citado por Conti 2000, Navarro y Navarro 2003, Figura 1).

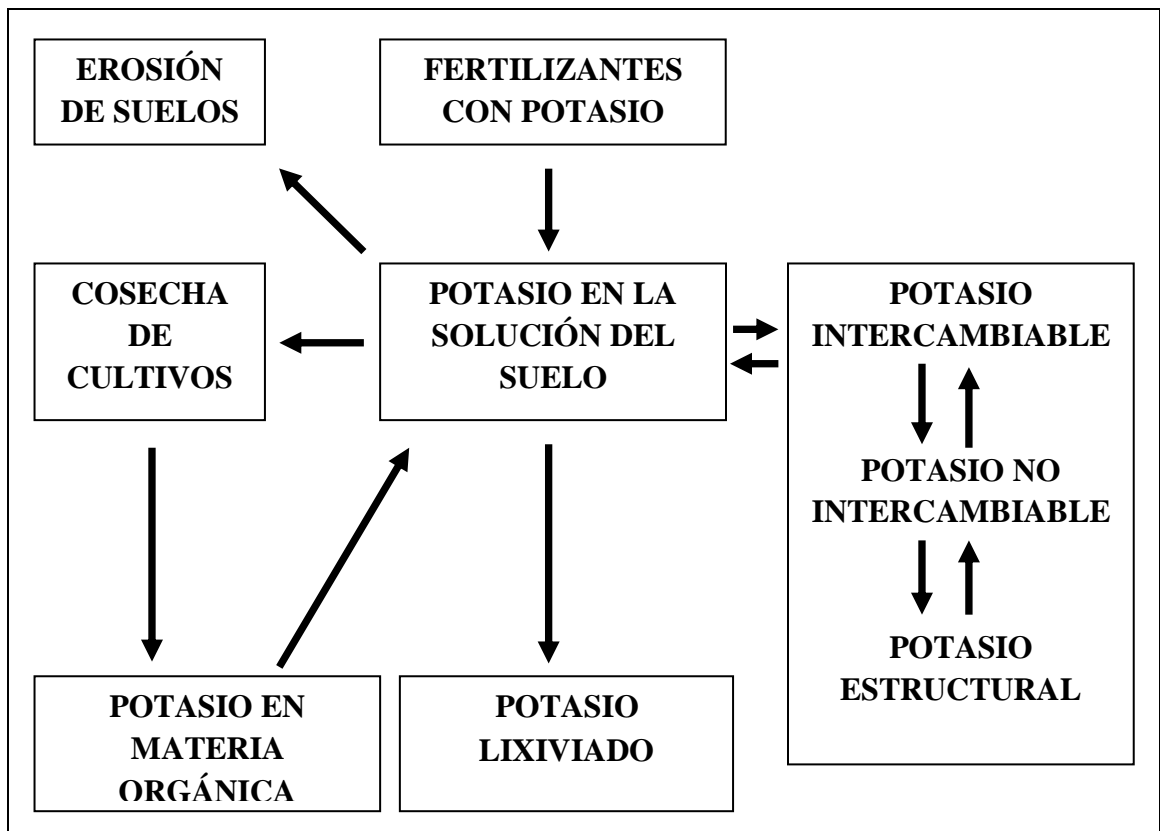


Figura 1. Ciclo del Potasio en el suelo. Fuente: adaptado de Conti (2000).

La dirección del flujo de K tiende siempre hacia un equilibrio y está determinada por el grado de saturación que presente una o más de las reservas (Kauffman y Bouldin, Németh et al., citados por Montoya et al., 2007).

2.2.1 Reservas de Potasio en los suelos

En base a las diferencias en su biodisponibilidad, el K del suelo se divide en tres fracciones: soluble, intercambiable y el no intercambiable. Esta última fracción comprende el K potencialmente disponible para las plantas o fijado y el presente en la matriz mineral o estructural (Attoe y Troug, citados por Andreoli y Peinemann 1984, Sparks y Huang 1985, Casanova 1996, Aguado et al. 2002).

Los contenidos de cada una de estas fracciones oscilan entre los siguientes rangos: K estructural, de 5000 a 25000 mg kg⁻¹ (12,8 a 64 cmol_c kg⁻¹); K no intercambiable, de 50 a 750 mg kg⁻¹ (0,13 a 1,92 cmol_c kg⁻¹); K intercambiable, de 40 a 60 mg kg⁻¹ (0,10 a 1,54 cmol_c kg⁻¹); K en solución, de 1 a 10 mg kg⁻¹ (0,00256 a 0,0256 cmol_c kg⁻¹) (Casanova, 1996).

2.2.1.1 Potasio en la solución

El K de la solución del suelo (como K⁺) está disponible y puede ser absorbido por las plantas en forma inmediata (Conti 2000, Aguado et al. 2002), pero las cantidades presentes son muy pequeñas. Apenas una mínima porción del K total del suelo se encuentra en esta forma (Bertsch y Thomas 1985, Casanova 1996, Conti 2000), siendo su contenido dependiente de su textura, de los tipos de arcillas, del contenido de humedad y de la presencia o no de un cultivo (Hernández, 1983).

Solo una pequeña fracción del K absorbido por las plantas es alcanzado por contacto directo (intercepción) entre las raíces y las partículas del suelo (Hobt, 1978), siendo la difusión el mecanismo principal de llegada del K a la superficie radicular (Hernández 1996, del Pino 1997, Vidal 2003). Este proceso ocurre cuando el K se mueve desde un área de alta concentración a una de baja concentración. Las plantas, a medida que absorben el nutriente desde la solución del suelo provocan una disminución de la concentración en el área próxima a las raíces generando un gradiente de concentración que provoca la difusión de iones K hacia la superficie de la raíz (del Pino, 1997).

A medida que aumenta la saturación con K de los minerales arcillosos (ver punto 2.2.5) el proceso de difusión aumenta. Si se comparan dos suelos con iguales niveles de K intercambiable pero diferentes contenidos de arcilla, el ritmo de difusión es

más intenso en suelos con bajo contenido de arcilla, ya que su grado de saturación con K es mayor y, por consiguiente, mayor la concentración de K en solución (Hobt, 1978).

El ritmo de difusión depende, asimismo, de la humedad del suelo. En ensayos de laboratorio ha sido comprobado que el K se mueve con mayor rapidez en los suelos húmedos que en los secos. La influencia de la humedad del suelo sobre la disponibilidad del K fue corroborada tanto en ensayos de invernadero como en el campo. Los resultados indican que en suelos con óptima provisión de agua, una menor cantidad de K es requerida para alcanzar determinado nivel de producción. En un suelo relativamente seco, más cantidad de K habrá de ser aplicada para vencer la gradual reducción de movilidad. Este hecho es de especial importancia para cortos períodos sin lluvia durante la época de mayor desarrollo vegetativo. Debido al movimiento más lento de los nutrientes en el suelo, habrá deficiencia de K en el caso de una deficiente saturación con K, con las correspondientes mermas en cantidad y calidad del producto a cosechar. En un suelo demasiado húmedo, suministros adicionales de K ayudan a contrarrestar la disminuida capacidad de absorción de nutrientes por parte de las raíces, causada por la deficiente aireación y los procesos reductivos desfavorables en el suelo (Hobt, 1978).

El coeficiente de difusión de K en el agua (DL) es de $1.9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ y es un valor constante, mientras que los valores de D_e del K en el suelo, en general, se encuentran entre 1×10^{-6} y $1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Barber, citado por Borges et al., 2005). En arcillas no hidratadas, como por ejemplo la illita, los valores de D_e pueden ser tan bajos como $1 \times 10^{-23} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Tinker y Nye, citados por Borges et al., 2005), sugiriendo que mientras más arcillas de este tipo contenga el suelo, la difusión de K será menor (Borges et al., 2005).

Además del transporte por difusión, el transporte de K puede ser por flujo masal (Sparks y Huang 1985, del Pino 1997, Vidal 2003). Las plantas absorben agua y ésta se mueve de acuerdo a gradientes de concentración hacia la raíz. De esta manera, el K en la solución es transportado hacia la superficie radicular quedando apto para ser absorbido (del Pino, 1997).

A medida que el K es absorbido y extraído, su concentración es renovada y restituida inmediatamente por las formas menos accesibles de K ubicadas en las zonas de adsorción de los coloides minerales y orgánicos del suelo (Conti 2000, Meyer y Jungk, citados por Montoya et al. 2007).

El proceso de adsorción-desorción es el que repone y equilibra la concentración de K de la solución del suelo. La capacidad de intercambio catiónico (CIC), específicamente el K intercambiable es el que regula y mantiene la concentración de K en solución. Esta forma de K es la clave de la liberación y renovación de la solución del suelo (Conti, 2000).

Los valores de K en solución reflejan la velocidad de reposición y en consecuencia el restablecimiento del equilibrio (Casanova, 1996).

2.2.1.2 Potasio intercambiable

Es la forma iónica del potasio (K^+) unido electrostáticamente a los materiales que componen la fase sólida coloidal mineral y orgánica (Hernández 1983, Conti 2000). Además del K, otros cationes ocupan sitios de intercambio por lo que la distribución de K en estos sitios es función del tipo y cantidad de dichos cationes complementarios, así como también de la concentración de aniones y de las propiedades de los materiales intercambiadores (Hernández, 1996).

A medida que la concentración de K de la solución desciende, el K adsorbido es liberado a la solución del suelo. A la inversa, si la concentración de K de la solución del suelo aumenta por la aplicación de fertilizantes potásicos, parte de éste dejará la solución y se unirá electrostáticamente al material coloidal de la fase sólida (Conti, 2000).

El K intercambiable es una fracción de reserva de respuesta rápida. Es adsorbido en las arcillas ya que él compensa las cargas negativas que resultan de las sustituciones isomórficas en la estructura de éstas o de las fracturas del cristal, y se encuentra en equilibrio con el K en solución (Aguado et al., 2002).

La cantidad de K intercambiable de un suelo se relaciona con la capacidad de intercambio de cationes y la mineralogía del suelo (López, citado por Aguado et al., 2002). El K intercambiable se considera como la fuente primaria de K para las plantas, puesto que reemplaza rápidamente al K en solución absorbido por éstas (Aguado et al., 2002).

Schmitz y Pratt, citados por Hernández et al. (1988), comprobaron que el valor de K intercambiable en suelos poco alterados es un buen estimador del K liberado por el suelo durante varios años de cultivo. Sin embargo, en suelos medianamente a muy alterados la

correlación entre formas intercambiables y la liberación de K durante el mismo período de tiempo fue muy baja. A igual resultado llegó Pearson, citado por Hernández et al. (1988), trabajando con suelos muy meteorizados y lixiviados de Alabama.

La suma del K de la solución y del K intercambiable, es comúnmente denominado K "disponible" y medido en los análisis convencionales para evaluar la fertilidad del suelo (Conti, 2000). Generalmente, la extracción es realizada con una sal de amonio normal y neutra, como por ejemplo el acetato de amonio (Black, citado por Hernández, 1983).

2.2.1.3 Potasio no intercambiable

Existen formas de K que están fuertemente unidas a la fase sólida mineral, las cuales se denominan "K fijado" y "K estructural". Ambas constituyen el K de reserva o de reposición de los suelos (Conti, 2000).

En suelos donde predominan las arcillas de los tipos illita y vermiculita el K agregado se desplaza desde la solución hacia el interior de los espacios interlaminares en las arcillas en donde estos pueden quedarse retenidos como ión K en los espacios de las capas de tetraedros. Este ión K no puede extraerse con AcONH_4 y pasa a formar parte del reservorio K no intercambiable que participa en un equilibrio muy lento con la solución del suelo (Rodríguez, citado por Vidal, 2003). Esta forma es la denominada como "K fijado" (no intercambiable).

En general la retención de K es mayor a medida que el suelo tiene más arcillas micáceas y la periferia poco o no meteorizada de las micas se encuentra menos saturada con este catión (Hobt 1978, Vidal 2003). González et al. (1999) obtuvieron resultados que resaltan la importancia de la saturación de K en el fenómeno de fijación - liberación. Ellos encontraron que la cantidad de K fijado por un suelo de baja saturación de K y mayor presencia de esmectitas fue mayor a la de otro con predominio de illita pero con elevada saturación del catión.

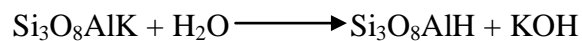
En un experimento con cebada, Chaminade, citado por Navarro y Navarro (2003), concluyó que la fertilización potásica muy anticipada a la siembra favorece una mayor fijación y por lo tanto a una menor disponibilidad, viéndose esto reflejado en la disminución del rendimiento para ese tratamiento con respecto a la fertilización poco antes de la siembra.

La relación que permite establecer el porcentaje del K agregado que es retenido (RK) en el reservorio no intercambiable es: $RK = [(K_i \text{ final} - K_i \text{ inicial}) / K \text{ agregado}] \times 100$ (Vidal, 2003).

El K estructural, es el que está químicamente combinado con los elementos en la estructura de los minerales del suelo y al igual que el K fijado no está disponible para las plantas en el corto plazo (Conti, 2000).

Existe un equilibrio entre el K intercambiable y estas formas no intercambiables, siendo este proceso mucho más lento que el equilibrio de K de la solución del suelo y K intercambiable (Conti, 2000).

Con el tiempo, y debido a la acción de diversos procesos (hidrólisis, acidificación, disolución, etc.) los minerales que contienen K pueden sufrir gradualmente una degradación para así pasar a la forma disponible para las plantas (Navarro y Navarro, 2003). Un ejemplo de disolución es el siguiente:



La fuente inmediata de K para las plantas es el que está disuelto en la solución del suelo y la reposición que mantiene su nivel estable es en primer lugar la forma intercambiable y luego el K no intercambiable (estructural y fijado).

El suministro a la planta durante un período determinado dependerá de la cantidad de K de cada fuente y de la velocidad con que se establece la reposición y el equilibrio entre las fuentes. La cantidad de K en la solución del suelo es siempre baja y la de K intercambiable mucho más abundante. Así, se restablece rápidamente la concentración en la solución (Conti, 2000). El K no intercambiable, es el encargado de mantener los niveles de K intercambiable en el mediano y largo plazo (Hernández, 1996).

Los minerales primarios que conforman esta forma son los feldespatos potásicos (ortosa y microclina) y las micas (muscovita, biotita y flogopita), mientras que dentro de los minerales secundarios, las illitas son el grupo principal (Casanova, 1996).

La liberación de K ocurre cuando pasa de una forma no intercambiable a otra que sí lo es y requiere procesos de meteorización que destruyan o abran la estructura de los minerales que contienen K (Vidal, 2003).

El ión K es un catión tan grande como el oxígeno que penetra justamente en los huecos hexagonales de los arreglos tetraédricos. Cuando la meteorización desprende fragmentos de la estructura de un feldespato potásico, se favorece la liberación de este elemento (Thompson y Troech, citados por Vidal, 2003).

El K se libera con más facilidad de las partículas minerales comprendidas en el tamaño de las arcillas, como la biotita, pero la provisión de tales partículas se agota rápidamente. La tasa de liberación se hace más lenta conforme el suelo envejece, porque el K, lo mismo que otros nutrientes, se encuentra en partículas cada vez de mayor tamaño o en minerales más resistentes (Vidal, 2003).

2.2.2 Entradas de K al suelo

Las entradas de K al suelo son a través de la fertilización o del reciclaje de los restos de cultivos. Estos últimos se mineralizan y se incorporan al suelo bajo alguna de las formas en que el K se presenta en el mismo (solución, intercambiable, no intercambiable). La importancia del reciclaje de K es debida a la ubicación preferencial del K en tallos y hojas de las plantas (Conti, 2000).

Los aportes realizados por las lluvias se producen a través del K que el polvo atmosférico trae en suspensión, siendo este aporte de poca importancia cuantitativa (Conti, 2000).

2.2.2.1 Fertilización

En la Guía para la fertilización de cultivos (Oudri et al., 1976) se presentan algunos valores de K intercambiable, que se mencionan como de referencia, justificando que los experimentos no habían tenido respuesta. Esos valores son $0,15 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, al cual se lo consideró como valor bajo, entre $0,15$ a $0,30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ como rango medio y $0,30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ como valor alto, sin distinguir entre cultivos y tipos de suelos.

Bautes et al. (2009), en ensayos de respuesta a la fertilización con K en cultivos de invierno y verano encontraron que ésta se dio tanto en rendimiento en grano, así como en parámetros de calidad y en K removido en suelos que presentaban valores entre 0.18 a $0.37 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de K intercambiable.

En algunos países, además del K intercambiable en las muestras extraídas a la profundidad recomendada para el muestreo de suelos, se tiene en cuenta el nivel de K en el subsuelo. En el Cuadro 2 se presentan los valores críticos y el nivel de K en el subsuelo para el estado Iowa, EE.UU.

Cuadro 2. Nivel relativo de K intercambiable extraído con acetato de amonio o Mehlich 3 según el nivel de K en el sub-suelo en el estado de Iowa.

Nivel relativo	Nivel en el sub-suelo	
	Alto	Bajo
	K int.	K int.
 cmol _c kg ⁻¹	
Muy bajo	0 - 0,22	0 - 0,17
Bajo	0,23 - 0,32	0,18 - 0,27
Óptimo	0,33 - 0,42	0,28 - 0,37
Alto	0,43 - 0,50	0,38 - 0,45
Muy alto	más de 0,50	más de 0,45

Fuente: adaptado de Sawyer et al. (2008).

Cuando hacemos recomendaciones de fertilización potásica a partir del resultado del análisis del suelo, suponemos que existe un equivalente fertilizante, definido como la cantidad de K₂O necesaria para aumentar la disponibilidad de K para las plantas en 0.1 cmol_c kg⁻¹ de suelo, cuyo valor teórico es 117 kg K₂O ha⁻¹, considerando una profundidad de suelo de 20 cm y asumiendo una densidad aparente de 1,25 g cc⁻¹.

Este valor de equivalente de K supone que el intercambio catiónico es instantáneo, que no hay fijación o liberación de K fijado del suelo, y que todo ocurre en los 20 cm de profundidad.

Almada (2006), en ensayos con maíz realizados en el departamento de Durazno, estimó que el equivalente fertilizante para K fue entre 125 y 143 kg K₂O ha⁻¹ para esos suelos, valores por encima del equivalente teórico presentado anteriormente.

Con el propósito de mejorar la fertilización con K, González et al. (2004) emplearon el índice de residualidad de Karpinets (B) además del uso del contenido de K intercambiable en distintos suelos, concluyendo que el uso conjunto de la determinación

de K intercambiable del suelo y del índice de residualidad B fue adecuado para estimar la cantidad de K agregada como fertilizante.

El índice de residualidad B determina la proporción del fertilizante agregado que se fija en sitios de alta especificidad, y la que pasa a ser parte del complejo de intercambio, K intercambiable. De esta manera, el coeficiente B puede ser usado como elemento de ajuste del método del acetato de amonio 1N pH 7, permitiendo mejorar y aumentar la eficiencia del cálculo de las dosis de fertilizante agregadas (Conti 2000, González et al. 2004). Su estimación se realiza de la siguiente manera:

$$B = (K_{i1} - K_{i2})/K_{i1}$$

siendo:

B = índice de K residual; K_{i1} = K intercambiable en la primera percolación; K_{i2} = K intercambiable en la segunda percolación.

Este método presupone que la fijación - liberación es una reacción reversible entre el K presente en el complejo de intercambio y el fijado en los espacios interlaminares de los minerales arcillosos. El valor B es una propiedad fija de los suelos dependiente de su naturaleza arcillosa (Conti, 2000).

El rango de variación del valor "B" se encuentra entre 0 (cuando $K_{i1} = K_{i2}$) y 1 (cuando $K_{i2} = 0$). En el primer caso (B cercano a 0) el suelo presenta alta fijación de K y un elevado poder regulador. En el segundo caso (B cercano a 1) el suelo tiene baja fijación de K y bajo poder regulador, lo que se asocia a que todo el K adicionado como fertilizante sea ubicado en forma intercambiable (Karpinets, citado por González et al., 2004).

2.2.3 Pérdidas de K del suelo

La salida de K de los suelos se produce a través de tres procesos: el de extracción que se produce con la cosecha de los cultivos, el de lixiviación y erosión de los suelos.

2.2.3.1 Extracción por los cultivos

Según Navarro y Navarro (2003) la cantidad de K extraída por los cultivos oscila entre 75 y 110 kg K₂O ha⁻¹, pudiendo existir “consumo de lujo” por parte de las plantas sin que éste provoque aumento en la cosecha. Los cuadros 3 y 4 presentan a modo orientativo, valores de extracción de K de las chacras según la situación productiva en la que se encuentren (cultivos y rendimientos).

Cuadro 3. Extracción de K según cultivo y rendimiento.

Cultivo	Rendimiento Mg ha⁻¹	Extracción kg ha⁻¹
Campo natural	2,5	32
Alfalfa (3 años)	15	322
Sorgo forrajero	10	208
Maíz silo	20	288
Maíz grano	10	33
Trigo grano	3	12
Trigo paja	3	80
Caña de azúcar	100	280
Papa	20	150

Fuente: adaptado de Hernández et al. (2010).

Cuadro 4. Extracción de K por cultivos cerealeros y oleaginosos en Argentina.

Cultivo	kg Mg⁻¹
Trigo	3,5 – 4
Cebada	5
Avena	3
Maíz	3,5 – 4
Sorgo	4
Girasol	5 – 6
Soja	16,8 – 19
Colza	28

Fuentes: adaptado de Casas y Cruzate (2009), Ciampitti y García (2009).

De acuerdo a esta información, los cultivos agrícolas extraen aproximadamente entre 9 y 60 kg K ha⁻¹ (10,8 y 72 kg K₂O ha⁻¹ respectivamente) dependiendo por supuesto de su rendimiento. De todos ellos, los que extraen las mayores cantidades son

los cultivos de soja, colza y maíz. La extracción se incrementa en las situaciones en que los cultivos son pastoreados, enfardados o ensilados, ya que se impide el reciclaje de nutrientes que contienen los rastrojos.

Morón y Quincke (2010), realizaron una comparación del contenido de K intercambiable a dos profundidades (0-7,5 y 7,5-15 cm) en 48 chacras del departamento de Soriano entre muestras de suelo de referencia o suelo imperturbado, en general ubicado bajo un alambrado viejo, y muestras de chacra. Observaron que para ambas profundidades, el contenido medio de K intercambiable fue un 40 % mayor en las muestras de referencia que en las chacras, evidenciando la extracción por los cultivos.

2.2.3.2 Lixiviación

Las pérdidas por lavado dependen del clima y de la naturaleza del suelo (Roldán et al., 2004).

Son los suelos netamente arenosos o los sujetos a inundación los que tienen pérdidas importantes a través del lavado (Hernández, 1992), siendo pequeñas en general en los suelos arcillosos (Munson y Nelson, citados por Bertsch y Thomas 1985, Navarro y Navarro 2003).

Las propiedades del suelo que explican la diferencia en la pérdida de K entre esos tipos de suelo son la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la saturación de K. El suelo arcilloso tiene una CIC mayor al arenoso y por lo tanto puede retener una cantidad mayor del ión (Sparks y Huang, 1985). El K que no es retenido permanece en la solución quedando propenso al lavado (Hernández 1992, Navarro y Navarro 2003). Casanova y Ferrando (2003) concluyeron luego de cuantificar con lisímetros las pérdidas de bases (entre ellas el K) de cinco suelos representativos de Uruguay, que dichas pérdidas serán más relevantes cuando los suelos presenten valores de CIC, pH y contenido de bases medios a bajos.

En suelos orgánicos de regiones con altas precipitaciones las pérdidas pueden ser relevantes a pesar de la elevada CIC, dado que la energía de retención de K es baja (Hernández, 1992). En climas lluviosos y suelos con poca capacidad de intercambio, las pérdidas de K agregado en fertilizantes pueden ser grandes, aunque en general, se fija en una capa de 1 a 90 cm de profundidad (Yúfera y Carrasco, citados por Roldán et al., 2004), pudiendo quedar disponible para sistemas radicales profundos (Conti, 2000).

Navarro y Navarro (2003) citan pérdidas de entre 20 y 25 kg K_2O ha^{-1} $año^{-1}$ para suelos de regiones húmedas moderadamente fertilizadas. Otros autores citan pérdidas de entre 5 y 250 kg K ha^{-1} $año^{-1}$, según sean las condiciones de contenido de K, de la intensidad de precipitación pluvial y de la cobertura vegetal (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Según Conti (2000), las pérdidas por lixiviación no son trascendentes ya que el K es un elemento poco móvil y es retenido por el complejo de intercambio. Esta autora cita pérdidas de entre 0,2 – 5 kg ha^{-1} $año^{-1}$ en texturas francas a arcillosas y de 3 – 20 kg ha^{-1} $año^{-1}$ en arenosas a franca-arenosa, dependiendo del cultivo, intensidad de la lluvia y evapotranspiración.

En cuanto a la facilidad de lavado, el K se encuentra en un lugar intermedio entre el NH_4 y el Ca, y semejante al Mg (Roldán et al., 2004).

2.2.3.3 Erosión

La erosión ocasiona la separación selectiva de las partículas finas de la capa superficial del suelo, que son las más importantes en suministrar K a las plantas (Navarro y Navarro, 2003).

Gaspari et al. (2006), estudiando la relación entre la erosión hídrica superficial y la distribución de la pérdida de Ca^{+2} , Mg^{+2} y K^{+} del suelo en la cuenca del río Arrecifes, concluyeron que este fenómeno provocaría importantes disminuciones en sus reservas en las posiciones topográficas más elevadas de la cuenca y el enriquecimiento de estos cationes en áreas de deposición. Conjuntamente con procesos antrópicos como la exportación de estos elementos por producción y otros naturales, como la percolación profunda, los procesos erosivos conducirían al empobrecimiento superficial de estos nutrientes, incidiendo negativamente en el potencial productivo de la región. La pérdida potencial máxima de K según estos autores y para esa región es de 2 kg ha^{-1} $año^{-1}$.

En EEUU, las pérdidas anuales en algunos suelos han sido de hasta 158 kg de K ha^{-1} $año^{-1}$ (Navarro y Navarro, 2003).

2.2.4 Capacidad reguladora

La modificación de los reservorios de K en el suelo antes descritos (K solución, K intercambiable y K no intercambiable), depende de la capacidad amortiguadora (buffer o tampón) de K del suelo (Rodríguez, citado por Aguado et al., 2002), que es el mecanismo de protección a los cambios bruscos del medio (Porta et al., citados por Aguado et al., 2002) y para el K, la capacidad amortiguadora (cK) está determinada por el tipo y cantidad de arcilla presente en el suelo (López, citado por Vidal 2003, Németh, citado por Montoya et al. 2007).

Después de cosechar un cultivo se espera que el K intercambiable en el suelo haya disminuido en una cantidad equivalente al K extraído por las plantas. Sin embargo para la mayoría de los suelos el contenido de K intercambiable después del cultivo es mayor que la diferencia entre el inicial y el extraído por la cosecha. La extracción de K intercambiable con NH_4OAc 1N, pH 7.0, se emplea para hacer recomendaciones de fertilización potásica en los cultivos agrícolas. En los casos en que las reservas edáficas son altas o desaturadas no se correlaciona con el rendimiento de los cultivos o con la absorción de K por las plantas (Martín y Sparks, Rodríguez y Galvis, citados por Montoya et al., 2007). Esto indica que los suelos tienen capacidad para suministrar K a las plantas de las formas no intercambiables y para reponer en parte el K intercambiable tomado por éstas (Olivera et al., Pope y Cheney, citados por Hernández et al. 1988, Roldán et al. 2004).

Este suministro de K no es más que una manifestación del “equilibrio del K” en el suelo. Cuando las plantas toman el elemento, disminuyen la concentración de las formas solubles e intercambiables, entonces algo del K presente en las formas no intercambiables debe desplazarse hacia las formas intercambiables o solubles (Roldán et al., 2004).

El valor de la cK (capacidad amortiguadora) puede utilizarse como un antecedente para la estimación del suministro de K del suelo, siendo un índice de la labilidad del K intercambiable ya que el equilibrio entre el K intercambiable y el K en la solución ocurre en forma casi instantánea (Rodríguez y Galvis, citados por Montoya et al., 2007). La cK caracteriza el equilibrio entre el K intercambiable y el K en la solución (Aguado et al., 2002), permitiéndonos conocer la dificultad o facilidad de aumentar la concentración de K disponible en el suelo a través de la fertilización (Rodríguez y Galviz, citados por Vidal, 2003).

Cuando las plantas absorben iones desde la solución o cuando se produce la pérdida de K por lixiviación, se espera que el suelo reponga a la solución lo que perdió (Conti 2000, Borges et al. 2005), mientras que cuando se fertiliza o se libera K de los restos de los cultivos, los iones agregados no permanecen en forma soluble, sino que son retenidos por los suelos, adsorbidos en la superficie de las partículas. Estas reacciones de adsorción ocurren más rápidamente cuanto menor es el contenido de nutrientes en el suelo. En la medida que las partículas se saturan van a mantener niveles más altos de nutrientes en solución y esto provoca que el aumento de concentración en la solución del suelo será mayor cuanto mayor sea la cantidad agregada (Conti, 2000).

El fenómeno de intercambio catiónico presenta una gran importancia desde el punto de vista agronómico dado que le da al suelo capacidad buffer con respecto a los cambios en la composición catiónica de la solución, asegurando de esa forma la nutrición catiónica de las plantas (Durán, 2004).

En general, cuanto mayor sea el contenido de arcilla en el suelo más grande será su capacidad para adsorber el K y mayor será su habilidad para reponerlo a la solución de suelo cuando éste disminuye en su concentración (Conti, 2000). También, en general, una capacidad buffer elevada indica que el nutriente está fuertemente retenido y absorbido en la fase sólida con sólo una pequeña proporción en la disolución y por tanto, tiene una movilidad baja. Inversamente, una capacidad buffer baja indica que la mayor parte del nutriente está en disolución y tiene una movilidad elevada (Madrid y García, 1984).

La diferencia entre un suelo bien regulado y otro pobremente regulado, puede ser descrita por la "relación Q/I" (relación capacidad/intensidad) (Beckett, citado por Conti, 2000) y su forma es característica de cada suelo. La Figura 2 muestra la representación típica de la capacidad de regulación de un suelo, "relación Q/I", con sus parámetros relacionados, donde:

AR^K es la relación de actividad en equilibrio, cuando el suelo no gana ni pierde K. Representa la intensidad del K lábil en el suelo y constituye la medida de su disponibilidad inmediata.

PBC^K es la capacidad de regulación potencial del suelo. Representa la cantidad de K intercambiable que puede pasar a la solución del suelo para equilibrarla. Está representada por la pendiente de la recta.

ΔK_L representa la cantidad total de K intercambiable incluyendo, las fracciones lábiles fácilmente intercambiables y las posiciones más específicas como la de los bordes de las partículas de arcillas, (ΔK^0) y (ΔK_x), respectivamente.

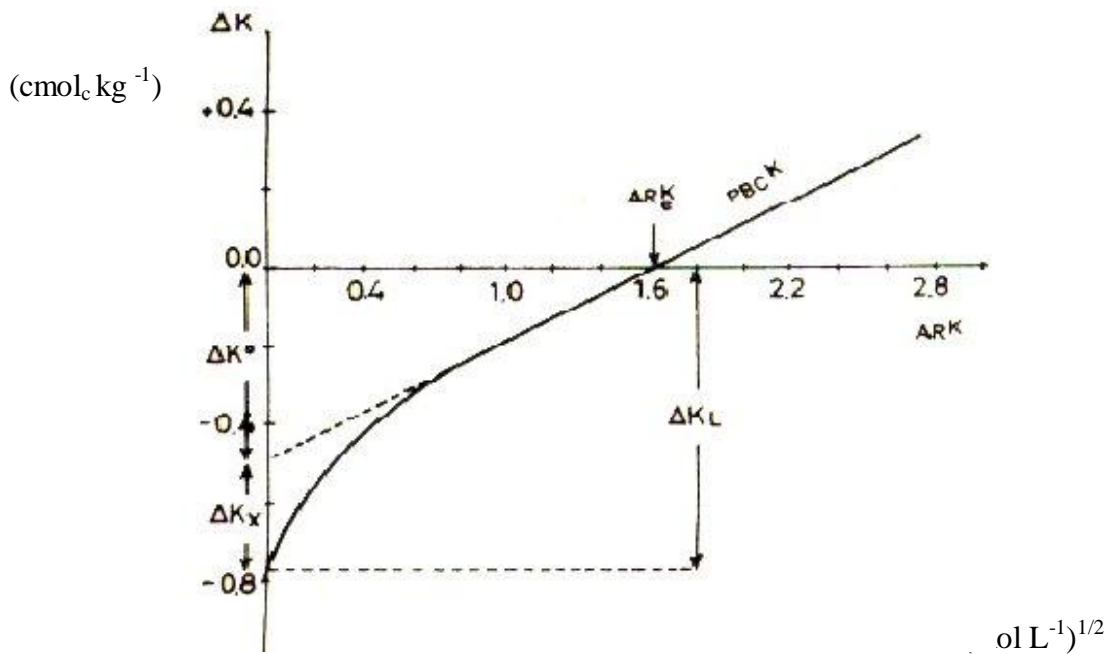


Figura 2. Forma general de la relación Q/I y parámetros deducidos de ella. Fuente: Conti (2000).

2.2.5 Cantidad y tipos de arcilla como factores determinantes de la capacidad amortiguadora de los suelos

El porcentaje de arcilla y el tipo de mineral arcilloso predominante en cada suelo, determinan la afinidad con la cual la arcilla retiene a los cationes y por consiguiente el desplazamiento del equilibrio K en solución - K intercambiable (Hipp y Thomas, citados por Hernández et al. 1988, Aguado et al. 2002).

En general, cuanto mayor sea el contenido de arcilla en el suelo más grande será su capacidad para adsorber el K (Mengel y Aksoy, citados por Hernández 1983, Conti 2000) y mayor será su habilidad para reponerlo a la solución de suelo cuando éste disminuye en su concentración. Se dice que tales suelos están bien regulados, pudiendo mantener la concentración de K de la solución de suelo en un nivel estable (González et al. 1999, Conti 2000).

Del análisis de regresión entre las fracciones granulométricas y las diferentes fracciones de K en el suelo, Hernández et al. (1988) encontraron cierto grado de relación solamente entre el porcentaje de arcilla de los suelos y las fracciones K total ($r = 0,6$; $P > 0,03$) y K intercambiable ($r = 0,56$; $P > 0,045$), mientras que cuando analizaron la relación entre las diferentes fracciones químicas de K y el porcentaje de minerales arcillosos tipo mica (illita) las correlaciones fueron significativas para K total ($r = 0,64$; $P > 0,047$) y para K no intercambiable ($r = 0,69$; $P > 0,025$). Con esta información concluyeron que el K intercambiable está fuertemente influido por el porcentaje de arcilla, y que el K no intercambiable lo está por el tipo de mineral arcilloso.

Los iones K ocupan distintas posiciones en las arcillas (Figura 3). Pueden ser mantenidos electrostáticamente por las cargas eléctricas negativas situadas en la superficie o en los bordes de las láminas. La fuerza con que los iones K son mantenidos varía con el tipo de arcilla y la posición del ión en la misma. Las posiciones planares de cambio (p) no son lugares de enlace específico para K, las posiciones de borde (e) son más selectivas mientras que las interlaminares (i) presentan la mayor selectividad para este catión (Hobt 1978, Conti 2000).

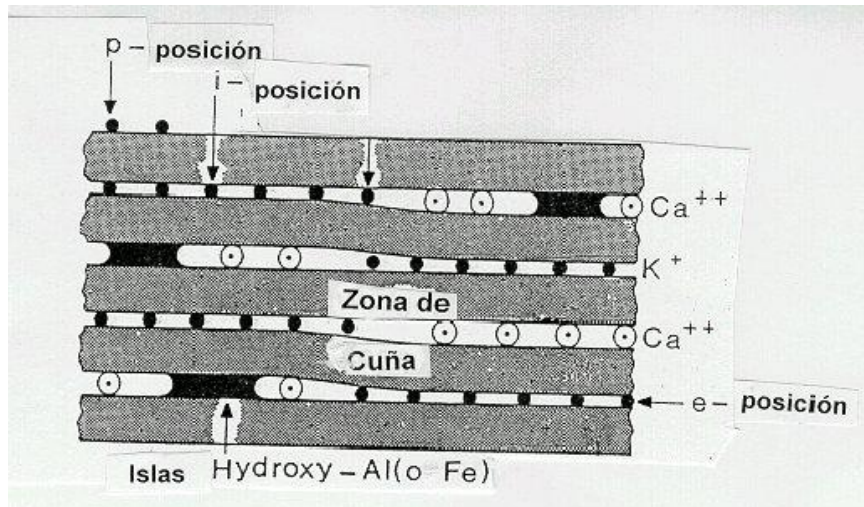


Figura 3. Modelo de arcilla expansible con las posiciones p, e, i de iones potasio. Fuente: Rich, citado por Conti (2000).

Cuanto más débilmente estén retenidos, más fácilmente serán "intercambiables" y podrán ser liberados a la solución de suelo. La dinámica de las condiciones en el suelo puede provocar que los iones K que están mantenidos fuertemente entre las capas de arcilla (fijado) se liberen al separarse las mismas por ensanchamiento y expansión. De esta

manera, estos K pueden ser liberados y equilibrar a los intercambiables y a los de la solución del suelo. También puede pasar que al penetrar los iones K en el espacio interlaminar, este cierre nuevamente las laminillas, dejando así los iones en una condición difícilmente accesible, el K fijado (Conti, 2000). Las arcillas de tipo 2:1 son las más importantes en el proceso de fijación, observándose que se ordenan en forma decreciente las vermiculitas > illitas > esmectitas (Zubillaga, Conti, citados por González et al., 1999).

Existen muchos tipos diferentes de arcillas, pero en general pueden definirse cuatro grupos que muestran diferencias importantes con respecto al K (Conti, 2000).

2.2.5.1 Grupo de la Caolinita

Son arcillas del tipo 1:1, formadas por una capa de tetraedros de oxígeno y sílice y otra de octaedros de oxidrilo y aluminio, unidas al compartir los oxígenos apicales de la lámina tetraédrica (Porta et al. 2003, Vidal 2003, Durán 2004, Figura 4).

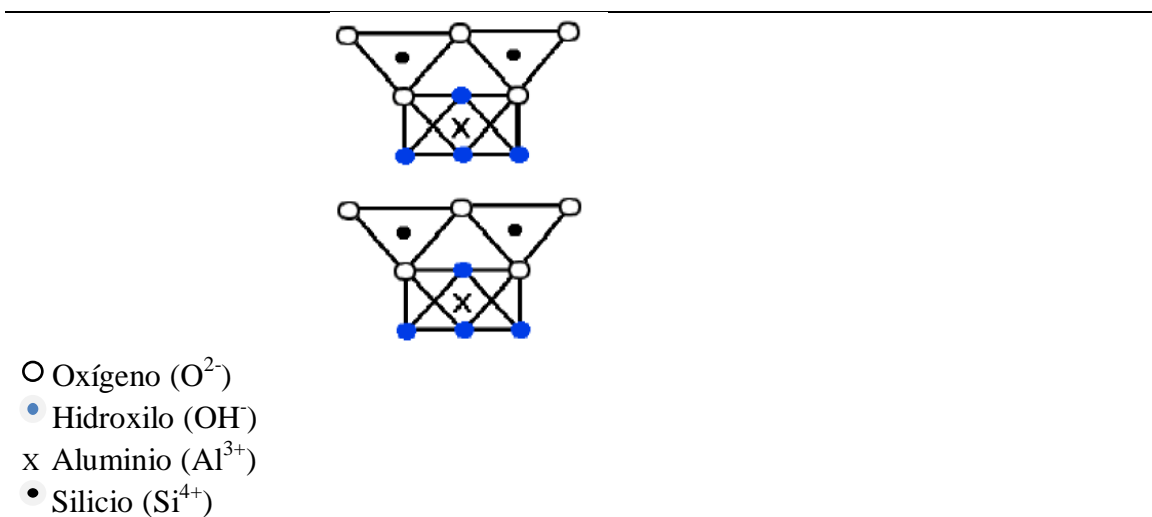


Figura 4. Estructura atómica y cristalina de la Caolinita. Fuente: adaptado de Olguín (2004).

Las capas estructurales sucesivas se unen energéticamente mediante puentes de hidrógeno desarrollados entre los oxígenos basales de la lámina tetraédrica y los oxidrilos de la lámina octaédrica, dejando un espaciado basal característico de 0,7 nm (Conti 2000, Porta et al. 2003, Durán 2004).

El tamaño de estas arcillas varía entre 0.5 a 2 micras y poseen una CIC de 3 a 15 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, predominando las cargas en las roturas de los bordes de las láminas (Vidal 2003, Durán 2004), debidas a la disociación de grupos tetraédricos en condiciones básicas (Porta et al., 2003). En medio ácido, la protonación de grupos octaédricos hace que la caolinita presente carga positiva, haciéndola una importante fuente de capacidad de intercambio aniónico (Porta et al., 2003).

Estas arcillas no son expandibles y pueden adsorber K con poca fuerza tanto en su superficie como en sus bordes rotos o quebrados. Estos minerales no tienen posiciones de cambio interlaminares para absorber K y además tienen una reducida capacidad de intercambio catiónico determinando un bajo contenido de K intercambiable (Conti, 2000). Su superficie específica es menor de $40 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Porta et al., 2003). No contienen K no intercambiable y por ello se comportan casi como la arena o la materia orgánica en lo referente a la dinámica de este nutriente (Hobt, 1978). En este sentido, los suelos caoliniticos carecen de poder de reposición de K y son sensibles a la lixiviación de este elemento (Conti, 2000).

En suelos con predominio de este mineral, se espera que la proporción de K en la solución en relación al presente en la fase intercambiable sea alta (Hernández, 1983).

2.2.5.2 Grupo de la Illita

Los minerales illíticos poseen una estructura trilaminar, tipo 2:1 y son las arcillas con mayor contenido de K (Conti 2000, Figura 5). En los tetraedros, el silicio puede ser remplazado por aluminio y las cargas negativas generadas por la sustitución isomórfica se satisfacen con iones de K que ocupan los espacios hexagonales de las láminas contiguas de tetraedros manteniéndolas unidas fuertemente (Conti 2000, Porta et al. 2003, Durán 2004).

El K es retenido en estas arcillas debido a que la sustitución isomórfica ocurre muy cerca de la superficie (Núñez, citado por Vidal, 2003). Además, por su tamaño y su baja carga no se solvata y se ajusta muy bien al tamaño de intercapa ocupando las cavidades que se forman entre tetraedros opuestos (Rich y Black, citados por Hernández 1983, Durán 2004).

Estas arcillas no se expanden al humedecerse, tienen una CIC de 10 a 40 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, un tamaño de 0.1 a 0.3 micras y un espacio basal de 1,0 nm (Porta et al. 2003,

Vidal 2003, Durán 2004). Contienen K en su superficie, en sus bordes, y entre las capas de los cristales y mantienen el K mucho más fuertemente que las arcillas caoliníticas, conteniendo gran proporción en forma intercambiable (Conti, 2000).

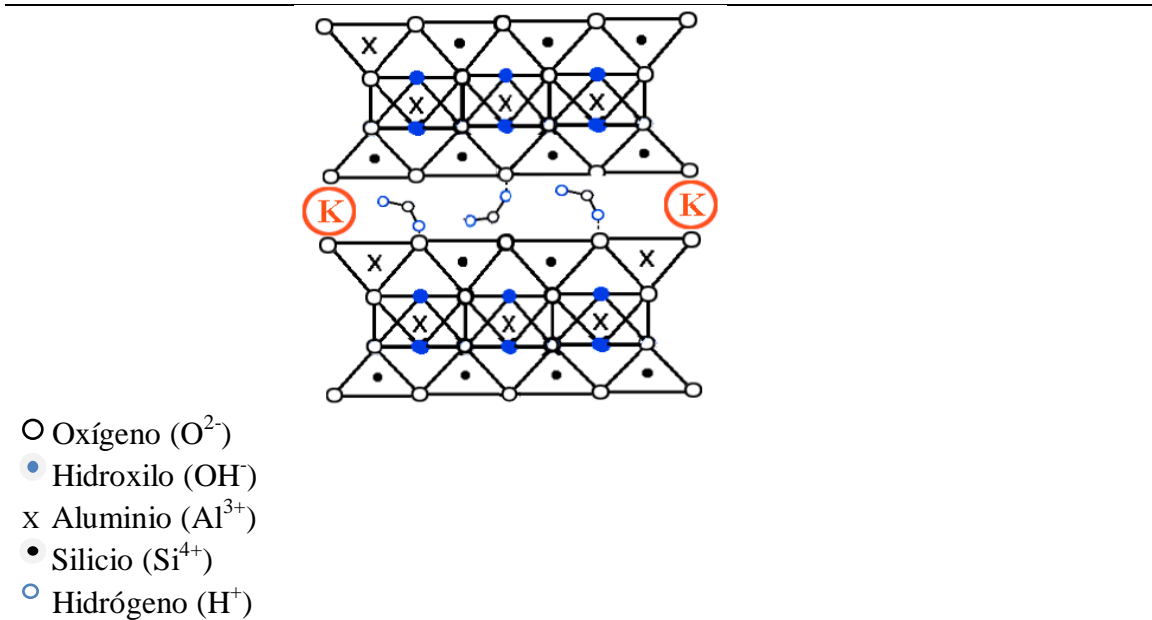


Figura 5. Estructura atómica y cristalina de la Illita. Fuente: adaptado de Olguín (2004).

El potasio interlamilar fijado, irá siendo liberado a causa de la meteorización y ha sido comprobado por Norrish y Pickering, citados por Porta et al. (2003) que las micas de grano muy fino liberan su K más lentamente que las de grano grueso.

2.2.5.3 Grupo de las Esmectitas

Las esmectitas son minerales trilaminares de tipo 2:1 y poseen la capacidad de expandirse al adsorber agua y moléculas orgánicas en la intercapa (Conti 2000, Durán 2004, Figura 6). En su estructura se asemejan a las micas, pero el menor número de sustituciones isomórficas lleva a que la carga eléctrica de superficie sea menor. Los complejos de superficie con cationes hidratados son denominados de esfera externa, haciendo a los cationes fácilmente intercambiables (Porta et al., 2003).

Dentro de este grupo existen especies minerales dioctaédricas y trioctaédricas. La especie de mayor ocurrencia en los suelos del Uruguay es de tipo dioctaédrico y se denomina Montmorillonita (Durán, 2004). Este grupo mantiene el K en forma

intercambiable en superficie y también profundamente entre las capas expansibles cuando el suelo está húmedo. Cuando las capas se cierran al secarse el suelo, el espacio intercapas se contrae atrapando y "fijando" el K que es dificultosamente liberado nuevamente a la solución del suelo (Conti, 2000).

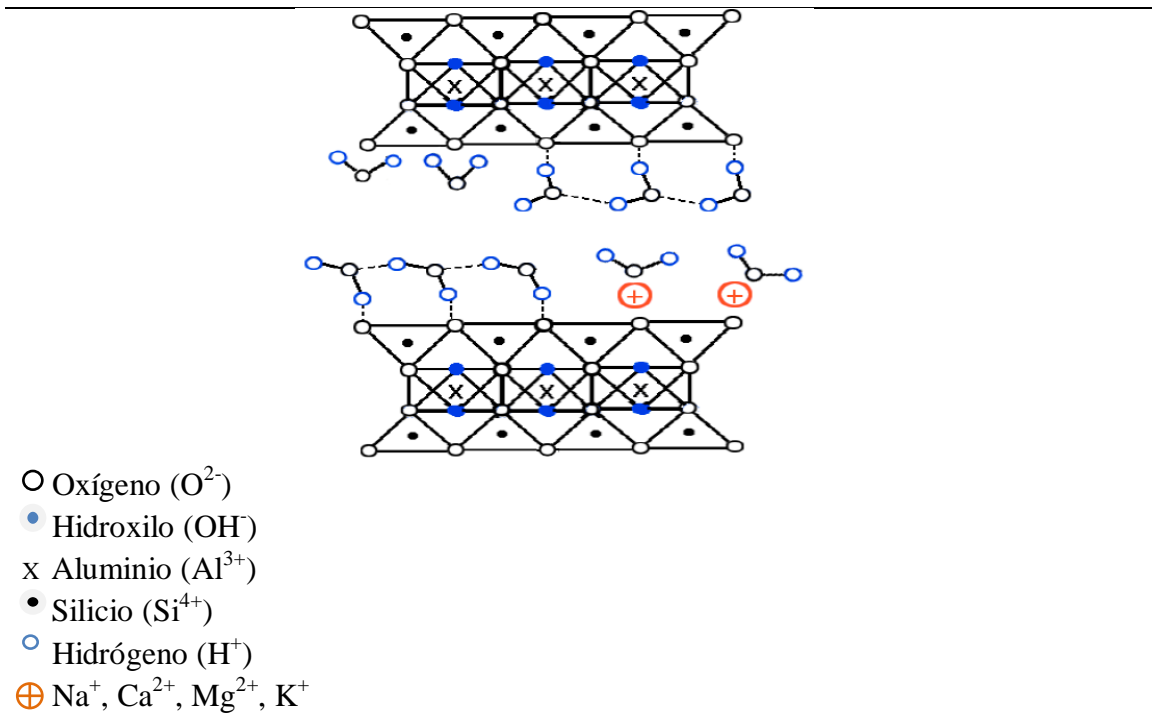


Figura 6. Estructura atómica y cristalina de la Montmorillonita. Fuente: adaptado de Olgún (2004).

La capacidad de intercambio catiónico de la Montmorillonita es de 80 – 150 $cmol_c\ kg^{-1}$ (Porta et al. 2003, Durán 2004). Por ello es de esperar en suelos donde predomine este tipo de arcilla que la proporción de K en la solución sea extremadamente baja con respecto al K intercambiable (Hernández, 1983).

La mayoría de los suelos de pradera contienen principalmente estos minerales arcillosos y sus proporciones indican el comportamiento del suelo con respecto al K (Conti, 2000).

2.2.5.4 Minerales arcillosos no cristalinos o paracristalinos

Los minerales arcillosos no cristalinos o paracristalinos, como el Alófono, se presentan en suelos derivados de cenizas volcánicas. Su CIC es elevada y depende del pH por tener carga variable (Porta et al., 2003). Generalmente presentan muy bajo contenido de K y no son importantes como fijadores de este elemento (Conti, 2000). Generalmente están saturadas con Ca y Mg (Hernández, 1983).

2.2.5.5 Efectos del tipo de arcilla sobre la dinámica del K en el suelo

De acuerdo a las características de las arcillas descritas anteriormente, se espera que suelos con un elevado contenido de Montmorillonita presenten una baja proporción de K en la solución respecto al presente en forma intercambiable, mientras que en suelos con predominio de Caolinita la proporción de K en la solución será mayor respecto al presente en forma intercambiable. Entre ambas situaciones se encuentran los suelos con predominio de Illita.

Dependiendo del grado de saturación o de agotamiento de K, los minerales arcillosos lo liberarán hacia la solución del suelo o lo adsorberán de ésta (González et al. 1999, Conti 2000). Una adecuada concentración de K en la solución del suelo solo es lograda cuando las posiciones que seleccionan K hayan sido saturadas con K (Hobt, 1978), teniendo en cuenta que algunos minerales arcillosos trilaminares como Illita, Vermiculita y tetralaminares como Clorita, adsorben K selectivamente (Hobt, 1978). La Montmorillonita presenta una selectividad intermedia, menor que la Illita pero mayor a la Caolinita (Conti, 2000).

Suelos con mineralogía de tipo mica (Illita) suministran en forma más sostenida K en el tiempo y presentan bajos porcentajes de utilización al agregar K al suelo como consecuencia de una alta reposición a partir de formas no intercambiables y/o altos mecanismos de retención. Ocurre lo contrario cuando el predominio es de minerales de tipo montmorillonítico o caolinítico, donde el suministro de K del suelo a medida que un cultivo lo extrae disminuye y la eficiencia del agregado de K al suelo es mayor (Hernández et al., 1988).

2.2.6 Otros factores que influyen en el equilibrio de las fracciones de K en el suelo

Además de los factores descriptos anteriormente, el equilibrio de las distintas fracciones de K en los suelos es afectado por otros, como la presencia de otros nutrientes, la materia orgánica, la humedad del suelo, etc.

2.2.6.1 Interacción del K con otros nutrientes

Los iones HN_4^+ e H^+ pueden competir con el K por sitios selectivos para el mismo, como son los sitios tipo cuña (Rich y Black, citados por Hernández 1983, Figura 3). En cuanto a la competencia entre K^+ e H^+ o H_3O^+ , ésta puede darse sobre todo en condiciones ácidas (Hernández, 1983).

Welch y Scott, citados por Usherwood (1978), estudiaron el efecto del amonio en la absorción de K no intercambiable por el maíz, observando reducción en la absorción de esta forma. Dicha reducción se atribuyó a la acción del amonio en la prevención de la liberación de K ubicado entre las capas de las arcillas, siendo esta reducción mayor si se agregan K y HN_4^+ juntos.

Cationes como Ca y Mg, de alto radio iónico hidratado, no competirán por los sitios tipo cuña, pero pueden tener relevancia como consecuencia del efecto del H_3O^+ en las estructuras de los minerales, en las cuales tienden a separar las láminas (Hernández, 1983).

Minotti et al., citados por Usherwood (1978), encontraron que la deficiencia de Ca en plantas de trigo redujo la absorción de K. Los excesos de K reducen la absorción de Ca y Mg, mientras que por el contrario, el Ca favorece la absorción de K (del Pino 1997, Havlin, citado por Vidal 2003). Cuando la relación entre K/Mg expresada en cmolc kg^{-1} es de 1,5/1 podría utilizarse para recomendar la fertilización magnésica en algunos cultivos (Vázquez, 2007).

Como el Ca es más fácilmente reemplazado que el hidrógeno, al añadir un fertilizante potásico soluble los iones K^+ sustituirán parte del Ca^{+2} en el coloide. Por tanto, cuanto mayor sea el grado de saturación de Ca, mayor será la adsorción al coloide del K de la solución del suelo (Navarro y Navarro, 2003).

Con respecto a la interacción con el Na, este elemento puede sustituir parcialmente al K en algunas plantas, especialmente si el K está en concentraciones menores al óptimo (Havlin, citado por Vidal, 2003).

Para analizar el K en el suelo, hay diferentes métodos que son utilizados en distintas partes del mundo. Un método muy utilizado en Israel, está basado en la relación de cationes en la solución del suelo. Este método enfatiza la importancia de medir la disponibilidad de K más que su cantidad. La disponibilidad es medida de acuerdo con un método sugerido por Woodruff y ha probado en numerosos estudios, estar mucho más correlacionado con las respuestas de los cultivos en suelos no ácidos. La disponibilidad se determina calculando la “energía libre de intercambio” de K con Ca y Mg de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\Delta F = R \times T \times \ln (K / \sqrt{Ca + Mg})$$

siendo:

ΔF = Energía Libre en Cal/mol.

R = Constante de los gases.

T = temperatura absoluta.

ln = log. Natural.

La ventaja hallada en este método es que da buena correlación en un amplio rango de suelos (no ácidos). La desventaja es que no da ninguna idea acerca de la cantidad que está disponible en el momento de la determinación. Por esta razón, este método es más adecuado para suelos con un alto nivel de capacidad mientras que en aquellos con baja capacidad, se requiere un análisis complementario que indicará la cantidad disponible, en adición a la disponibilidad (Roldán et al., 2004).

2.2.6.2 pH

El pH afecta la solubilización, disponibilidad y absorción de los nutrientes. El valor óptimo se encuentra entre 6 y 6.5, por lo que los suelos con pH mayor o menor que el óptimo pueden presentar problemas de disponibilidad de nutrientes (Borges et al., 2005).

El encalado de los suelos reduce las cantidades de K en la solución del suelo (Islam y Bolton, Peech y Bradfield, Thomas y Hipp, citados por Hernández, 1983), ya que cuando un suelo ácido es encalado el Al intercambiable es precipitado bajo forma de hidróxidos, dejando libres sitios en los cuales el K puede entrar en competencia con el Ca por ellos y como consecuencia aumenta la retención de K por las arcillas (Thomas, Thomas y Hipp, citados por Hernández, 1983).

Németh y Grime, citados por Hernández (1983), comprobaron que la concentración de K en la solución se incrementó con el descenso del pH a causa de la competencia ejercida por el Al sobre el K por los sitios de adsorción.

Según Pratt et al., citados por Hernández (1983), afirmaron que al aumentar el pH se incrementa la liberación de K de las formas no intercambiables, siendo mayor la liberación si el catión intercambiable es Ca que si es H. Los suelos saturados con Al liberan menos K que si estuvieran saturados con H.

Otros autores (York, Bradfield y Peech, Kaila, Singh, citados por Hernández, 1983) observaron lo contrario, ya que al encalar un suelo el K agregado que fue fijado fue mayor al que fijo el suelo sin encalado.

Bertsch, citado por Borges (2005), señaló que la aplicación intensiva de fertilizantes nitrogenados, como sulfato de amonio y nitrato de amonio, genera acidez residual a través de la formación disociada de H_2SO_4 y HNO_3 , repercutiendo en la disponibilidad de K.

2.2.6.3 Humedad

Existen resultados contradictorios en la literatura con respecto a la influencia de la humedad en el equilibrio entre las diferentes fracciones de K.

Cuando un suelo se humedece, la concentración de iones en la solución disminuye por efecto de dilución (Wiklander, Thomas y Hipp, citados por Hernández, 1983). Contrariamente, al secarse, la concentración de Ca, Mg y K aumentan, pero el aumento en la de los dos primeros es más rápida a la de K provocando un descenso en la relación $K/Ca+Mg$, la cual se relaciona a la misma relación en la planta (Moss, Thomas y Hipp, citados por Hernández, 1983).

El contenido de K intercambiable también está afectado por el contenido de humedad. En términos generales, el secado de un suelo suele aumentar el contenido de K intercambiable (Black, citado por Hernández, 1983).

La retención en suelos con predominio dentro de la fracción arcilla de Illita y Vermiculita será tanto en húmedo como en seco, mientras en suelos con predominio de esmectitas o de composición mixta, la retención solo se produce en seco (Vidal, 2003). Arifin y Tan, citados por Ruiz y Sadzawka (1986) afirman que solo la Illita es capaz de fijar el K bajo condición húmeda y que en condiciones de alternancia de humidificación y desecación, la Montmorillonita sería capaz de fijar el K.

Según Rich, citado por Hernández (1983), las micas fijan K en condiciones húmedas más que en secas, y las montmorillonitas sólo fijan K bajo condiciones húmedas y en pequeñas cantidades (salvo que la densidad de carga sea alta). La hidratación de las illitas provoca la liberación de K (Mumbrum y Hoover, citados por Hernández, 1983).

2.2.6.4 Materia orgánica e hidróxidos

Según Kaila, citado por Hernández (1983), la presencia de cierto tipo de materia orgánica y de hidróxidos de Al o Fe pueden bloquear la entrada de K a la intercapa. Varios autores afirmaron que al eliminar la materia orgánica aumentó la fijación de K por el suelo (Kuntze y Leisen, Ross, Zolotarev y Boktor, Hudcová, citados por Hernández, 1983).

Varias experiencias han demostrado que las sustancias húmicas contienen cantidades relativamente grandes por unidad de peso de grupos funcionales (CO_2H , OH fenólicos y C=O), que son capaces de atacar y degradar los minerales del suelo, formando complejos y disolviendo sus metales componentes, transportándolos luego a través del perfil en las aguas de drenaje (Schnitzer y Skinner, Baker, Schnitzer y Kodama, Babcock, Schnitzer y Hansen, citados por Mejía, 1978).

Especialmente activos por este aspecto son los ácidos fúlvicos, sustancias de peso molecular relativamente bajo, y cuyas soluciones acuosas son capaces de atacar minerales como la clorita (Kodama y Schnitzer, citados por Mejía, 1978) y las micas (Schnitzer y Kodama, citados por Mejía, 1978), solubilizando cantidades sustanciales de sus cationes componentes. Estos elementos, y entre ellos el K, al volverse móviles en los suelos, quedan al alcance de las raíces y microorganismos, intervienen en los procesos pedogenéticos, y participan en la síntesis de nuevos minerales (Schnitzer y Kodama, citados por Mejía, 1978).

2.3 CONTENIDO DE POTASIO EN SUELOS DE URUGUAY

Según Hernández et al. (1988), luego de caracterizar 13 suelos formados sobre materiales formadores con diferente composición mineralógica, el contenido de K total en ellos varió desde 0,06 a 0,69 %, con una media de 0,27%. La fracción K no intercambiable osciló entre 0,13 y 3,35 cmol_c kg⁻¹, la intercambiable entre 0,11 y 1,5 cmol_c kg⁻¹ mientras que el contenido de K en solución se situó entre 0,038 y 0,0311 cmol_c kg⁻¹ (Cuadro 5).

Cuadro 5. Contenido de K en las fracciones químicas, mineralogía de la fracción arcilla y material madre de trece suelos de Uruguay.

Suelo	US*	K total %	K total	K no int. cmol _c kg ⁻¹	K int. kg ⁻¹	K sol.	K sol/K int %	Ac. dom.	Material madre
Brunosol	CP	0,06	1,47	0,13	0,11	0,004	3,40	M	Cuaternario
Vertisol	I-TA	0,18	4,54	0,52	0,36	0,006	1,66	M	Cuat. s/Basalto
Argisol	Ve	0,13	2,26	0,30	0,14	0,023	16,56	M-C	Cuat. s/BC
Planosol	RB	0,19	4,32	0,27	0,13	0,008	6,35	M	Fm Dolores
Acrisol	Rv	0,11	2,69	0,25	0,35	0,019	5,53	C	Fm Tbó.
Acrisol	Ta	0,08	2,11	0,22	0,16	0,031	19,41	C	Fm Tbó.
Argisol	Al	0,07	1,85	0,21	0,39	0,016	4,12	M	Cretácico
Brunosol	Yg	0,42	10,74	1,55	0,57	0,010	1,68	M-I	Fm FB
Vertisol	LC	0,24	5,20	0,76	0,28	0,009	3,25	M	Cuat. s/BC
Argisol	St	0,06	1,60	0,29	0,19	0,005	2,45	M-C	Fm Salto
Brunosol	To	0,60	15,35	2,19	0,89	0,018	2,02	I	Fm Libertad
Brunosol	SG-G	0,63	15,99	3,35	0,45	0,009	1,94	I	Cristalino
Brunosol	Bq	0,69	17,58	2,50	1,50	0,013	0,88	M	Fm FB

Fuente: adaptado de Hernández et al. (1988).

C: Caolinita **I:** Illita **M:** Montmorillonita

CP: Colonia Palma; **I-TA:** Itapebí-Tres Arboles; **Ve:** Vergara; **RB:** Río Branco; **Rv:** Rivera; **Ta:** Tacuarembó; **Al:** Algorta; **Yg:** Young; **LC:** La Carolina; **St:** Salto; **To:** Toledo; **SG-G:** San Gabriel- Guaycurú; **Bq:** Bequeló. **Ac. dom.:** arcilla dominante.

BC: Basamento Cristalino; **Cuat.:** Cuaternario; **Fm Tbó:** Formación Tacuarembó; **Fm FB:** Formación Fray Bentos. ***US:** Unidad de Suelo, según la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (Altamirano et al., 1976).

De acuerdo a esta información, los materiales geológicos que dan origen a suelos con un contenido de medio a alto en K son los limos de la Formación Fray Bentos

(litoral oeste) y las lodolitas de la Formación Libertad (sur y suroeste), ambos materiales presentan un alto porcentaje de arcilla y minerales del tipo de las micas.

En una situación intermedia, se encuentran los suelos formados sobre el Basamento Cristalino (centro del país, granitos y gneises), con menor porcentaje de arcilla que los materiales mencionados anteriormente, y que contienen minerales tipo mica y feldespatos potásicos.

Suelos formados sobre areniscas de la Formación Tacuarembó (norte), sedimentos cretácicos y formación Salto (litoral oeste) presentan bajos contenidos de K, dado su bajo contenido de arcilla y ausencia o escasas de minerales portadores de K.

El primero de los materiales geológicos mencionados, la Formación Fray Bentos, es generadora de algunos de los suelos de mayor fertilidad del país, siendo éstos de textura media o fina, moderadamente profundos a profundos y moderadamente bien drenados (Durán y García, 2007). Se constituye de areniscas finas a muy finas, cuarzo feldespáticas (potásicos y plagioclasas) frecuentemente arcósicas y con una importante proporción de vidrio volcánico (Frenguelli, Ferrando et al., Bossi et al., citados por Durán y García, 2007).

La Formación Libertad, se constituye por una lodolita, generalmente con arena gruesa o gravas en suspensión, con presencia variable pero sistemática de CaCO_3 . Origina suelos profundos, de texturas finas, fertilidad alta y moderadamente bien drenados (Durán y García, 2007).

La región cristalina centro – sur posee dominancia de granitos, granodioritas y gneises, con gabros, anfibolitas y hornblenditas en menor proporción. Además comprende haces de diques básicos y las cinturas metamórficas que ocurren a lo largo del límite sur de la unidad. Estas rocas dan origen a suelos superficiales a profundos, de textura franca a franca arenosa, con o sin horizonte B de acumulación de arcillas, ácidos, de fertilidad baja o media y bien o excesivamente bien drenados (Durán y García, 2007).

Las areniscas del cretácico superior comprenden al llamado grupo Paysandú (Bossi et al., citados por Durán y García, 2007) y se compone de las formaciones Guichón, Mercedes y Asencio. Guichón y Asencio son de origen eólico, mientras que las areniscas gruesas y conglomerádicas de la Formación Mercedes son de origen fluvial. Todas estas areniscas generan suelos profundos o moderadamente profundos, de

textura liviana o media, fertilidad media a baja y bien drenados a moderadamente bien drenados (Durán y García, 2007).

La Formación Salto, comprende fangolitas gris verdosas en la base seguidas hacia los niveles superiores por areniscas cuarzosas finas a medias bastante bien redondeadas, y conglomerados silíceos con clastos desde redondeados hasta subangulares. Los colores son predominantemente rojizos y es común la presencia de niveles silicificados en las areniscas y de fragmentos de madera silicificada en los conglomerados. Origina suelos moderadamente profundos, franco arenosos o franco arcillo arenosos, a menudo gravillosos, de fertilidad baja o a veces media y bien a algo pobremente drenados (Durán y García, 2007).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ORÍGEN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO

Mediante solicitud a técnicos se obtuvieron muestras de 8 a 10 Kg tomados de la capa superficial (0 - 20 cm) de 36 suelos donde se desarrolla la producción agrícola extensiva (Figura 7). Solo 4 de ellos cuentan en su historia el agregado de K (sitios 27, 28, 29 y 31), y en general llevan más de 2 años de agricultura continua con siembra directa.

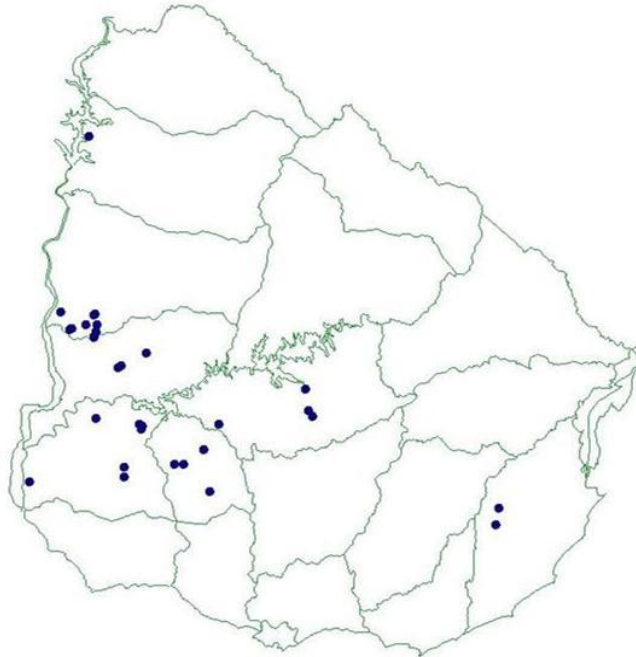


Figura 7. Ubicación de las muestras de suelos estudiadas.

De cada suelo se tomó una sub-muestra, se secaron en estufa a 40 °C por 2 días para ser luego molidas y caracterizadas (pH, materia orgánica, bases, capacidad de intercambio catiónico y textura), utilizándose para ello los siguientes métodos:

-pH: por el método potenciométrico, en una relación suelo-agua (o KCl) de 1:2,5 (Peech, 1965).

-Materia orgánica (%): oxidación del C orgánico sin aporte de calor exterior, por el método Walkley-Black (Jackson, 1970).

-Bases intercambiables ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$): las bases desplazadas por el acetato de amonio 1 N se recogieron en solución y se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica (Ca y Mg) y emisión (K y Na) (Isaac y Kerber, 1971).

-Potasio no intercambiable: extractado con ácido nítrico 1 N en ebullición y determinado por espectrofotometría de emisión.

-Capacidad de intercambio catiónico “efectiva” ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$): fue estimada a partir de la suma de bases y la acidez intercambiable a pH del suelo.

-Textura: el porcentaje de arcilla se determinó mediante el método de Bouyoucos (1936) luego de la destrucción de la materia orgánica, el porcentaje de arena por tamizado y el contenido de limo por diferencia entre 100 y la suma de los porcentajes de arcilla y arena.

-Acidez intercambiable: mediante desplazamiento con KCl 1M y posterior titulación con NaOH 0,05M.

Se identificó cada sitio con la Unidad de suelo correspondiente según la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (Altamirano et al., 1976) como también al grupo CONEAT al cual pertenece.

3.2 EXPERIMENTO

Las muestras de cada suelo con la humedad que poseían en el campo fueron desmenuzadas con un tamiz de 1 cm de abertura. Se extendió una fina capa de cada muestra sobre una bandeja y se agregó uniformemente la solución fertilizante correspondiente a cada tratamiento. Se colocaron aproximadamente 800 g de cada muestra-tratamiento en bandejas plásticas perforadas, agregándole el agua necesaria para que su humedad fuera próxima a la capacidad de campo.

Los dos tratamientos aplicados consistieron en el agregado de agua desionizada en el caso del tratamiento sin K, y de 13 mL por bandeja de una solución de concentración de 0.08 M de KCl, en el tratamiento con K. Cada tratamiento fue repetido 3 veces. Las dosis exactas de K según el contenido de humedad de cada suelo se presentan en el Anexo 1.

Fueron realizados dos muestreos en cada unidad experimental. El primero de ellos se realizó a los 30 días y fueron tomadas dos muestras a partir de las cuales se

determinaron los contenidos de K intercambiable en muestras secadas a 40 °C y humedad en muestras secadas a 105 °C. El segundo muestreo se llevó a cabo a los 60 días, repitiéndose la metodología llevada adelante en el primero.

La humedad de cada unidad experimental se mantuvo constante durante la duración del experimento.

3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico se usó el Programa SAS (SAS Institute, 1985). Los resultados se presentaron como el promedio de las 3 repeticiones. En todos los análisis se consideró una $P < 0.05$ como significativa. Se realizó el análisis de varianza y se realizaron contrastes para establecer la diferencia entre medias para el contenido K intercambiable en cada muestreo, considerando un diseño de parcelas al azar.

Se realizaron análisis de correlación y de regresión entre los datos analíticos de K (intercambiable y no intercambiable), % de arena, % de limo, % de arcilla, pH en agua, % de materia orgánica, bases (Ca, Mg, K y Na), bases totales, capacidad de intercambio catiónico (CIC), saturación en bases, acidez intercambiable y % de saturación de K en la CIC, como también entre todas éstas variables y las estimaciones de equivalente fertilizante para K en los 36 suelos estudiados.

El equivalente fertilizante se calculó a partir de las ecuaciones de regresión estimadas para cada suelo y para cada muestreo según las dosis de K aplicadas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

Los Cuadros 6 y 7 resumen los resultados de la caracterización de los suelos estudiados. Los Anexos 2, 3, 4 y 5 presentan los datos originales del experimento en cuanto al contenido de potasio intercambiable para los tratamientos y sus repeticiones medidos al inicio del experimento, a los 30 días y posteriormente a los 60 días.

4.1.1 Textura

En general, los suelos incluidos en este estudio presentan texturas francas y franco arcillosas, aunque también algunos se clasifican como franco arcillo limosos, franco arcillo arenosos, franco limosos y franco arenosos. Los porcentajes de arcilla variaron desde 10 a 33 %, siendo inferior a 20% solo en 5 de los suelos estudiados. El coeficiente de variación para el conjunto es de 21 %, siendo la fracción mineral de menor variabilidad. Los contenidos más bajos correspondieron a suelos situados en las Unidades José Pedro Varela y Cuchilla del Corralito, mientras que los más elevados a suelos ubicados en las Unidades Alférez, Bequeló, San Manuel y Young.

La fracción limo presentó una variabilidad intermedia en su contenido respecto a la arena y la arcilla, siendo del 28 %. Solamente 6 sitios presentaron un contenido inferior al 30 %, siendo el rango de 17 a 58 %. Los suelos formados a partir de areniscas cretácicas o próximos a éstas (transicionales) fueron los que presentaron los contenidos más bajos de esta fracción, sitios ubicados en las Unidades Carpintería, Cuchilla del Corralito, Paso Palmar y Young.

Los suelos formados a partir de areniscas cretácicas son los que presentaron en promedio un mayor porcentaje de arena, variando desde 44 a 66 %, correspondiéndose a sitios ubicados en las Unidades Cuchilla del Corralito, Paso Palmar y Carpintería. También los sitios provenientes de las Unidades Bellaco, Constitución y Young (transicional) presentaron elevado contenido. El rango de contenido en general es desde 14 a 66%, y su CV del 34 %.

Tomando como referencia la información que brinda la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (Altamirano et al., 1976) para las Unidades correspondientes a los sitios estudiados en este trabajo, en general los resultados se corresponden en gran medida para el contenido de las tres fracciones minerales.

Cuadro 6. Caracterización física y química de los suelos estudiados. Parte 1.

Sitio	US*	GC**	Material madre	Textura	Ar L Ac MO			
				%.....			
1	I-TA	12.22	Basalto	Fr Ac	35	37	28	6,2
2	Bq	11.6	Sed./Fm FB	Fr Ac	21	50	29	6,9
3	JPV	2.21	Cuat./Cristalino	Fr	41	48	11	4,0
4	Ri	10.1	Cuat./Cristalino	Fr Ac	25	47	28	6,5
5	Af	10.7	Cuat./Cristalino	Fr Ac L	16	53	31	5,3
6	Ri	10.1	Cuat./Cristalino	Fr Ac L	14	56	30	4,7
7	LC	10.12	Cuat./Cristalino	Fr Ac	31	41	28	5,0
8	Tr	10.12	Cuat./Cristalino	Fr Ac L	15	58	27	5,3
9	Tr	10.16	Cuat./Cristalino	Fr	39	40	21	5,0
10	SG-G	5.02b	Cuat./Cristalino	Fr	31	44	25	5,9
11	Yg	11.4	Sed./Fm FB	Fr	40	34	26	6,6
12	Yg	11.4	Sed./Fm FB	Fr Ac	39	34	27	5,6
13	VS	03.10	Holoceno/Fm Dolores	Fr L	26	56	18	3,7
14	SM	11.3	Sed./Fm FB	Fr	41	33	26	5,6
15	SM	11.3	Sed./Fm FB	Fr Ac	36	35	29	6,3
16	SM	11.3	Sed./Fm FB	Fr Ac	36	32	32	7,8
17	SM	11.3	Sed./Fm FB	Fr	39	36	25	6,7
18	Yg	11.4	Sed./Fm FB	Fr	42	33	25	5,1
19	Yg	11.4	Sed./Fm FB	Fr	35	41	24	5,5
20	Yg	11.5	Sed./Fm FB	Fr Ac Ar	52	23	25	5,7
21	SM	11.3	Sed./Fm FB	Fr Ac	32	40	28	5,9
22	Yg	11.5	Sed./Fm FB	Fr Ac Ar	46	26	28	5,7
23	SM	11.3	Sed./Fm FB	Fr Ac	42	31	27	5,3
24	SM	11.3	Sed./Fm FB	Fr Ac	31	40	29	5,1
25	SM	11.3	Sed./Fm FB	Fr	33	45	22	4,9
26	Bc	10.2	Sed./Calizas de Bellaco	Fr	51	31	18	4,9
27	CC	10.15	Sed./Cretácico	Fr Ar	65	25	10	2,1
28	Ri	10.1	Cuat./Cristalino	Fr	37	39	24	4,2
29	CC	10.15	Sed./Cretácico	Fr Ac Ar	58	21	21	3,4
30	SM	10.9	Sed./Fm FB	Fr L	22	57	21	4,4
31	Ct	S9.10	Fm Salto	Fr Ac Ar	50	27	23	5,5
32	Yg	11.4	Sed./Fm FB	Fr Ac	36	31	33	6,3
33	PP	10.1	Sed./Cretácico	Fr Ac Ar	51	25	24	4,1
34	Cpt	10.2	Sed./Cretácico	Fr	44	33	23	4,7
35	IM	10.3	Cuat./Cristalino	Fr Ac	28	41	31	3,6
36	Cpt	10.2	Sed./Cretácico	Fr Ar	66	17	17	3,7

Cuadro 7. Caracterización física y química de los suelos estudiados. Parte 2.

Sitio	pH (H ₂ O)	Ca	Mg	K	Na	Acidez	CIC***	Knoint
						int.		
.....cmolc kg-1.....								
1	5,5	23,26	3,35	0,32	0,32	0,07	27,32	1,24
2	5,4	23,20	1,90	1,21	0,35	0,02	26,68	4,72
3	4,4	4,61	1,29	0,37	0,46	0,83	7,56	1,37
4	4,9	19,00	3,23	0,46	0,41	0,12	23,22	2,48
5	5,4	17,26	3,56	0,42	0,59	0,20	22,03	1,31
6	5,7	20,55	3,77	0,46	0,45	0,18	25,41	2,53
7	5,6	20,61	3,28	0,57	0,45	0,09	25,00	2,78
8	6,2	22,46	3,48	0,47	0,50	0,13	27,04	2,10
9	6,3	24,52	2,91	0,98	0,44	0,20	29,05	2,83
10	5,4	16,25	2,16	0,66	0,43	0,20	19,70	3,07
11	5,9	22,71	2,09	1,47	0,38	0,13	26,78	4,00
12	6,1	20,08	1,92	0,96	0,35	0,12	23,43	3,41
13	5,2	8,89	1,70	0,55	0,40	0,07	11,61	2,84
14	7,9	34,55	0,53	0,69	0,33	0,53	36,63	2,87
15	5,8	25,24	2,37	0,67	0,38	0,18	28,84	3,26
16	7,5	39,68	0,95	0,57	0,34	0,17	41,71	3,01
17	5,4	14,31	4,05	1,22	0,40	0,12	20,10	3,33
18	5,6	20,05	1,63	0,97	0,35	0,12	23,12	3,14
19	4,9	19,16	1,97	0,48	0,38	0,12	22,11	2,32
20	5,5	18,26	2,56	0,30	0,41	0,10	21,63	1,90
21	5,6	23,54	2,16	0,77	0,35	0,11	26,93	2,83
22	5,1	22,26	2,67	0,31	0,40	0,12	25,76	1,75
23	5,7	22,30	1,52	0,71	0,36	0,12	25,01	2,66
24	5,7	21,43	1,94	0,53	0,39	0,12	24,41	2,52
25	5,1	18,10	1,86	0,53	0,39	0,13	21,01	2,58
26	5,1	12,80	2,84	0,45	0,37	0,13	16,59	1,51
27	4,3	2,54	0,68	0,20	0,30	0,54	4,26	0,82
28	5,4	20,06	3,13	0,43	0,38	0,14	24,14	1,29
29	5,2	11,11	2,25	0,20	0,44	0,09	14,09	0,86
30	5,6	14,72	2,06	1,58	0,43	0,12	18,91	3,57
31	5,1	17,03	3,92	0,38	0,42	0,16	21,91	0,75
32	5,4	25,03	3,42	0,46	0,42	0,13	29,46	1,68
33	5,7	20,14	3,37	0,15	0,40	0,06	24,12	1,11
34	5,3	13,78	3,00	0,20	0,70	0,12	17,80	0,72
35	6,1	22,86	2,86	0,39	0,44	0,06	26,61	1,64
36	5,8	15,39	1,61	0,23	0,33	0,07	17,63	1,01

*Unidad de Suelo **Grupo CONEAT ***CIC “efectiva”

I-TA: Itapebí-Tres Arboles; **Bq:** Bequeló; **JPV:** José P. Varela; **Ri:** Risso; **Af:** Alférez; **LC:** La Carolina; **Tr:** Trinidad; **SG-G:** San Gabriel-Guaycurú; **Yg:** Young; **VS:** Villa Soriano; **SM:** San Manuel; **Bc:** Bellaco; **CC:** Cuchilla del Corralito; **Ct:** Constitución; **PP:** Paso Palmar; **Cpt:** Carpintería; **IM:** Isla Mala. **Sed/Fm FB:** Sedimentos sobre Formación Fray Bentos; **Cuat/Cristalino:** Sedimentos Cuaternarios sobre Basamento Cristalino; **Sed/ Cretácico:** Sedimentos sobre areniscas Cretácicas.

4.1.2 Materia orgánica

El contenido de materia orgánica (MO) fue superior a 4 % en general, variando desde 2,1 a 7,9 %. En general, suelos con mayor porcentaje de arcilla presentaron valores más elevados de MO, siendo inversa su relación respecto al porcentaje de arena. En promedio, los suelos desarrollados a partir de sedimentos sobre Fm. Fray Bentos, Basalto y Sedimentos Cuaternarios sobre Basamento Cristalino presentaron mayor contenido de MO que los formados sobre areniscas cretácicas. Los valores de MO son similares a los suelos correspondientes para cada Unidad descritos en la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (Altamirano et al., 1976).

4.1.3 Contenido de bases, CIC efectiva y pH

La relación entre el contenido de arcilla y la capacidad de intercambio de cationes para los suelos estudiados presentó un mayor ajuste respecto a la que presentó la CIC y la materia orgánica (Figuras 8 y 9).

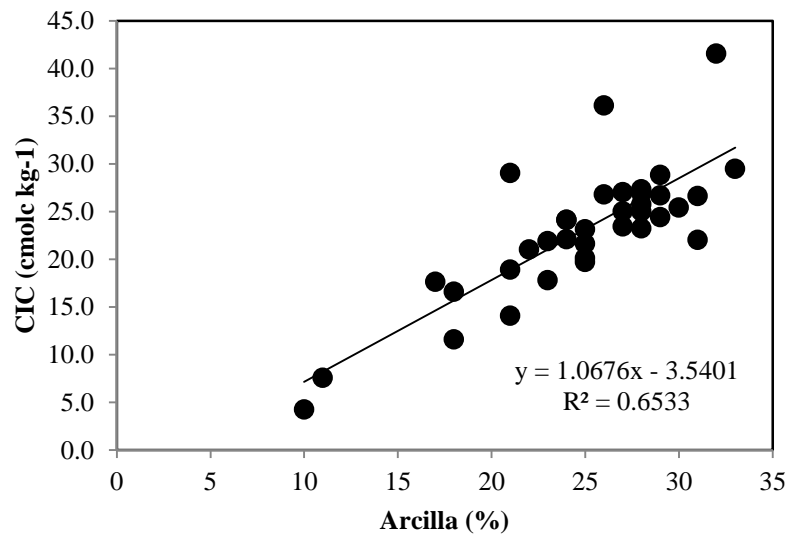


Figura 8. Regresión entre el porcentaje de arcilla y la CIC efectiva para los 36 suelos estudiados.

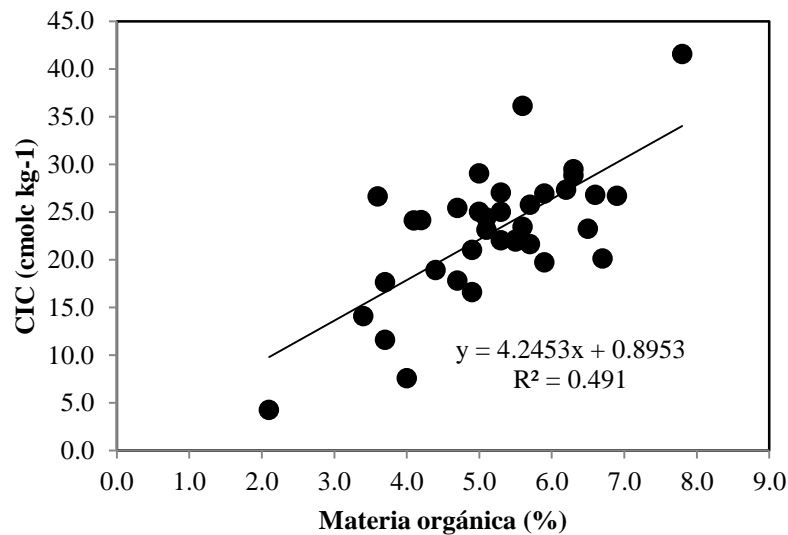


Figura 9. Regresión entre el porcentaje de materia orgánica y la CIC efectiva para los 36 suelos estudiados.

En general, los suelos presentaron una elevada capacidad de intercambio catiónico (CIC), variando desde los 4,3 a 41,5 cmolc kg⁻¹ de suelo, siendo en promedio mayores los valores de los suelos derivados de sedimentos sobre Fm. Fray Bentos y Basalto. El contenido de bases se correlacionó fuertemente al porcentaje de arcilla y al contenido de materia orgánica, y de forma más débil y negativa al porcentaje de arena.

El catión que explica un mayor contenido de bases es el Ca, siguiéndolo en menor proporción el K (Anexo 6).

El rango de pH en agua varió de 4,30 a 7,89, dependiendo del contenido de bases (Figura 10). Para esta variable, también es el contenido de Ca el que explica en gran medida su variación en estos suelos (Anexo 6). Del total de muestras estudiadas, 19 de ellas presentaron valores de pH en agua iguales o inferiores a 5,5.

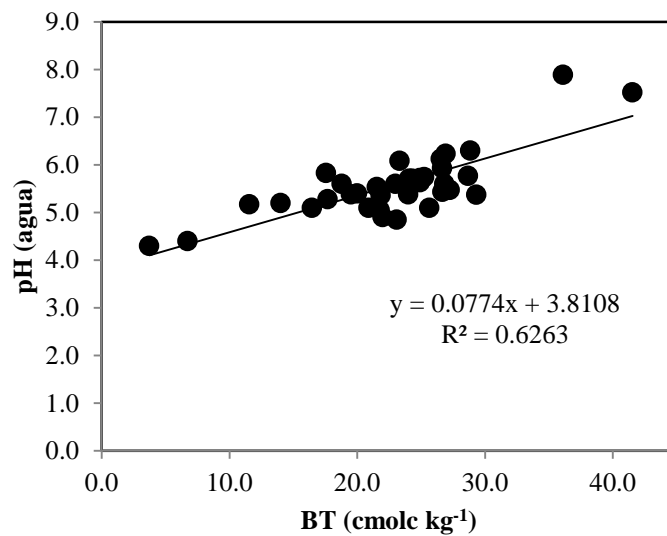


Figura 10. Regresión entre el contenido de bases y el pH para los 36 suelos estudiados.

4.1.4 Potasio intercambiable y no intercambiable

Los contenidos de K intercambiable se situaron en el rango de 0,15 a 1,58 cmolc kg⁻¹, valores similares a los obtenidos por Hernández (1983) para una amplia variedad de suelos. La media de K intercambiable fue de 0,59 cmolc kg⁻¹ y el desvío estándar de 0,35 cmolc kg⁻¹ para los 36 suelos estudiados, siendo 0,49 cmolc kg⁻¹ el valor más frecuente. El coeficiente de variación fue de 59,5 %. La Figura 11 muestra los promedios en el contenido de K intercambiable para los suelos agrupados según el material a partir del cual son formados.

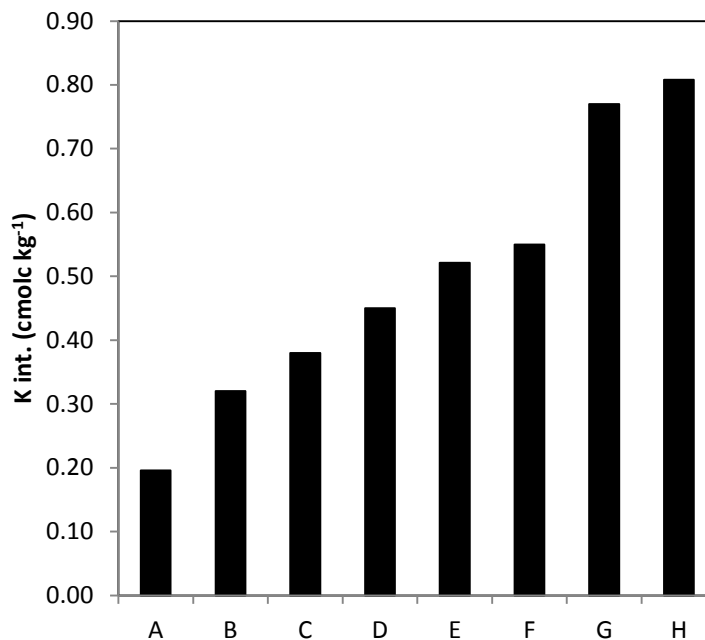


Figura 11. Contenido promedio de K intercambiable (cmolc kg⁻¹) según el material de origen.

A: Sedimentos arcillo-arenosos/Cretácico (5), **B:** Sedimentos limo-arcillosos/Basalto (1), **C:** Fm. Salto (1), **D:** Sedimentos arcillosos/Calizas de Bellaco (1), **E:** Sedimentos limo-arcillosos/Basamento Cristalino (10), **F:** Holoceno/Dolores (1), **G:** Sedimentos francos (L-Ac)/Fm. Fray Bentos (7), **H:** Sedimentos limosos (calcáreo)/ Fm. Fray Bentos (9). Valores entre paréntesis indican el número de sitios en cada material madre.

Los suelos situados en las unidades San Manuel, Young y Bequeló (incluidos en los sedimentos sobre Fm. Fray Bentos) son los que presentaron los contenidos más elevados de K intercambiable, en tanto que los situados en Cuchilla del Corralito, Carpintería (Sedimentos arcillo-arenosos (L-Ac)/Cretácico) e Itapebí-Tres Arboles (formado a partir de Basalto) presentaron los valores más bajos.

Su contenido se correlacionó en mayor magnitud y de forma significativa al porcentaje de limo ($p < 0,05$) que al porcentaje de arcilla que éstos posean y de forma inversa al porcentaje de arena ($p < 0,05$) (Anexo 6).

A diferencia de estos resultados, Hernández (1983) encontró una mayor correlación ($r = 0,56$) entre el contenido de K intercambiable y el contenido de arcillas en varios suelos, aunque las relaciones con las demás fracciones son de similar sentido y magnitud, concluyendo que a un mayor contenido de arcilla se corresponderá a un mayor contenido de K intercambiable.

La mayor variabilidad en los contenidos de arena, arcilla, limo y de K intercambiable (coeficientes de variación 57%, 53%, 60% y 88,1%, respectivamente) de ese grupo de suelos respecto a la variabilidad de los estudiados en este trabajo (CV de 33 %, 28%, 23% y 59,5% respectivamente) podrían explicar las diferencias.

Contrastando la información obtenida del contenido de K intercambiable en este grupo de suelos con el valor propuesto de $0,30 \text{ cmolc kg}^{-1}$, considerado como nivel crítico para este nutriente (Bautés et al. 2009, Hernández et al. 2010), solo 7 de los 36 suelos analizados presentaron un contenido inferior a dicho valor.

Se tratan de las muestras correspondientes a sitios ubicados en las Unidades Carpintería, Cuchilla del Corralito y Paso Palmar (suelos formados a partir de sedimentos sobre areniscas cretácicas) y dos sitios ubicados en la Unidad Young, pero en zona de transición con suelos desarrollados a partir de sedimentos sobre areniscas cretácicas.

Los contenidos de K no intercambiable se encontraron entre $0,70$ y $4,72 \text{ cmolc kg}^{-1}$, siendo la media $2,27 \text{ cmolc kg}^{-1}$, el desvío $1,0 \text{ cmolc kg}^{-1}$ y el CV de 44 %, El rango de contenidos expuesto anteriormente presenta, tanto el límite inferior como también el superior, valores superiores a los citados por Hernández (1983), Casanova (1996). Las similitudes entre las estimaciones de K no intercambiable de este trabajo con las realizadas por Hernández (1983) se dan en las Unidades que presentan elevado contenido de K en esta fracción, como son Young, Bequeló y San Gabriel-Guaycurú. Estos suelos que presentaron elevado contenido de K no intercambiable no cuentan en su historia de fertilizaciones con potasio.

Salvo dos excepciones, los suelos estudiados contienen más de 1 cmolc kg^{-1} de K no intercambiable, siendo mayor a 2 cmolc kg^{-1} en 21 de ellos.

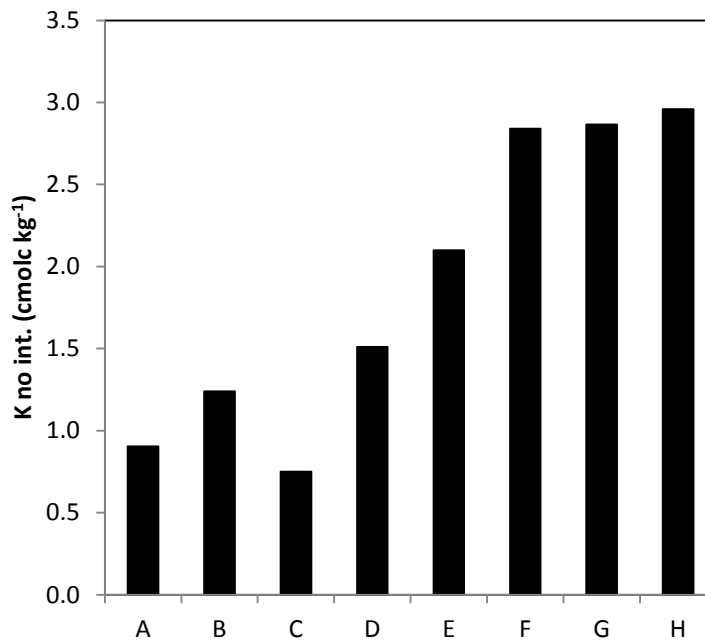


Figura 12. Contenido promedio de K no intercambiable (cmolc kg⁻¹) según el material de origen.

A: Sedimentos arcillo-arenosos/Cretácico (5), **B:** Sedimentos limo-arcillosos/Basalto (1), **C:** Fm Salto (1), **D:** Sedimentos arcillosos/Calizas de Bellaco (1), **E:** Sedimentos limo-arcillosos/Basamento Cristalino (10) **F:** Holoceno/Dolores (1), **G:** Sedimentos francos (L-Ac)/ Fm. Fray Bentos (7), **H:** Sedimentos limosos (calcáreo)/ Fm. Fray Bentos (9). Valores entre paréntesis indican el número de sitios en cada material madre.

El contenido de K no intercambiable se correlacionó de forma positiva con las fracciones limo y arcilla ($p < 0,05$) de los suelos y negativa al contenido de arena ($p < 0,05$) (Anexo 7). La correlación entre el contenido de arcilla y el de K no intercambiable fue superior a la que se da entre esa fracción mineral y el K intercambiable. Al igual que lo dicho para el contenido de K intercambiable, la variación en el contenido de K no intercambiable de los suelos estudiados en este trabajo fue menor a la encontrada por Hernández (1983), y a ello tal vez se deba la mayor correlación por él presentada entre el contenido de arcilla y el contenido de K no intercambiable. Las relaciones entre los contenidos de arena y limo con el contenido de K no intercambiable son similares a las encontradas por este autor.

Tanto el contenido de K intercambiable como el de K no intercambiable presentaron una mayor variabilidad que las fracciones minerales. Esto indica la importancia del material que les da origen a los suelos en el contenido de ambas

fracciones de K. Así, los suelos formados a partir de sedimentos sobre la Fm. Fray Bentos presentaron los contenidos más elevados tanto de K intercambiable como de K no intercambiable, mientras que los formados a partir de sedimentos sobre el Basamento Cristalino presentaron contenidos medios. Esto lo confirma la correlación que ambas fracciones presentaron entre sí (Anexo 7 y Figura 13). A similares resultados llegó Hernández (1983).

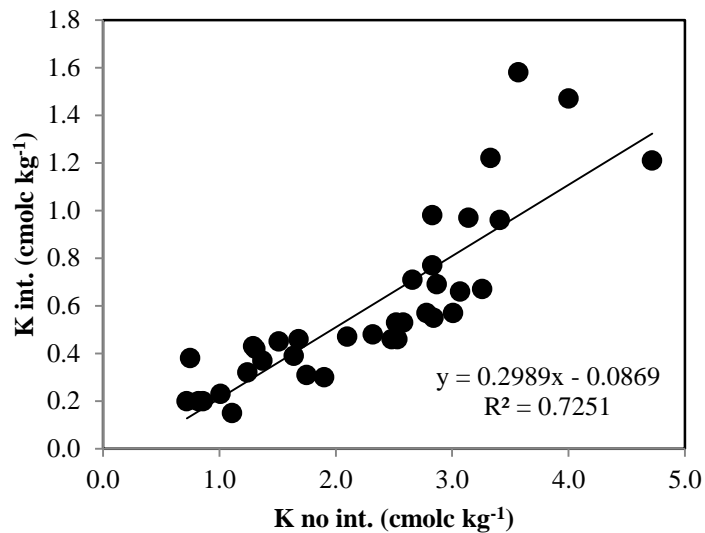


Figura 13. Relación entre el contenido de K intercambiable y el de K no intercambiable para los 36 suelos estudiados.

4.2 VARIACIÓN DEL K INTERCAMBIABLE EN LOS TRATAMIENTOS SIN FERTILIZAR

Fueron 19 los sitios en los que se observó variación en el contenido promedio de K intercambiable ($p < 0,05$) a los 30 y/o 60 días de iniciado el experimento en las muestras testigo. Mientras que en los 16 restantes, el contenido de K intercambiable no tuvo variación significativa en ningún momento (Cuadro 8). Cabe recordar, que todas las muestras fueron llevadas a capacidad de campo con respecto a su contenido de humedad al inicio del experimento.

Cuadro 8. Prueba de Tukey entre medias, que comparan los contenidos promedios de K intercambiable entre los testigos (tratamientos sin agregado de K) según el momento de su medición.

Sitio	K int. (cmolc kg ⁻¹)			Sitio	K int. (cmolc kg ⁻¹)		
	Inicial	30 días	60 días		Inicial	30 días	60 días
1	0,32 b	0,33 ab	0,37 a	19	0,48 c	0,55 a	0,51 b
2	1,21 b	2,01 a	1,87 a	20	0,30 b	0,44 a	0,44 a
3	0,37 a	0,34 b	0,32 b	21	0,77 a	0,75 a	0,74 a
4	0,46 a	0,48 a	0,47 a	22	0,31 c	0,43 b	0,46 a
5	0,42 a	0,47 a	0,45 a	23	0,71 b	0,80 a	0,78 b
6	0,46 a	0,58 a	0,50 a	24	0,53 a	0,54 a	0,52 a
7	0,57 c	0,61 b	0,69 a	25	0,53 b	0,71 a	0,66 a
8	0,47 b	0,57 a	0,51 b	26	0,45 c	0,56 a	0,50 b
9	0,98 c	1,08 a	1,00 b	27	0,20 a	0,19 a	0,22 a
10	0,66 a	0,47 b	0,45 b	28	0,43 a	0,44 a	0,40 a
11	1,47 a	1,49 a	1,54 a	29	0,20 a	0,21 a	0,18 a
12	0,96 a	0,98 a	0,85 b	30	1,58 a	1,36 a	1,41 a
13	0,55 ab	0,58 a	0,51 b	31	0,38 a	0,37 a	0,35 a
14	0,69 a	0,76 a	0,67 a	32	0,46 b	0,46 b	0,49 a
15	0,67 a	0,78 a	0,71 a	33	0,15 b	0,29 a	0,35 a
16	0,57 a	0,69 a	0,58 a	34	0,20 b	0,29 a	0,31 a
17	1,22 a	1,26 a	1,19 a	35	0,39 b	0,54 a	0,49 a
18	0,97 a	0,96 a	0,95 a	36	0,23 b	0,31 a	0,33 a

Letras distintas indican diferencias significativas en cada fila ($p < 0,05$).

Las variaciones observadas podrían en algo deberse a las diferencias en los tipos de arcilla de cada suelo. En los suelos donde se observó un incremento en el contenido de K intercambiable con el agregado de agua podría haber un predominio de montmorillonita. Esta arcilla al incrementarse la humedad se expande y puede liberar K.

4.3 VARIACIÓN DEL K INTERCAMBIABLE EN LOS TRATAMIENTOS FERTILIZADOS

En la mayoría de los sitios no se observaron cambios entre el K intercambiable medido a los 30 o a los 60 días de iniciado el experimento. Sin embargo, hubo un grupo de nueve suelos en los cuales el K intercambiable disminuyó significativamente entre los 30 y 60 días (Cuadro 9) luego del agregado de K. Tanto las texturas como las historias de manejo no permiten atribuir causas a este comportamiento. Sería necesario disponer

de información acerca de la mineralogía y/o de valores de estas fracciones de K en suelos en su estado natural.

Cuadro 9. Prueba de Tukey entre medias que comparan los contenidos promedios de K intercambiable entre los tratamientos con K según el momento de su medición.

Sitio	K int. (cmolc kg ⁻¹)			Sitio	K int. (cmolc kg ⁻¹)		
	inicial	30 días	60 días		inicial	30 días	60 días
1	0,32 b	0,43 a	0,41 a	19	0,48 c	0,61 a	0,53 b
2	1,21 b	1,99 a	2,01 a	20	0,30 b	0,47 a	0,46 a
3	0,37 a	0,39 a	0,40 a	21	0,77 ab	0,86 a	0,76 b
4	0,46 c	0,54 a	0,49 b	22	0,31 b	0,48 a	0,45 a
5	0,42 b	0,51 a	0,51 a	23	0,71 b	0,89 a	0,79 ab
6	0,46 b	0,61 a	0,62 a	24	0,53 c	0,64 a	0,58 b
7	0,57 b	0,74 a	0,73 a	25	0,53 b	0,76 a	0,74 a
8	0,47 b	0,63 a	0,52 b	26	0,45 b	0,62 a	0,58 a
9	0,98 c	1,11 a	1,03 b	27	0,20 a	0,27 a	0,28 a
10	0,66 a	0,52 b	0,56 ab	28	0,43 a	0,47 a	0,44 a
11	1,47 b	1,63 a	1,51 ab	29	0,20 a	0,27 a	0,27 a
12	0,96 a	1,03 a	0,97 a	30	1,58 a	1,45 b	1,36 b
13	0,55 c	0,63 b	0,65 a	31	0,38 a	0,41 a	0,40 a
14	0,69 a	0,75 a	0,71 a	32	0,46 a	0,55 a	0,60 a
15	0,67 b	0,80 a	0,79 a	33	0,15 b	0,37 a	0,37 a
16	0,57 c	0,74 a	0,65 b	34	0,20 b	0,35 a	0,42 a
17	1,22 b	1,34 a	1,38 a	35	0,39 b	0,61 a	0,60 a
18	0,97 a	1,03 a	1,03 a	36	0,23 b	0,36 a	0,37 a

Letras distintas indican diferencias significativas en cada fila (p<0,05).

Sin embargo, algunos de los suelos que tuvieron este comportamiento presentarían illita como arcilla dominante, dado el material madre semejante a suelos similares reportados por Hernández et al. (1988). Varios autores le atribuyen al tipo de arcilla predominante el comportamiento que el suelo tendrá con respecto a la dinámica del K tras el agregado de este elemento (Hobt 1978, Hipp y Thomas, citados por Hernández et al. 1988, Aguado et al. 2002). Según los antecedentes, cuando hay predominio de illita dentro de la fracción arcilla, y además éstas no están saturadas con

K, se dan las condiciones para que todo o parte del K que se agrega se fije en sus intercapas (González et al., 1999).

4.4 EQUIVALENTE FERTILIZANTE

El equivalente fertilizante, definido como los $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ para que la concentración de K intercambiable en dicha superficie aumente $0,1 \text{ cmolc kg}^{-1}$, y por ello la disponibilidad para las plantas, tomó valores promedio entre la primera y segunda determinación (30 y 60 días respectivamente) en el rango comprendido entre 127 y 526, siendo su media $231 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$, su desvío $92 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$, el CV de 40 % y el valor más frecuente $185 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$.

El Cuadro 10 presenta las ecuaciones de regresión con las que fue estimado el equivalente fertilizante para cada sitio, el Cuadro 11 muestra los valores de esta variable para cada uno de ellos y en la Figura 14, se presenta el equivalente fertilizante promedio ($\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$) para los suelos agrupados de acuerdo a su material de origen.

Cuadro 10. Parámetros de la regresión empleados para la estimación del equivalente fertilizante para cada sitio, significancia y coeficiente de determinación.

Sitio	30 días				60 días			
	Intercepto	Pendiente	p>F	r ²	Intercepto	Pendiente	p>F	r ²
1	0,336794	0,000636	0,0065	0,871	0,366817	0,000476	0,0002	0,975
2	2,017126	-0,000190	0,7500	0,028	1,875372	0,001002	0,0644	0,616
3	0,329491	0,000451	0,0146	0,805	0,317245	0,000599	0,0253	0,752
4	0,486730	0,000375	0,0001	0,982	0,466694	0,000164	0,4106	0,174
5	0,474098	0,000286	0,1925	0,380	0,451225	0,000522	0,1822	0,393
6	0,529924	0,000643	0,0008	0,955	0,505299	0,000904	0,0895	0,554
7	0,616822	0,000907	0,0003	0,974	0,666943	0,000451	0,2259	0,338
8	0,576639	0,000416	0,0615	0,624	0,470054	0,000366	0,0001	0,997
9	0,979958	0,000878	0,0001	0,999	0,980064	0,000392	0,0001	0,982
10	0,476737	0,000288	0,1107	0,510	0,453321	0,000733	0,0477	0,665
11	1,490241	0,000981	0,0476	0,666	1,470005	0,000268	0,0001	0,999
12	0,984559	0,000289	0,1989	0,371	0,849733	0,000810	0,0238	0,758
13	0,576678	0,000375	0,0266	0,745	0,510083	0,000959	0,0001	0,998
14	0,688288	0,000482	0,0855	0,563	0,672301	0,000312	0,2767	0,283
15	0,670217	0,000992	0,0018	0,931	0,710504	0,000549	0,1255	0,482
16	0,569550	0,001134	0,0007	0,958	0,581095	0,000494	0,1091	0,513
17	1,256245	0,000581	0,1665	0,416	1,197033	0,001212	0,0481	0,664
18	0,959798	0,000503	0,0044	0,893	0,954594	0,000506	0,2124	0,354
19	0,479720	0,000923	0,0014	0,939	0,479951	0,000382	0,0001	0,990
20	0,436565	0,000216	0,2945	0,266	0,436807	0,000170	0,3270	0,237
21	0,753603	0,000723	0,0059	0,877	0,736253	0,000160	0,4499	0,148
22	0,433403	0,000364	0,0005	0,965	0,400343	0,000383	0,0425	0,683
23	0,803185	0,000630	0,0044	0,893	0,710549	0,000574	0,1390	0,459
24	0,546338	0,000673	0,0202	0,777	0,516733	0,000476	0,0141	0,812
25	0,709661	0,000389	0,1165	0,499	0,656377	0,000615	0,0476	0,666
26	0,555459	0,000493	0,1081	0,515	0,499260	0,000600	0,0213	0,771
27	0,189932	0,000550	0,0115	0,830	0,216622	0,000435	0,1961	0,375
28	0,440209	0,000195	0,1077	0,796	0,400410	0,000258	0,3952	0,365
29	0,213640	0,000378	0,0786	0,579	0,184120	0,000542	0,0502	0,657
30	1,359405	0,000627	0,1346	0,466	1,410021	0,000275	0,0591	0,630
31	0,376172	0,000336	0,0882	0,557	0,350779	0,000452	0,1374	0,462
32	0,460787	0,000584	0,0987	0,534	0,494234	0,000693	0,1107	0,510
33	0,289984	0,000611	0,0058	0,877	0,299654	0,000519	0,0130	0,819
34	0,290034	0,000459	0,0033	0,908	0,313022	0,000763	0,0395	0,693
35	0,541439	0,000455	0,2038	0,365	0,487710	0,000753	0,0165	0,797
36	0,310025	0,000347	0,0037	0,901	0,326668	0,000301	0,1458	0,448

Cuadro 11. Equivalente fertilizante calculado a partir de las ecuaciones de regresión (Cuadro 10) para cada momento y sitio.

Sitio	Unidad de suelo	GC*	Eq. Fertilizante (kg K ₂ O ha ⁻¹)		
			30 días	60 días	promedio
1	Itapebí-Tres Árboles	12.22	157	210	184
2	Bequeló	11.6	-515	100	-208
3	José P, Varela	2.21	222	167	194
4	Risso	10.1	267	610	438
5	Alférez	10.7	350	192	271
6	Risso	10.1	156	111	133
7	La Carolina	10.12	110	222	166
8	Trinidad	10.16	240	273	257
9	Trinidad	10.16	114	255	184
10	San Gabriel Guaycurú	5.02b	347	136	242
11	Young	11.4	102	373	238
12	Young	11.4	346	123	235
13	Villa Soriano	03.10	267	104	185
14	San Manuel	11.3	207	321	264
15	San Manuel	11.3	101	182	141
16	San Manuel	11.3	88	202	145
17	San Manuel	11.3	172	83	127
18	Young	11.4	199	198	198
19	Young	11.4	108	262	185
20	Young	11.5	463	588	526
21	San Manuel	11.3	138	625	382
22	Young	11.5	275	261	268
23	San Manuel	11.3	159	174	166
24	San Manuel	11.3	149	210	179
25	San Manuel	11.3	257	163	210
26	Bellaco	10.2	203	167	185
27	Cuchilla Corralito	10.15	182	230	206
28	Risso	10.1	513	388	450
29	Cuchilla Corralito	10.15	265	185	225
30	San Manuel	10.9	159	364	262
31	Constitución	S9.10	298	221	259
32	Young	11.4	171	144	158
33	Paso Palmar	10.1	164	193	178
34	Carpintería	10.2	218	131	174
35	Isla Mala	10.3	220	133	176
36	Carpintería	10.2	288	332	310

* Grupo CONEAT

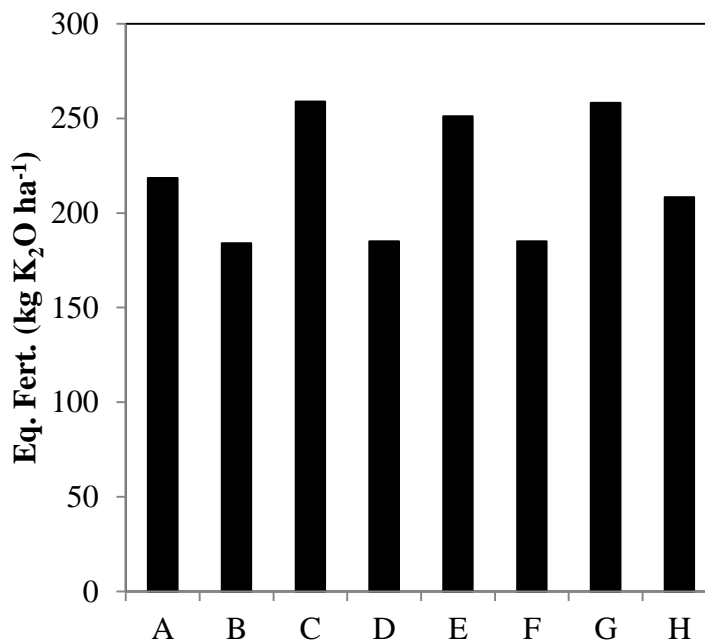


Figura 14. Equivalente fertilizante promedio (kg K₂O ha⁻¹) según el material de origen de los suelos.

A: Sedimentos arcillo-arenosos/Cretácico (5), **B:** Sedimentos limo-arcillosos/Basalto (1), **C:** Fm Salto (1), **D:** Sedimentos arcillosos/Calizas de Bellaco (1), **E:** Sedimentos limo-arcillosos/Basamento Cristalino (10), **F:** Holoceno/Dolores (1), **G:** Sedimentos francos (L-Ac)/ Fm. Fray Bentos (7), **H:** Sedimentos limosos (calcáreo)/ Fm. Fray Bentos (9). Valores entre paréntesis indican el número de sitios en cada material madre.

Los resultados obtenidos sugieren que existirían en los suelos agrícolas de Uruguay diferencias en la capacidad de fijación de K, aunque es necesario comprobar estos resultados in situ para contar con la seguridad de los mismos, o para su nueva estimación. Por ello, en caso de decidir realizar fertilizaciones con K se debería tener en cuenta la existencia de dicha variabilidad, para lograr un manejo adecuado en cada situación y lograr los resultados esperados. La utilización de valores de equivalente fertilizante para la estimación de dosis, acordes a cada suelo, contribuiría a ese propósito.

Además, éstos resultados evidencian la necesidad de contar con información de la fracción arcilla, así como de la dinámica del nutriente en estudios de más largo plazo.

4.5 RELACIÓN ENTRE EL EQUIVALENTE FERTILIZANTE Y LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS

Tomando la totalidad de las muestras estudiadas, las correlaciones entre el equivalente fertilizante y las características de ellas fueron bajas, siendo significativa ($p < 0,05$) y de mayor magnitud la que relaciona dicha variable con el contenido de K no intercambiable ($r = -0,35$), lo que indicaría que a mayor contenido de K bajo esta forma, menor es la cantidad que el suelo puede fijar por una mayor cantidad de sitios selectivos ocupados por este catión, requiriendo por ello agregar menores cantidades de K para el incremento de la fracción intercambiable en $0,1 \text{ cmolc kg}^{-1}$ de suelo. Se le suman a esto, las correlaciones negativas (aunque bajas y no significativas) entre el equivalente fertilizante y el contenido de K intercambiable como también a su porcentaje en la CIC (saturación de K) (Anexos 7 y 8).

Aunque, como ya fue mencionado, el contenido de K no intercambiable se correlacionó positivamente ($p < 0,05$) a los contenidos de limo y de arcilla, indicando la importancia de ambas fracciones granulométricas en la reserva de K en varios de estos suelos, las correlaciones entre estas fracciones y el equivalente fertilizante no permiten acusar incidencias de ellas sobre esta variable (Anexo 7).

4.6 FORMAS DE K Y EQUIVALENTE FERTILIZANTE EN SUELOS FORMADOS SOBRE SEDIMENTOS LIMO - ARCILLOSOS SOBRE EL BASAMENTO CRISTALINO

Los suelos clasificados dentro de este grupo son los situados sobre las Unidades José P, Varela, Risso, Alférez, La Carolina, Trinidad, Isla Mala y San Gabriel Guaycurú de la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (Altamirano et al., 1976).

El contenido de K intercambiable de ese grupo varió entre $0,37$ a $0,98 \text{ cmolc kg}^{-1}$, promediando los $0,50 \text{ cmolc kg}^{-1}$, con un desvío estándar de $0,18 \text{ cmolc kg}^{-1}$ y un CV de 36%. El de K no intercambiable se encontró entre $1,29$ a $2,83 \text{ cmolc kg}^{-1}$, siendo el contenido promedio de $2,04 \text{ cmolc kg}^{-1}$, su desvío de $0,64 \text{ cmolc kg}^{-1}$ y su CV de 31%.

El rango de valores que tomó el equivalente fertilizante en este grupo de suelos con siete sitios varió entre los 133 a $450 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$, siendo el promedio de $252 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$, con un desvío de $117 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ y un CV de 46 %.

4.7 FORMAS DE K Y EQUIVALENTE FERTILIZANTE EN SUELOS FORMADOS SOBRE SEDIMENTOS ARCILLO - ARENOSOS (LIMO – ARCILLOSOS) SOBRE ARENISCAS CRETÁICAS

En este grupo, el contenido de K se encuentra entre 0,15 y 0,23 cmolc kg⁻¹, la media fue de 0,19 cmolc kg⁻¹, el desvío 0,03 cmolc kg⁻¹ y el CV de 16 %. Aquí fueron considerados las muestras provenientes de suelos situados en las Unidades Cuchilla del Corralito, Carpintería y Paso Palmar de la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (Altamirano et al., 1976).

Estos sitios también presentaron los contenidos más bajos de K no intercambiable de este estudio, desde 0,72 a 1,11 cmolc kg⁻¹. Su promedio es 0,9 cmolc kg⁻¹, el desvío 0,15 cmolc kg⁻¹ y su CV 16 %.

El equivalente fertilizante tomó valores entre 174 y 310 kg K₂O ha⁻¹, siendo el promedio 219 kg K₂O ha⁻¹, el desvío 55 kg K₂O ha⁻¹ y el CV de 25 %.

4.8 FORMAS DE K Y EQUIVALENTE FERTILIZANTE EN SUELOS FORMADOS SOBRE SEDIMENTOS LIMOSOS CON NIVELES CALCÁREOS SOBRE FM. FRAY BENTOS

El contenido de K intercambiable en estos suelos se situó en el rango de los 0,53 y 1,58 cmolc kg⁻¹, siendo el promedio 0,81 cmolc kg⁻¹, con un desvío de 0,36 cmolc kg⁻¹ y un CV de 44 %, perteneciendo este grupo a los suelos situados en la Unidad San Manuel de la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (Altamirano et al., 1976).

El contenido de K no intercambiable fue elevado en todos los sitios, variando desde 2,52 a 3,57 cmolc kg⁻¹, con un promedio de 2,96 cmolc kg⁻¹, un desvío de 0,36 cmolc kg⁻¹ y un CV de 12 %.

El equivalente fertilizante en estos suelos se situó en el rango de los 127 a 382 kg K₂O ha⁻¹, siendo el promedio 208 kg K₂O ha⁻¹, con un desvío de 82 kg K₂O ha⁻¹ y un CV de 39 %.

4.9 FORMAS DE K Y EQUIVALENTE FERTILIZANTE EN SUELOS FORMADOS SOBRE SEDIMENTOS FRANCO (LIMO – ARCILLOSOS) SOBRE FM. FRAY BENTOS

Aquí fueron clasificados los suelos situados sobre las unidades Young y Bequeló de la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (Altamirano et al., 1976).

El contenido de K intercambiable se encontró en el rango de 0,30 a 1,47 cmolc kg⁻¹, el promedio fue de 0,77 cmolc kg⁻¹, con un desvío de 0,44 cmolc kg⁻¹ y un CV de 57%, siendo el grupo de suelos con mayor variabilidad en contenido de K.

El contenido de K no intercambiable se situó entre 1,68 a 4,72 cmolc kg⁻¹, siendo la media 2,27 cmolc kg⁻¹, el desvío de 1 cmolc kg⁻¹ y el CV de 44%.

El equivalente fertilizante se encontró entre los 158 y 526 kg K₂O ha⁻¹. El valor promedio de esta variable es de 231 kg K₂O ha⁻¹, su desvío de 92 kg K₂O ha⁻¹ y el CV de 40 % (no se cuenta el sitio ubicado en la Unidad Bequeló).

5. CONCLUSIONES

La mayoría de los sitios estudiados presentaron contenidos medios a altos de K intercambiable como de K no intercambiable, fundamentalmente los suelos originados a partir de sedimentos sobre la Formación Fray Bentos y sobre sedimentos sobre Basamento Cristalino, observándose solamente en suelos formados a partir de sedimentos sobre areniscas cretácicas y zonas transicionales a éstas valores de K intercambiable inferiores o cercanos a los valores críticos propuestos por varios autores para decidir posibles fertilizaciones.

Solo en 2 de los 36 sitios se estimó un valor promedio de equivalente fertilizante próximo a su valor teórico. Estos sitios se ubican en las Unidades San Manuel y Risso, y las estimaciones fueron 127 y 133 kg K₂O ha⁻¹ respectivamente. En el resto de los sitios las estimaciones de esta variable fueron superiores a los 140 kg K₂O ha⁻¹. Este hecho indica que para este grupo de suelos existiría una importante capacidad de fijación del K agregado.

Los valores obtenidos de equivalente fertilizante, superiores al valor teórico de esta variable, pueden ser atribuidos a la historia agrícola de estos suelos, sin agregado de este nutriente y bajo una continua extracción, provocando de esta manera un balance negativo de este nutriente en los suelos. Por otro lado, la forma de estimación del equivalente fertilizante puede haber llevado a una sobreestimación, dado que se asumió la misma densidad aparente para todos los suelos.

6. RESUMEN

Con el propósito de calcular el equivalente fertilizante para potasio en suelos agrícolas de Uruguay, se realizó un ensayo de invernáculo utilizando 36 muestras de suelos representativas de las zonas donde se desarrolla actualmente la producción agrícola de secano. A cada una de dichas muestras se les aplicaron dos tratamientos: un tratamiento testigo, al cual solamente se le agregó agua desionizada hasta su capacidad de campo, y un tratamiento que consistió en el agregado de una dosis conocida de KCl, además de llevar a capacidad de campo su contenido de humedad. Se evaluó el contenido de K intercambiable en dos momentos: a los 30 y 60 días, y a partir de esa información se desarrollaron las ecuaciones de regresión para el cálculo del equivalente fertilizante para cada momento. En promedio, el equivalente fertilizante se encontró en un rango entre 127 y 526 kg K₂O ha⁻¹, siendo su media 231 kg K₂O ha⁻¹, su desvío 92 kg K₂O ha⁻¹ y el CV de 40 %. Se encontró únicamente una correlación significativa ($p < 0,05$) y negativa entre esta variable con el contenido de K no intercambiable de cada suelo (-0,35). Los resultados muestran que estos suelos fijarían K ya que el equivalente fertilizante estimado es superior a su valor teórico, el cual no considera la existencia de fijación del K agregado al suelo. Esto se debería al tipo de mineralogía predominante en estos suelos, además de una continua extracción de K a través del tiempo y a la ausencia de fertilización con este nutriente, generando un balance negativo para los suelos.

Palabras clave: Equivalente fertilizante de K; Fertilización potásica; K intercambiable; K no intercambiable.

7. SUMMARY

In order to calculate the equivalent potassium fertilizer for agricultural soils of Uruguay, we conducted a greenhouse using 36 test soil samples representative of the currently developed areas where rain-fed agricultural production. Each of these samples were given two treatments: a control treatment, which only not ionized water was added to field capacity, and a treatment that consisted of the addition of a known dose of KCl, in addition to carry moisture content to field capacity. We evaluated the content of exchangeable K in two stages: at 30 and 60 days, and from that information we developed regression equations to calculate the fertilizer equivalent for every moment. On average, the equivalent fertilizer was found in a range between 127 and 526 kg K₂O ha⁻¹, being their average 231 kg K₂O ha⁻¹, its deviation 92 kg K₂O ha⁻¹ and CV of 40%. We found only one significant and negative correlation (p <0.05) between this variable and the non-exchangeable K content of each soil, -0.35. The results show that agricultural soils in Uruguay set K as the equivalent fertilizer estimated is higher than its theoretical value, which does not consider the existence of the fixation of K added to the soil. This is due to the continuous extraction of K over time and the absence of fertilization with this nutrient, generating a negative balance for the soil.

Keywords: Equivalent K fertilizer; Potassium fertilization; Exchangeable K; Non-exchangeable K.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. AGUADO, G.; ETCHEVERS, J. D.; HIDALGO, C.; GALVIS, A.; AGUIRRE, A. 2002. Dinámica del potasio en suelos agrícolas. *Agrociencia*. 36 (1): 11-21.
2. ALMADA, P. 2006. Fertilización P y K de maíz en tres suelos de Durazno. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 64 p.
3. ALTAMIRANO, A.; DA SILVA, H.; DURÁN, A.; ECHEVERRÍA, A.; PANARIO, D.; PUENTES, R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo, MAP. DSF. t.1, 96 p.
4. ANDREOLI, C. Y.; PEINEMANN, N. 1984. Fracciones de Potasio y condiciones de equilibrio en suelos de la llanura pampeana. *Ciencia del Suelo*. 2 (2): 159-166.
5. BARBAZÁN, M.; FERRANDO, M.; ZAMALVIDE, J. 2007. Estado nutricional de *Lotus corniculatus* en Uruguay. *Agrociencia*. 11(1): 22 - 34.
6. BAUTES, C.; BARBAZÁN, M.; BEUX, L. 2009. Fertilización potásica inicial y residual en cultivos de secano en suelos sobre areniscas cretácicas y transicionales. IPNI. no. 41: 1-8.
7. BERTSCH, P. M.; THOMAS, G. W. 1985. Potassium status of temperate region soils. In: Munson, R. D. ed. Potassium in agriculture. Madison, WI, American Society of Agronomy. pp. 131 – 162.
8. BONILLA, I. 2000. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. In: Azcon-Bieto, J; Talón, M. eds. Fundamentos de fisiología vegetal. Madrid, Mc Graw-Hill Interamericana. pp. 83 – 98.
9. BORDOLI, J. M. 2001. Dinámica de nutrientes y Fertilización en siembra directa. In: Díaz Rossello, R. ed. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 289-297 (Documentos).

10. BORGES-GÓMEZ, L.; ESCAMILLA-BENCOMO, A.; SORIA-FREGOSO, M.; CASANOVA-VILLAREAL, V. 2005. Potasio en suelos de Yucatán. *TERRA Latinoamericana*. 23 (4): 437- 445.
11. BOSSI, J.; NAVARRO, R. 1988. *Geología del Uruguay*. Montevideo, Universidad de la República. Departamento de Publicaciones. 970 p.
12. BOUYOUCOS, G.S. 1936. Directions for making mechanical analysis of soil by hydrometer method. *Soil Science*. 4: 225-228.
13. CANO, J. D.; ERNST, O.; GARCÍA, F. 2007. Respuesta a la fertilización potásica en maíz para grano en suelos del noroeste de Uruguay. (en línea). *Archivo Agronómico IPNI*. no. 11: 9-12. Consultado feb. 2011. Disponible en [http://www.ppi-ppic.org/ppiweb/iaarg.nsf/\\$webindex](http://www.ppi-ppic.org/ppiweb/iaarg.nsf/$webindex)
14. CASANOVA, O. 1996. Potasio; consideraciones sobre su situación en el Uruguay. Montevideo, INIA. pp. 57-61 (Serie Técnica no. 76).
15. _____.; FERRANDO, M. 2003. Cuantificación mediante lisímetros del lavado de bases en suelos, bajo dos regímenes hidricos. *Agrociencia*. 7 (2): 39 – 48.
16. CIAMPITTI, I. A.; GARCÍA F. O. 2009. Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. Cereales, Oleaginosos e Industriales. (en línea). *Archivo Agronómico IPNI*. no. 11: 13-16. Consultado mar. 2011. Disponible en [http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/e036ac788900a6560325728e0069ff05/\\$FILE/I.%20Ciampitti-%20Requerimientos.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/e036ac788900a6560325728e0069ff05/$FILE/I.%20Ciampitti-%20Requerimientos.pdf)
17. COLOMBO, M.; COLLARES, J. R. 1982. Efecto del encalado y fertilización PK en suelos arenosos ácidos. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 194 p.
18. CONTI, M. E. 2000a. Dinámica de la liberación y fijación de potasio en el suelo. *Archivo Agronómico*. no. 4: 14.
19. _____. 2000b. Principios de edafología con énfasis en suelos argentinos. 2ª ed. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. pp. 45-64.

20. CRUZATE, G. A.; CASAS, R. 2009. Extracción de nutrientes en la República Argentina. (en línea). Informaciones Agronómicas del Cono Sur. no. 44: 1-14. Consultado mar. 2011. Disponible en http://www.inta.gov.ar/suelos/info/documentos/informes/Extraccion_de_nutrientes.pdf
21. DEL PINO, A. 1997. Nutrición catiónica. Montevideo, Facultad de Agronomía. 30 p.
22. DEWIS, J.; FREITAS, F. 1970. Physical and chemical methods of soils and water analysis. Rome, FAO. 275 p. (Soils Bulletin no. 10).
23. DURÁN, A. 2004. Composición del suelo. (en línea). Montevideo, Facultad de Agronomía. 50 p. Consultado feb. 2011. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/~edafologia/>
24. _____.; GARCÍA PRÉCHAC, F. 2007. Suelos del Uruguay; origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo, Hemisferio Sur. v.1, 700 p.
25. FASSBENDER, H. W.; BORNEMISZA, E. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica, IICA. pp. 327-361.
26. GASPARI, F. J.; VÁZQUEZ, M.; LANFRANCO, J. 2006. Relación entre la erosión hídrica superficial y la distribución de la pérdida de calcio, magnesio y potasio del suelo. Revista de la Facultad de Agronomía. 106 (1): 56.
27. GONZÁLEZ, M. G.; MORENO, G.; CONTI, M. E.; DE LA HORRA, A. M. 1999. Cambios en la fijación-liberación de potasio en Argiudoles con distintos tipos de arcilla y saturación potásica. Ciencias del Suelo. no. 17:27-30.
28. HERNÁNDEZ, J. 1983. Capacidad de suministro de potasio en suelos del Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 77 p.

29. _____.; CASANOVA, O.; ZAMALVIDE, J. P. 1988. Capacidad de suministro de potasio en suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía (Montevideo). Boletín de Investigación no. 19. 20 p.
30. _____. 1992. Potasio. Montevideo, Facultad de Agronomía. 35p.
31. _____. 1996. Curso de actualización en fertilidad de suelos. Potasio. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 3-6.
32. _____.; BARBAZÁN, M.; PERDOMO, C. 2010. Potasio. (en línea). Montevideo, Facultad de Agronomía. 62 p. Consultado feb. 2011. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/curso/docs/Potasio.impr.pdf>.
33. HOBT, H. 1978. Dinámica del potasio en el suelo. In: Coloquio sobre Suelos (5°, 1978, Bogotá). Memorias. Ciencia del Suelo. 9 (2): 86-92.
34. ISAAC, R. A.; KERBER, J. D. 1971. Atomic absorption and flame photometry: Techniques and uses in soil, plant, and water analysis. In: Walsh, L. M. ed. Instrumental methods for analysis of soils and plant tissue. Madison, WI, Soil Science Society of America. pp. 17-37.
35. JACKSON, M. L. 1970. Análisis químico de suelos. Barcelona, Omega. 662 p.
36. MADRID, R.; GARCÍA PITARCH, A. 1984. Influencia de la fertilización potásica sobre las relaciones Q/I en el suelo pardo calizo. (en línea). Anales de la Universidad de Murcia. Ciencias no. 43: 1-4. Consultado ene. 2011. Disponible en <http://hdl.handle.net/10201/5694>
37. MARELLA, G.; CROSA, A.; BORDABERRY, J. 1981. Respuesta de la soja a la fertilización fosfatada y potásica. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 191 p.
38. MEJÍA, L. 1978. Mineralogía del potasio en el suelo y en el material parental. In: Coloquio sobre Suelos (5°, 1978, Bogotá). Memorias. Ciencia del Suelo. 9 (2): 1-17.

39. MOIR, T. R. G.; REYNAERT, E. E. 1962. Ensayos de fertilización de cultivos. Montevideo, Ministerio de Ganadería y Agricultura. Comisión Honoraria del Plan Agropecuario. 52 p.
40. MONTOYA, B.; SPINOLA, A.G.; HERNÁNDEZ MENDOZA, T. M.; GARCÍA-PAREDES, D. 2007. Capacidad amortiguadora y cinética de liberación de potasio en suelos. Agricultura Técnica en México. 33 (1): 73-81.
41. MORÓN, A.; BAETGHEN, W. 1996. Relevamiento de la fertilidad de los suelos bajo producción lechera en Uruguay. Montevideo, INIA. 15 p. (Serie Técnica no. 73).
42. _____; QUINCKE, A. 2010. Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el Departamento de Soriano. In: Jornada Técnica de INIA La Estancuela (2010, Mercedes). El efecto de la agricultura en la calidad de los suelos y fertilización de cultivos. Montevideo, INIA. pp. 5-8 (Actividades de Difusión no. 605).
43. NAVARRO, S.; NAVARRO, G. 2003. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. 2ª. ed. Madrid, Mundi-Prensa. 487 p.
44. OLGUÍN, R. 2004. Conceptos básicos de fisico - química. Enfoque aplicado al comportamiento Geotécnico del suelo. (en línea). Santiago de Chile, Universidad de Chile. 19 p. Consultado mar. 2011. Disponible en <https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2004/2/CI44A/1/.../41224>
45. OUDRI, N.; CASTRO, J. L.; DOTI, R.; SEDONDI DE CARBONELL, A. 1976. Guía para la fertilización de cultivos. Montevideo, CIAAB. 48 p.
46. PEECH, M. 1965. Hydrogen activity. In Black, C.A. ed. Methods of soils analysis. Madison, WI, American Society of Agronomy. pp. 914-925.
47. PEREIRA, G.; TEIXEIRA, M.; VERCELLINO, A. 1983. Efecto residual del encalado y la fertilización fosfatada en suelos arenosos ácidos (cultivo de soja). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 190 p.

48. PORTA, J.; LÓPEZ – ACEVEDO, M.; ROQUERO, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª.ed. Madrid, Mundi – Prensa. 960 p.
49. ROLDÁN, M.; VENIALGO, C.; GUTIERREZ, N. 2004. Potasio disponible, de reserva y energía de reemplazamiento en suelos y el nivel foliar en rye-grass. (en línea). Corrientes, Universidad Nacional del Nordeste. 4 p. Consultado ene. 2011. Disponible en <http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/com2004/5-Agrarias/A-072.pdf>
50. RUIZ, R.; SADZAWKA, A. 1986. Fijación de potasio en suelos del Valle Aconcagua. Agricultura Técnica. 46 (4): 3.
51. SAS INSTITUTE. 1985. SAS/STAT guide for personal computer. 6th. ed. Cary, NC. 956 p.
52. SAWYER, J. E.; MALLARINO, A. P.; KILLORN, R.; BARNHART, S. K. 2008. A general guide for crop nutrient and limestone recommendations in Iowa. (en línea). Iowa, Iowa State University. 22 p. Consultado feb. 2011. Disponible en <http://www.extension.iastate.edu/Publications/PM1688.pdf>
53. SHELDRIK, W. F. 1985. World potassium reserves. In: Munson, R. D. ed. Potassium in agriculture. Madison, WI, American Society of Agronomy. pp. 3 – 28.
54. SPARKS, D. L.; HUANG, P. M. 1985. Physical chemistry of soil potassium. In: Munson, R. D. ed. Potassium in agriculture. Madison, WI, American Society of Agronomy. pp. 201 – 276.
55. USHERWOOD, N. R. 1978. The interaction of potassium with other ions in soils and plants. In: Coloquio sobre Suelos (5º. 1978, Bogotá). Memorias. Ciencia del Suelo. 9 (2): 29-36.
56. VÁZQUEZ, M. 2007. Calcio y Magnesio. Acidez y alcalinidad de suelos. In: Echeverría, H.; García, F. eds. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Balcarce, INTA. pp.161-188.

57. VIDAL, J. L. 2003. Dinámica del potasio en el suelo y su requerimiento por los cultivos. (en línea). México, Colegio de Postgraduados. 30 p. Consultado ene. 2011. Disponible en [http://www.ipni.net/.../Dinámica del potasio](http://www.ipni.net/.../Dinámica_del_potasio). Marzo 5. Jose Luis Vidal.doc

9. ANEXOS

Anexo 1. Dosis promedio (3 repeticiones) de Potasio aplicada en los 36 suelos.

Muestra	Dosis K₂O (kg ha⁻¹)	Muestra	Dosis K₂O (kg ha⁻¹)
1	146	19	149
2	143	20	156
3	143	21	151
4	142	22	147
5	123	23	144
6	125	24	140
7	140	25	147
8	136	26	147
9	144	27	146
10	150	28	152
11	149	29	157
12	153	30	145
13	142	31	122
14	145	32	151
15	144	33	136
16	151	34	145
17	151	35	147
18	147	36	144

Anexo 2. Contenido de potasio intercambiable de los suelos estudiados en cada momento de medición (inicio, 30 días y a los 60 días) para cada tratamiento y sus repeticiones.

Sitio	Unidad de suelo	Repetición	K int. inicial	K int. 30 días		K int. 60 días	
				Sin K	Con K	Sin K	Con K
1	Itapebí-Tres Árboles	1	0,32	0,32	0,45	0,42	0,44
		2		0,35	0,40	0,36	0,36
		3		0,34	0,44	0,37	0,43
2	Bequeló	1	1,21	2,01	1,94	1,83	2,12
		2		1,91	2,09	1,88	1,97
		3		2,13	1,94	1,92	1,96
3	J.P.Varela	1	0,37	0,33	0,36	0,31	0,44
		2		0,38	0,41	0,30	0,40
		3		0,33	0,41	0,34	0,37
4	Risso	1	0,46	0,49	0,54	0,42	0,47
		2		s/d	0,54	0,49	0,50
		3		0,48	0,54	0,51	0,50
5	Alférez	1	0,42	s/d	0,55	0,42	0,58
		2		0,46	0,50	0,49	0,50
		3		0,48	0,48	0,44	0,47
6	Risso	1	0,46	0,61	0,60	0,42	0,65
		2		0,53	0,63	0,57	0,63
		3		0,60	0,60	0,52	0,58
7	La Carolina	1	0,57	0,63	0,73	0,67	0,74
		2		0,61	0,75	0,66	0,65
		3		0,61	0,75	0,75	0,80
8	Trinidad	1	0,47	0,56	0,61	s/d	0,52
		2		0,60	0,62	0,50	0,52
		3		0,57	0,67	0,52	0,52
9	Trinidad	1	0,98	1,00	1,11	1,06	1,03
		2		1,17	1,11	1,00	s/d
		3		1,09	1,10	0,95	1,04

Anexo 3. Contenido de potasio intercambiable de los suelos estudiados en cada momento de medición (inicio, 30 días y a los 60 días) para cada tratamiento y sus repeticiones.

Sitio	Unidad de suelo	Repetición	K int. inicial	K int. 30 días		K int. 60 días	
				Sin K	Con K	Sin K	Con K
10	San Gabriel Guaycurú	1	0,66	0,47	0,55	0,42	0,53
		2		s/d	0,53	0,42	0,56
		3		0,48	0,48	0,52	0,60
11	Young	1	1,47	1,48	1,54	1,53	1,51
		2		1,48	1,66	1,51	1,51
		3		1,51	1,71	1,58	s/d
12	Young	1	0,96	1,01	1,03	0,81	0,93
		2		1,00	1,00	0,87	1,03
		3		0,94	1,06	0,87	0,96
13	Villa Soriano	1	0,55	0,58	0,63	s/d	s/d
		2		0,60	0,62	0,51	0,64
		3		0,55	0,64	0,51	0,65
14	San Manuel	1	0,69	0,79	0,74	0,63	0,70
		2		0,75	0,82	0,66	0,76
		3		0,75	0,71	0,73	0,69
15	San Manuel	1	0,67	0,77	0,79	0,69	0,75
		2		0,78	0,80	0,77	0,84
		3		0,79	0,85	0,67	0,78
16	San Manuel	1	0,57	0,76	0,71	0,64	0,63
		2		0,71	0,78	0,54	0,65
		3		0,60	0,73	0,56	0,69
17	San Manuel	1	1,22	1,26	1,43	1,10	s/d
		2		1,25	1,35	1,22	1,30
		3		1,26	1,25	1,27	1,42
18	Young	1	0,97	0,95	1,03	0,91	1,09
		2		0,98	1,05	1,00	0,95
		3		0,95	1,02	0,95	1,05

Anexo 4. Contenido de potasio intercambiable de los suelos estudiados en cada momento de medición (inicio, 30 días y a los 60 días) para cada tratamiento y sus repeticiones.

Sitio	Unidad de suelo	Repeticion	K int. inicial	K int. 30 días		K int. 60 días	
				Sin K	Con K	Sin K	Con K
19	San Manuel	1	0,48	0,57	0,63	0,53	0,54
		2		0,55	0,64	0,50	0,54
		3		0,53	0,58	0,52	0,53
20	Young	1	0,3	0,42	0,49	0,45	0,49
		2		0,46	0,42	0,40	0,44
		3		0,43	0,50	0,46	0,46
21	San Manuel	1	0,77	0,76	0,84	0,76	0,73
		2		0,76	0,85	0,71	0,81
		3		0,74	0,90	0,74	0,74
22	Young	1	0,31	0,44	s/d	0,49	0,47
		2		0,43	0,49	0,51	0,48
		3		0,43	0,48	0,40	0,42
23	Young	1	0,71	0,79	0,88	0,77	0,86
		2		0,80	0,92	0,79	0,71
		3		0,82	0,88	s/d	0,81
24	San Manuel	1	0,53	0,52	0,61	0,53	0,56
		2		0,58	0,63	0,52	0,58
		3		0,54	0,68	0,50	0,61
25	San Manuel	1	0,53	0,74	0,81	0,63	0,77
		2		0,68	0,73	0,71	0,71
		3		0,71	0,76	0,63	0,76
26	Bellaco	1	0,45	0,59	0,63	0,53	0,59
		2		0,53	0,57	0,48	0,55
		3		0,55	0,68	0,49	0,62
27	Cuchilla Corralito	1	0,2	0,20	0,27	0,20	0,34
		2		0,19	0,30	0,18	0,24
		3		0,18	0,24	0,27	0,26
28	Risso	1	0,43	0,44	0,48	0,37	0,46
		2		0,44	0,46	0,43	0,42

Anexo 5. Contenido de potasio intercambiable de los suelos estudiados en cada momento de medición (inicio, 30 días y a los 60 días) para cada tratamiento y sus repeticiones.

Sitio	Unidad de suelo	Repetición	K int. inicial	K int. 30 días		K int. 60 días	
				Sin K	Con K	Sin K	Con K
29	Cuchilla Corralito	1	0,2	0,23	0,31	0,17	0,27
		2		0,23	0,25	0,19	0,32
		3		0,18	0,26	0,19	0,22
30	San Manuel	1	1,58	1,28	1,46	1,43	1,30
		2		1,38	1,49	1,42	1,45
		3		1,42	1,40	1,38	1,33
31	Constitución	1	0,38	0,35	0,44	0,33	0,38
		2		0,40	0,40	0,32	0,41
		3		0,38	0,41	0,40	0,43
32	Young	1	0,46	0,52	0,62	0,50	0,65
		2		0,61	0,48	0,48	0,50
		3		0,58	0,55	0,50	s/d
33	Paso Palmar	1	0,15	0,28	0,37	0,30	0,34
		2		0,27	0,37	s/d	0,37
		3		0,32	0,38	0,38	0,40
34	Carpintería	1	0,2	0,28	0,36	0,33	0,37
		2		0,31	0,35	0,32	0,49
		3		0,28	0,36	0,29	0,41
35	Isla Mala	1	0,39	0,49	0,61	0,47	0,64
		2		0,60	0,56	0,51	0,56
		3		0,53	0,66	0,48	0,60
36	Carpintería	1	0,23	0,31	0,36	0,30	s/d
		2		0,32	0,35	0,34	0,39
		3		0,30	0,37	0,34	0,33

Anexo 6. Correlaciones (en negrita) entre todas las variables analizadas o estimadas para los 36 suelos y su significancia.

	Ar	L	Ac	pH H ₂ O	pH KCl	MO	Na	K	Ca	Mg	BT
Ar	1,00										
	0,00										
L	-0,88	1,00									
	0,01	0,00									
Ac	-0,56	0,12	1,00								
	0,01	0,48	0,00								
pH (H ₂ O)	-0,16	-0,07	0,48	1,00							
	0,34	0,67	0,01	0,00							
pH (KCl)	-0,17	-0,06	0,49	0,97	1,00						
	0,29	0,72	0,01	0,01	0,00						
MO	-0,34	0,03	0,68	0,37	0,41	1,00					
	0,03	0,82	0,01	0,02	0,01	0,00					
Na	-0,30	0,29	0,12	-0,15	-0,19	-0,11	1,00				
	0,07	0,08	0,47	0,37	0,26	0,50	0,00				
K	-0,34	0,32	0,17	0,24	0,25	0,41	-0,19	1,00			
	0,03	0,05	0,31	0,14	0,12	0,01	0,25	0,00			
Ca	-0,28	-0,07	0,76	0,82	0,86	0,66	-0,21	0,20	1,00		
	0,08	0,65	0,01	0,01	0,01	0,01	0,20	0,23	0,00		
Mg	-0,28	0,12	0,38	-0,20	-0,26	0,15	0,47	-0,13	-0,02	1,00	
	0,00	0,45	0,01	0,23	0,11	0,36	0,01	0,44	0,88	0,00	
BT	-0,34	-0,04	0,81	0,79	0,82	0,69	-0,15	0,23	0,99	0,10	1,00
	0,04	0,81	0,01	0,01	0,01	0,01	0,37	0,17	0,01	0,54	0,00

Anexo 7. Correlaciones (en negrita) entre todas las variables analizadas o estimadas para los 36 suelos y su significancia.

				pH	pH						
	Ar	L	Ac	H ₂ O	KCl	MO	Na	K	Ca	Mg	BT
Acidez	0,18	0,08	-0,53	-0,08	-0,04	-0,26	-0,02	-0,12	-0,26	-0,43	-0,32
	0,28	0,63	0,01	0,64	0,78	0,12	0,88	0,45	0,12	0,01	0,05
CIC	-0,34	-0,03	0,80	0,79	0,83	0,69	-0,15	0,23	0,99	0,09	0,99
	0,04	0,82	0,01	0,01	0,01	0,01	0,37	0,17	0,01	0,58	0,01
SB	-0,32	-0,02	0,74	0,42	0,40	0,47	0,08	0,21	0,56	0,40	0,61
	0,05	0,86	0,01	0,01	0,01	0,01	0,60	0,20	0,01	0,01	0,01
K no int.	-0,48	0,39	0,34	0,35	0,38	0,55	-0,29	0,85	0,38	-0,25	0,39
	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,01	0,07	0,01	0,01	0,13	0,01
Eq. Fert.	0,20	-0,19	-0,09	-0,04	-0,04	-0,14	0,02	-0,26	-0,08	0,08	-0,08
	0,23	0,25	0,57	0,80	0,70	0,40	0,86	0,11	0,62	0,62	0,61
SK	-0,15	0,38	-0,36	-0,18	-0,19	-0,03	-0,16	0,78	-0,36	-0,27	-0,35
	0,36	0,01	0,02	0,28	0,26	0,85	0,33	0,01	0,03	0,10	0,03

Anexo 8. Correlaciones (en negrita) entre todas las variables analizadas o estimadas para los 36 suelos y su significancia.

	Acidez	CIC	SB	K no int.	Eq. Fert.	SK
Acidez	1,00					
	0,00					
CIC	-0,30	1,00				
	0,07	0,00				
SB	-0,84	0,60	1,00			
	0,01	0,01	0,00			
K no int.	-0,17	0,38	0,29	1,00		
	0,30	0,01	0,08	0,00		
Eq. Fert.	0,04	-0,08	0,01	-0,35	1,00	
	0,77	0,61	0,92	0,03	0,00	
SK	0,21	-0,35	-0,29	0,57	-0,20	1,00
	0,20	0,03	0,07	0,01	0,21	0,00

Ar: Arena **L:** Limo **Ac:** Arcilla **MO:** Materia orgánica **BT:** Bases totales
SB: Saturación de bases **SK:** Saturación de potasio