

**EFFECTO DEL ENCALAMIENTO Y SECAMIENTO SOBRE LA DINÁMICA DEL  
POTASIO EN UN SUELO ANDISOL DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA**

**JULIE VIVIANA MAYA GIRÓN  
ZULY YULIANA DELGADO ESPINOSA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA  
POPAYÁN  
2007**

**EFFECTO DEL ENCALAMIENTO Y SECAMIENTO SOBRE LA DINÁMICA DEL  
POTASIO EN UN SUELO ANDISOL DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA**

**JULIE VIVIANA MAYA GIRÓN  
ZULY YULIANA DELGADO ESPINOSA**

**Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar el título de  
Químico**

**Directora: M.Sc. ISABEL BRAVO REALPE**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA  
POPAYÁN  
2007**

Nota de Aceptación

---

---

---

Director

---

Isabel Bravo Realpe  
M. Sc.

Jurado

---

Liliana Montalvo  
Doctora

Jurado

---

Eliana Valencia  
M. Sc.

**Fecha de sustentación: Popayán, 07 de Febrero de 2007**

*Al Señor nuestro Dios  
Quien ha permitido que la sabiduría dirija y guíe nuestros pasos,  
Quien nos ha dado fortaleza en las adversidades,  
permitiéndonos disfrutar de este nuevo logro  
dedicamos nuestro trabajo*

*A la Virgen Maria por ser abogada nuestra.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A nuestros padres Fabián y Vilma, Lorenzo y Nora, por su amor incondicional, inmenso apoyo y comprensión y por creer en nosotras.*

*A nuestros hermanos Ana María (Mi negra), Yesni, Jhon, Nórída, Nasly, y Fabio por su cariño incondicional.*

*A nuestra Familia quienes nos han entregado su amor y apoyo siempre.*

*A Gaby por su incondicional y gran amistad.*

*A Obeimar por su verdadera amistad.*

*A nuestros amigos: Dario, Betina, Jorge, Leidy, Yamid, Javier (JAY), Juan Carlos (PASTUSO) por todos los momentos compartidos y disfrutados.*

*Muchas gracias a las profesoras Liliana Montalvo y Eliana Valencia por el tiempo y dedicación, y a nuestros profesores quienes ayudaron en nuestra formación.*

*A nuestros compañeros del grupo de Agroquímica, por su amistad y porque siempre estuvieron dispuestos a colaborarnos.*

*A nuestros compañeros de carrera por todos los momentos vividos dentro y fuera del aula.*

*Y muy especialmente a nuestra directora, la profesora Isabel Bravo por su paciencia, apoyo, dirección y entrega.*

*Finalmente, agradecer al Dr. Raúl Zapata y a todo el personal de la Escuela de Geociencias y del Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional – Sede Medellín, por habernos permitido realizar parte de nuestro trabajo.*

*A todas las personas que creyeron en nosotras...*

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
RESUMEN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo General	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
3.1 SUELOS ANDISOLES Y/O ANDOSOSLES	5
3.2 ARCILLAS	6
3.2.1 Arcillas de relación 1:1	6
3.2.2 Arcillas de relación 2:2	7
3.2.2.1 Las Esmeclitas	8
3.2.2.2 Las Micas	9
3.3 POTASIO EN EL SUELO	10
3.3.1 Formas de Potasio en el suelo	10
3.3.1.1 Potasio no disponible	10
3.3.1.2 Potasio lentamente disponible	11
3.3.1.3 Potasio disponible	11
3.4 CICLO DEL POTASIO EN EL SUELO	12
3.4.1 Fracciones de Potasio ( $K^+$ ) en el suelo	12
3.4.1.1 K-No Intercambiable	12
3.4.1.1.1 K-Estructural	13
3.4.1.1.2 K-Fijo	13
3.4.1.2 K-Intercambiable	13
3.4.1.3 K-Solución	14
3.5 POTASIO PRESENTE EN LAS ARCILLAS DEL SUELO	14
3.6 MOVIMIENTO DEL POTASIO EN EL SUELO	17
3.7 DINÁMICA DEL POTASIO EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA	18
3.7.1 Pérdidas de Potasio en el suelo	18
3.7.1.1 Erosión	19
3.7.1.2 Lixiviación	19
3.7.1.3 Relaciones K, P, N	19
3.8 EL POTASIO EN LAS PLANTAS	20
3.8.1 Funciones del potasio en las plantas	20
3.8.2 Efectos de la carencia de Potasio en la planta	22
3.9 FUNDAMENTOS DE ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA BASADA EN ATOMIZACIÓN CON LLAMA	23
3.9.1. Atomización de la muestra	23
3.9.2. Fuentes de espectros	24

3.9.3. Atomización con llama	24
3.9.4. Atomizadores de llama	24
3.9.5. Curvas de calibración	25
4. METODOLOGÍA	26
4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	26
4.2. TOMA DE MUESTRAS	26
4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL SUELO	27
4.3.1 Análisis Físicos	27
4.3.1.1 Humedad de campo	27
4.3.1.2 Humedad	27
4.3.1.3 Densidad real	27
4.3.1.4 Densidad aparente	28
4.3.1.5 Textura	28
4.3.2 Análisis Químicos	28
4.3.2.1 pH	28
4.3.2.2 Acidez Intercambiable	28
4.3.2.3 Materia Orgánica	29
4.3.2.4 Determinación de Nitrógeno por el método de Kjeldhal	29
4.3.2.5 Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	30
4.3.2.6 Determinación de las Bases de Cambio Ca, Mg, Na y K	30
4.4. EXTRACCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE POTASIO	30
4.4.1 Caracterización de Potasio	33
4.4.1.1 Potasio Soluble	35
4.4.1.2 Potasio Intercambiable	35
4.4.1.3 Potasio No Intercambiable	36
4.4.1.4 Potasio Total	37
4.4.1.5 Potasio del enrejado cristalino	37
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	38
5.1 ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL SUELO	38
5.2 FRACCIONAMIENTO O FORMAS DE POTASIO EN EL SUELO	41
5.2.1. Análisis de las formas de K en el Suelo con Humedad de Campo	41
5.2.1.1 Potasio Soluble	41
5.2.1.2 Potasio Intercambiable	43
5.2.1.3 Potasio No Intercambiable	44
5.2.2 Análisis de las formas de K en el Suelo Seco	48
5.2.2.1 Potasio Soluble	48
5.2.2.2 Potasio Intercambiable	48
5.2.2.3 Potasio No Intercambiable	50
5.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	54
6. CONCLUSIONES	64
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXOS	69

## LISTA DE TABLAS

		Pág.
<b>Tabla 1</b>	Sistemas enzimáticos estimulados por el K <sup>+</sup> o por otros cationes monovalentes	22
<b>Tabla 2</b>	Diseño Experimental	31
<b>Tabla 3</b>	Parámetros para la determinación de potasio por EAA	34
<b>Tabla 4</b>	Análisis físicos y químicos de la muestra de suelo	39
<b>Tabla 5</b>	Reacciones de la hidrólisis de Al-polimérico	38
<b>Tabla 6</b>	Formas de potasio en el suelo con humedad de campo	42
<b>Tabla 7</b>	Formas de potasio en el suelo seco	49
<b>Tabla 8</b>	Prueba de Kruskal-Wallis	54
<b>Tabla 9</b>	Análisis de varianza para las diferentes formas de K	54
<b>Tabla 10</b>	Prueba de DUNCAN para resultados de K Soluble	56
<b>Tabla 11</b>	Prueba de DUNCAN para resultados de K Intercambiable	58
<b>Tabla 12</b>	Prueba de DUNCAN para resultados de K Fijado	61
<b>Tabla 13</b>	Prueba de DUNCAN para resultados de K del Enrejado Cristalino	62
<b>Tabla 14</b>	Prueba de DUNCAN para resultados de K Total	63



## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Fases del suelo	4
<b>Figura 2.</b> Estructura de una arcilla tipo 1:1 (Caolinita).	6
<b>Figura 3.</b> Familia de los caolines	7
<b>Figura 4.</b> Estructura de una arcilla tipo 2:1 (esmectita)	8
<b>Figura 5.</b> Grupo de las Esmectitas	9
<b>Figura 6.</b> Grupo de las Micas	9
<b>Figura 7.</b> Dinámica entre las diferentes formas de K en el suelo	11
<b>Figura 8.</b> Ciclo del potasio en el suelo	12
<b>Figura 9.</b> Modelo de arcilla expansible con las posiciones p, e, i de iones potasio	14
<b>Figura 10.</b> Movimiento del potasio hacia las plantas por el proceso de difusión	17
<b>Figura 11.</b> Ubicación geográfica de la vereda La Aurelia del Departamento del Cauca	26
<b>Figura 12.</b> Equipo de absorción atómica PERKIN ELMER AANALYST 300	34
<b>Figura 13.</b> Extracción para potasio soluble	35
<b>Figura 14.</b> Extracción para potasio intercambiable	36
<b>Figura 15.</b> Extracción para potasio no intercambiable	36
<b>Figura 16.</b> Extracción para potasio total	37
<b>Figura 17.</b> Formas de potasio en el suelo con humedad de campo (Sin encalar)	46
<b>Figura 18.</b> Formas de potasio en el suelo con humedad de campo (Encalado)	47
<b>Figura 19.</b> Formas de potasio en el suelo seco (Sin encalar)	52
<b>Figura 20.</b> Formas de potasio en el suelo seco (Encalado)	53

## ANEXOS

		Pág.
<b>ANEXO 1</b>	Parámetros de comparación para niveles de fertilidad en suelos de clima medio (SCCS. 2000)	69
<b>Tabla 1</b>	Clasificación de las partículas del suelo	69
<b>Tabla 2</b>	Niveles de densidad real	69
<b>Tabla 3</b>	Niveles de MO en suelos de clima medio	69
<b>Tabla 4</b>	Clasificación de acidez de suelos de acuerdo al valor de pH	69
<b>Tabla 5</b>	Toxicidad de aluminio en el suelo	70
<b>Tabla 6</b>	Clasificación del suelo de acuerdo a niveles de Ca, Mg y K	70
<b>ANEXO 2</b>		71
<b>Tabla 1</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo testigo (T1)	71
<b>Tabla 2</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo fortificado con Nivel 1 de Fertilizante (17:6:18:2) (T2).	72
<b>Tabla 3</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo fortificado con Nivel 1 de Sal Analítica (KCl) (T3).	73
<b>Tabla 4</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo fortificado con Nivel 2 de Fertilizante (17:6:18:2) (T4).	74
<b>Tabla 5</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo fortificado con Nivel 2 de Sal Analítica (KCl) (T5).	75
<b>Tabla 6</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo encalado (T6).	76
<b>Tabla 7</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo encalado fortificado con Nivel 1 de Fertilizante (17:6:18:2) (T7).	77
<b>Tabla 8</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo encalado fortificado con Nivel 1 de Sal Analítica (KCl) (T8).	78
<b>Tabla 9</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo encalado fortificado con Nivel 2 de Fertilizante (17:6:18:2) (T9).	79
<b>Tabla 10</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo encalado fortificado con Nivel 2 de Sal Analítica (KCl) (T10).	80
<b>Tabla 11</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco testigo (T11).	81

<b>Tabla 12</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco fortificado con Nivel 1 de Fertilizante (17:6:18:2) (T12).	82
<b>Tabla 13</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco fortificado con Nivel 1 de Sal Analítica (KCl) (T13).	83
<b>Tabla 14</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco fortificado con Nivel 2 de Fertilizante (17:6:18:2) (T14)	84
<b>Tabla 15</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco fortificado con Nivel 2 de Sal Analítica (KCl) (T15)	85
<b>Tabla 16</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco encalado (T16)	86
<b>Tabla 17</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco encalado fortificado con Nivel 1 de Fertilizante (17:6:18:2) (T17)	87
<b>Tabla 18</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco encalado fortificado con Nivel 1 de Sal Analítica (KCl) (T18)	88
<b>Tabla 19</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco encalado fortificado con Nivel 2 de Fertilizante (17:6:18:2) (T19)	89
<b>Tabla 20</b>	Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco encalado fortificado con Nivel 2 de Sal Analítica (KCl) (T20)	90

## LISTA DE ACRÓNIMOS

**N:** Nitrógeno

**meq:** miliequivalentes

**Al:** Aluminio

**K:** Potasio

**Ca:** Calcio

**Na:** Sodio

**Mg:** Magnesio

**MO:** Materia orgánica

**SS:** Suelo Seco

**Ca/Mg:** Relación Calcio / Magnesio

**CIC:** Capacidad de Intercambio Catiónico

**CIC<sub>EFE</sub>** : Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva

**C/N:** Relación Carbono Nitrógeno

**NaOH:** Hidróxido de Sodio

**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:** Ácido Sulfúrico

**HNO<sub>3</sub>:** Ácido Nítrico

**KCl:** Cloruro de Potasio

**HCl:** Ácido Clorhídrico

**K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>:** Dicromato de Potasio

## RESUMEN

La disponibilidad del Potasio (K) en el suelo está determinada por la dinámica de su reposición entre las distintas formas presentes en el suelo y su extracción por los cultivos. Para tener un manejo racional de los fertilizantes, interesa saber cuáles son las entradas y salidas de K en el sistema suelo-planta. Considerando la importancia que tiene el K para los cultivos del Departamento del Cauca y sabiendo que es un elemento requerido en niveles relativamente altos, se realiza un fraccionamiento de las diferentes formas de potasio presentes en un suelo de la vereda La Aurelia (Municipio de Cajibío), tales como: K soluble, K intercambiable, K fijado, K del enrejado cristalino y K total, de acuerdo a la metodología reportada por Garavito <sup>(3)</sup>. Además, de la caracterización de estas formas de potasio también se utilizan diferentes tratamientos en el suelo, para fortificar, encalar y secar según la metodología reportada por Gómez y otros <sup>(18)</sup>. La determinación se realiza mediante espectrofotometría de absorción atómica de forma directa.

Se realizan 20 tratamientos con 3 réplicas cada uno, en los cuales se observa que el suelo supe sus necesidades de potasio para un suelo fértil, desde la primera aplicación de fuentes, como **Fertilizante (17:6:18:2)** y **Sal Analítica (KCl)**. Así mismo, se observa que para las formas disponibles de K (K soluble y K intercambiable), el suelo incrementa su contenido con el proceso de secamiento, debido a que se elimina agua y por lo tanto, la concentración de iones K<sup>+</sup> presentes en la solución del suelo aumenta.

En este tipo de suelos, no se presenta fijación en ninguno de los tratamientos utilizados, contrario a esto se produce una liberación del K fijado hacia las formas más disponibles para la planta hasta el punto de producir pérdidas por lixiviación, indicando que no hay presencia de arcillas tipo 2:1 sino arcillas tipo 1:1, características de este tipo de suelos (Andisoles). Se encuentra además que el suelo contiene una alta reserva de potasio en la red cristalina de los minerales primarios, y al fortificar, encalar y secar el suelo esta reserva empieza a ser liberada, de tal forma que el equilibrio dinámico se desplaza hacia las formas intercambiable y soluble.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

---

### 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los suelos del Departamento del Cauca generalmente son de naturaleza fuertemente ácida, afectando así la disponibilidad de la mayoría de los macronutrientes esenciales para los cultivos, ya sea por fijación como en el caso de los nutrientes aniónicos o por lixiviación de bases de cambio como el potasio, dando como resultado fuertes deficiencias de este último nutriente. Por esta razón, como práctica agrícola se utiliza el encalamiento, con el propósito no solamente de subir el valor de pH sino de disminuir la cantidad de aluminio presente en la solución del suelo. Sin embargo, este tipo de tratamiento conduce a la fijación del potasio dentro de las láminas de arcilla, en especial las de tipo 2:1, ya que su tamaño le permite encajarse perfectamente dentro de los huecos de estas láminas, proceso que es prácticamente irreversible. Como consecuencia de lo anterior siempre se presentan fuertes deficiencias de este nutriente influyendo negativamente en el rendimiento y la calidad del cultivo. Además, la deficiencia de potasio aumenta la vulnerabilidad del cultivo a enfermedades y lo hace menos resistente a condiciones de "stress" tales como sequías, heladas etc. Por esto, los agricultores para obtener cosechas satisfactorias, se ven obligados a aplicar repetidas dosis de fertilizantes, afectando cada vez más, el rendimiento económico de los cultivos.

Entre las fuentes de este elemento se utilizan fertilizantes como: cloruro de potasio (KCl), nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ), hidróxido de potasio (KOH) entre otros, que producen una reacción ácida en el suelo, generando así serios problemas de contaminación en los diferentes compartimentos ambientales, ya que posteriormente pueden por solubilización y percolación pasar a niveles freáticos y cuerpos de agua causando procesos de eutrofización. Por esto, la estrategia de fertilización sustentable debe tener como meta maximizar el aprovechamiento del K agregado, y al mismo tiempo minimizar las pérdidas del K fuera del agroecosistema.

Con base en las consideraciones anteriores, en el presente trabajo se pretende evaluar la dinámica del Potasio en un suelo del Departamento del Cauca dedicado al cultivo de café previo encalamiento, con el propósito de contribuir a aumentar la eficacia de la fertilización de este nutriente y disminuir así las grandes aplicaciones de fertilizantes potásicos que causan no solo una seria disminución en el rendimiento económico del cultivo sino problemas de contaminación en los diferentes compartimentos ambientales.

### 2. OBJETIVOS

#### 2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar las diferentes formas de potasio y su disponibilidad en un suelo andisol del Departamento del Cauca, valorando el efecto del enclamiento y secamiento del suelo sobre cada una de ellas.

#### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

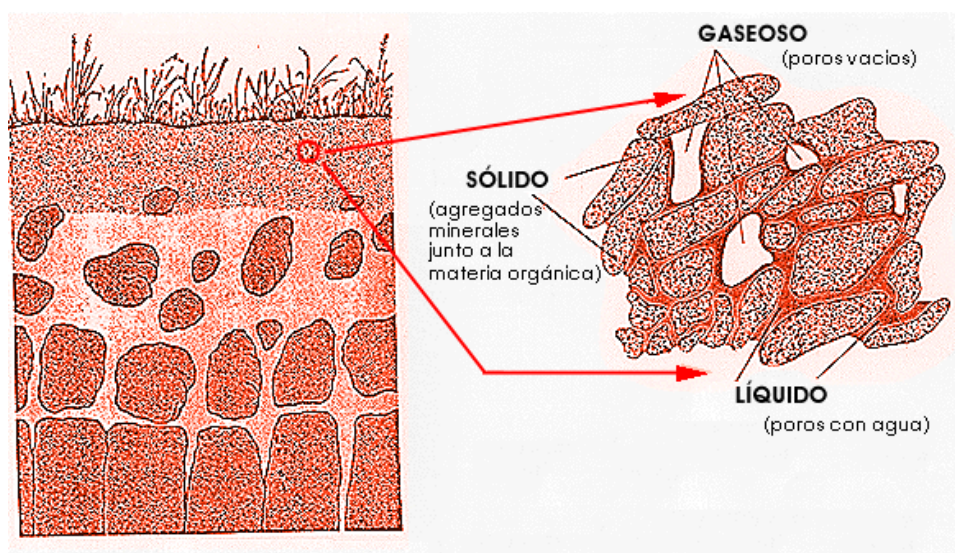
- Caracterizar física y químicamente el suelo a estudiar.
- Cuantificar las diferentes formas de potasio presentes en el suelo, tales como: soluble, intercambiable, no intercambiable (fijado), total y del enrejado cristalino, mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica.
- Evaluar el efecto del enclamiento y del secamiento sobre las diferentes formas de potasio presentes en este suelo.

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El suelo es la capa fina de material fértil que recubre la superficie de la Tierra y es la fase que soporta los cultivos. Está constituido por tres fases: fase sólida (materia mineral 45% y materia orgánica 5%), fase líquida (25%) y fase gaseosa (25%) (Figura 1). Como consecuencia de estas tres fases el suelo presenta unas determinadas propiedades que dependen de la estructura y constitución de sus componentes.

Figura 1. Fases del suelo



La fase líquida constituye el medio ideal que facilita la reacción entre las tres fases, pero también se producen reacciones dentro de cada fase.

Los minerales constituyen la base del almacén sólido que soporta al suelo. Cuantitativamente en un suelo normal la fracción mineral representa de un 45-49% del volumen del suelo. Pero dentro de la fase sólida constituyen, para un suelo representativo, del orden del 90-99% (el 10-1% restante corresponde a la materia orgánica). La fase sólida representa la fase más estable del suelo y por tanto es la más representativa y la más ampliamente estudiada. Es una fase muy heterogénea, formada por constituyentes tanto inorgánicos, como orgánicos y organominerales. La fase sólida contiene normalmente pequeños fragmentos de roca y minerales. Las cuatro clases más importantes de partículas inorgánicas (minerales) son: grava, arena, limos y arcillas. Estas últimas son las más importantes desde el punto de vista de reacción en el suelo, ya que constituyen la fracción activa del suelo. <sup>(1)</sup>



### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

---

#### 3.1. SUELOS ANDISOLES Y/O ANDOSOLES

Los Andisoles, para el Soil Taxonomic (USDA, 1988) o los Andosoles para el Sistema FAO (FAO, UNESCO, 1988) son suelos relativamente jóvenes con unas propiedades únicas que los distinguen. Usualmente, aunque no siempre, se desarrollan a partir de piroclastos como ceniza volcánica, tufitas, pómez, cinders, lahar y otros. Reunidos todos en una palabra que los identifica como tefra, por lo que son de muy variada composición mineralógica. Lo anterior hace que se encuentren asociados a las zonas volcánicas del mundo, en un amplio rango de climas, latitudes y altitudes. Los únicos requisitos para que se formen son: suficiente lluvia para una rápida meteorización de las tefras, producción y acumulación de materia orgánica y un buen drenaje <sup>(2)</sup>.

Dentro de las características químicas de estos suelos resaltan los valores de pH ácidos y ligeramente ácidos, las bajas saturaciones de bases, las altas capacidades de intercambio, la alta retención fosfórica, al igual que los valores altos en materiales orgánicos, con dominancia de compuestos de bajo grado de polimerización y abundantes huminas.

Las características y propiedades de los Andisoles y su localización, muchas veces en condiciones de pendientes pronunciadas y alta humedad, los hacen susceptibles a la degradación estructural y a la erosión en sus diferentes manifestaciones, en especial cuando se ha eliminado la cobertura del bosque y el sombrío en los cafetales. <sup>(2)</sup>.

Los Andisoles Colombianos están ampliamente distribuidos en la Región Andina del país, especialmente en la cordillera Central. En las cordilleras Occidental y Oriental también se presenta pero, comparativamente con la Central, en menor proporción. Las características generales y dominantes del medio natural donde se presentan estos suelos están influenciadas por la presencia de cenizas volcánicas, especialmente en aquellas zonas muy húmedas y pluviales, que constituyen pisos altitudinales que varían entre el premontano (24°C) hasta el montano (6-12°C) y donde los regímenes de humedad son muy altos. Los materiales orgánicos se presentan en cantidades muy altas (105-6% de C.O). La erosividad varía de acuerdo con las cordilleras, predominando la media y alta en la Central y Occidental y la baja en la Oriental. El material parental predominante de los Andisoles del país es el piroclástico y, fundamentalmente, el de las cenizas volcánicas <sup>(3)</sup>.

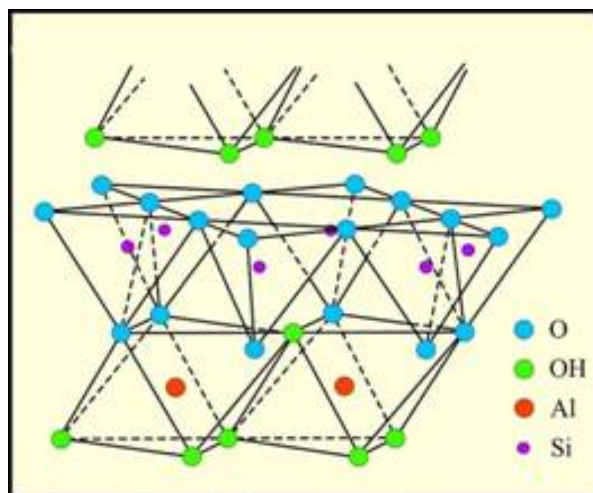
#### 3.2 ARCILLAS

El término arcilla se refiere a las partículas minerales más pequeñas del suelo (menos de 2 micrones de diámetro). Se forman en el proceso de pedogénesis a partir de las alteraciones químicas de los minerales de las rocas que originan los suelos. Las arcillas son cristalinas y están formadas por capas en arreglos laminares de varios elementos químicos, fundamentalmente el oxígeno, el silicio y el aluminio en forma de capas de tetraedros de silicio y de octaedros de aluminio. Los filosilicatos naturales (arcillas) están formados por la combinación de láminas de tetraedros de silicio con octaedros de aluminio, magnesio o hierro. De acuerdo a la combinación de estas láminas, existen dos tipos de arcillas las de Relación 1:1 y las de Relación 2:1 <sup>(3)</sup>.

##### 3.2.1 Arcillas de relación 1:1

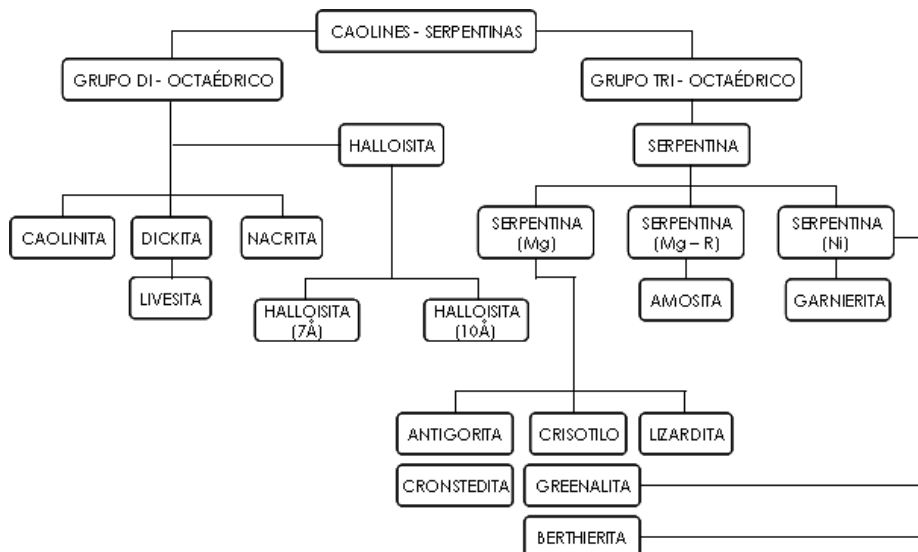
Como los oxígenos apicales de la lámina de tetraedros de silicio tienen una carga sin satisfacer, esta estructura no es estable y pueden estos oxígenos entrar a ocupar posiciones correspondientes a grupos OH de una lámina de octaedros. (Figura 2).

**Figura 2. Estructura de una arcilla tipo 1:1 (Caolinita).**

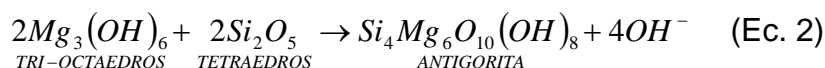
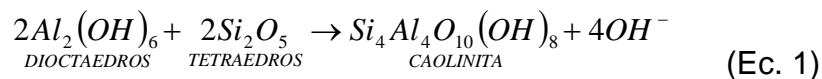


En esta forma se originan láminas dobles de tetraedros-octaedros, razón por la cual los minerales con este tipo de estructura son llamados de relación 1:1. (Figura 3).

**Figura 3. Familia de los caolines**



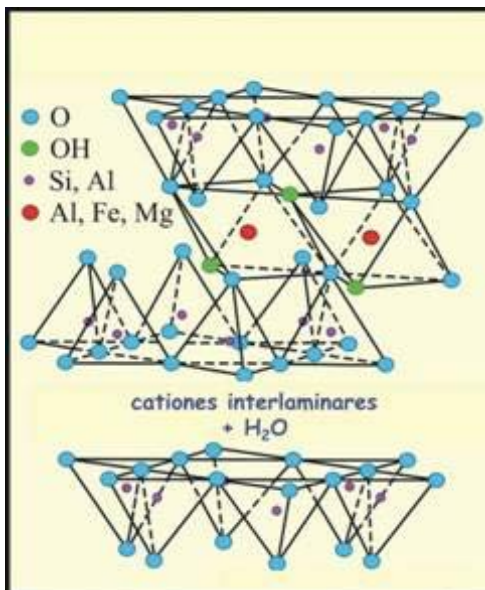
El origen de estos minerales puede explicarse también por medio de reacciones químicas, de acuerdo a las ecuaciones 1 y 2: <sup>(3)</sup>



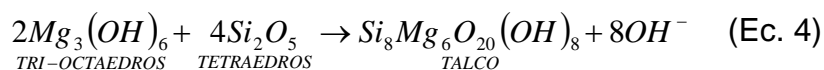
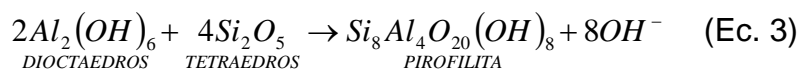
#### 3.2.2 Arcillas de relación 2:1

De la misma forma como se acopló una capa de tetraedros por el lado superior de una capa de octaedros eliminando cuatro OH<sup>-</sup> para formar la caolinita, podrá acoplarse otra capa tetraédrica por el lado opuesto eliminando cuatro OH<sup>-</sup> más para formar una lámina triple de tetraedro-octaedro-tetraedro. Estos minerales son llamados de relación 2:1 por tener dos capas de tetraedro separadas por una de octaedros. (Figura 4).

Figura 4. Estructura de una arcilla tipo 2:1 (esmectita)



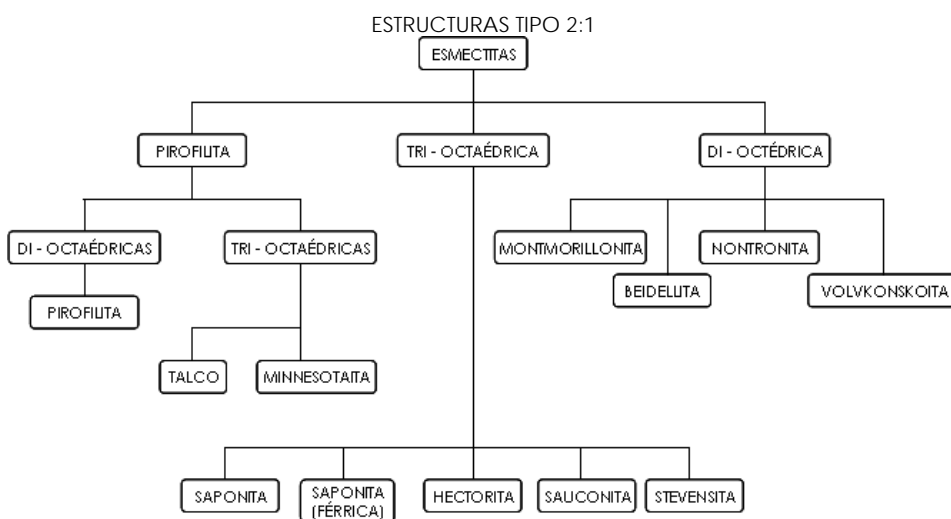
Como en el caso de las arcillas 1:1, la capa de octaedros puede ser di o tri-octaédrica, según sea de aluminio o de magnesio. Las reacciones correspondientes se presentan en las ecuaciones 3 y 4, como sigue: <sup>(3)</sup>



#### 3.2.2.1 Las Esmectitas

A este grupo pertenecen las arcillas que antiguamente se denominaban montmorillonitas. La capa octaédrica de estas arcillas puede ser di o tri-octaédrica, por lo cual pueden considerarse derivadas del talco y la pirofilita por diferente grado de sustitución isomórfica. Las principales arcillas de este grupo son: Montmorillonita [(Al<sub>1.67</sub>,Mg<sub>0.33</sub>)Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> nH<sub>2</sub>O], Beidelita [Al<sub>2</sub>(Si<sub>3.6</sub>,Al<sub>0.33</sub>)O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> nH<sub>2</sub>O], Nontronita [Fe<sup>3+</sup>(Si<sub>3.6</sub>,Al<sub>0.33</sub>)O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>nH<sub>2</sub>O], Hectorita [(Mg<sub>2.6</sub>,Li<sub>0.33</sub>)Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> nH<sub>2</sub>O] y Saponita [(Fe<sup>2+</sup>,Mg)<sub>3</sub>(Si<sub>3.6</sub>,Al<sub>0.33</sub>)O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> nH<sub>2</sub>O]. (Figura 5) <sup>(3)</sup>.

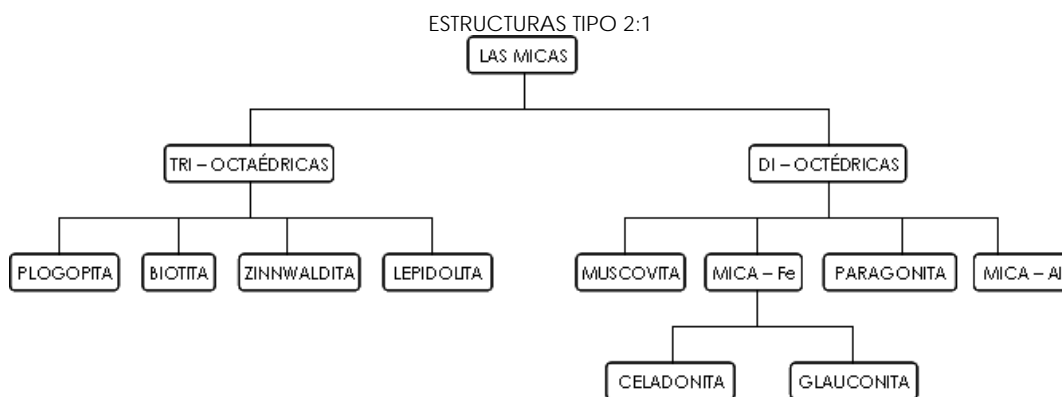
**Figura 5. Grupo de las Esmeectitas.**



#### 3.2.2.2 Las Micas

Se originan por sustitución de silicio por aluminio en la capa tetraédrica e inclusión de K entre las láminas para balancear las cargas. En estas condiciones, las láminas se fijan unas a otras haciendo que su estructura no sea expansible, ni sus cationes interlaminares intercambiables. A este grupo pertenecen las micas, tales como, Muscovita  $[KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2]$ , Biotita  $[K(Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Mn)_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2]$  y la Plogopita  $[KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2]$ . (Figura 6) <sup>(3)</sup>.

**Figura 6. Grupo de las Micas**



### 3.3 POTASIO EN EL SUELO

El potasio ocupa el octavo lugar de abundancia en la corteza terrestre. El contenido de potasio en el suelo varía ampliamente de acuerdo con el tipo de roca madre y el grado de intemperismo. En general, suelos derivados de rocas básicas y suelos muy intemperizados son los que tienen menores contenidos. Las cantidades encontradas van del 1 al 3%, del cual entre el 90-98% forma parte de minerales primarios (difícilmente aprovechable), del 1-10% se encuentra fijado entre las láminas de arcillas 2:1 (moderadamente aprovechable) y del 1-2% corresponde a las formas intercambiables y solubles (rápidamente aprovechables).

Las fuentes minerales nativas son los feldespatos potásicos ( $KAlSi_3O_8$ ) y las micas (Muscovita, Biotita y Plogopita). La naturaleza del potasio en el suelo es netamente mineral, las cantidades de este elemento nutricional esencial son relativamente altas en la mayoría de los suelos de clima frío y templado y existen niveles bajos en suelos cálidos tropicales debido al alto grado de meteorización <sup>(4)</sup>.

#### 3.3.1 Formas de potasio en el suelo

A pesar de que la mayoría de los suelos contienen miles de kilogramos de K, a menudo más de 20000Kg/Ha, sólo una pequeña cantidad está disponible para la planta durante el ciclo de crecimiento, probablemente menos del 2%. El K está presente en el suelo en tres formas: no disponible, lentamente disponible y disponible.

##### 3.3.1.1 Potasio no disponible

El K no disponible es retenido fuertemente en la estructura de los minerales primarios del suelo (rocas). Este K es liberado a medida que los minerales se meteorizan o descomponen por acción de agentes ambientales como temperatura y humedad, pero esta liberación es tan lenta que el K no está disponible para las plantas en un ciclo de crecimiento en particular. El proceso de meteorización es tan lento que toma cientos de años para acumular cantidades significativas de K disponible en el suelo. Generalmente, los suelos de regiones cálidas y húmedas son más meteorizados que aquellos de climas fríos y áridos. Los suelos menos meteorizados son más ricos en K que aquellos que han soportado la prolongada acción de altas temperaturas y humedad <sup>(4)</sup>.

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 3.3.1.2 Potasio lentamente disponible

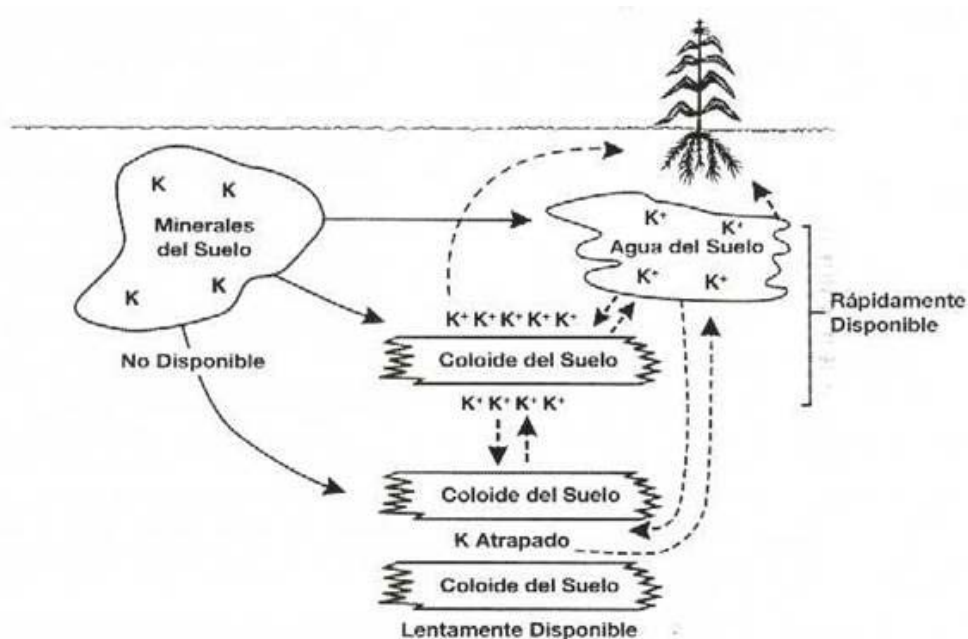
El K lentamente disponible es aquel que queda atrapado o fijado entre las capas de arcillas del suelo tipo 2:1. Estas arcillas se contraen o se expanden cuando el suelo está seco o húmedo. La contracción y expansión de las capas de las arcillas atrapa los iones K haciéndolos no disponibles o lentamente disponibles. Los suelos viejos muy meteorizados no contienen cantidades significativas de estas arcillas. Los suelos arenosos contienen reservas más pequeñas de K lentamente disponible en comparación con aquellos suelos que contienen mayores cantidades de arcilla <sup>(4)</sup>.

#### 3.3.1.3 Potasio disponible

El K disponible es aquel que se encuentra en la solución del suelo y el K que está retenido en forma intercambiable por la materia orgánica y las arcillas tipo 2:1 del suelo.

La Figura 7 ilustra las tres formas de K en el suelo (no disponible, lentamente disponible y disponible). Además, indica como las diferentes formas de K se relacionan entre sí y su disponibilidad para la planta <sup>(4)</sup>.

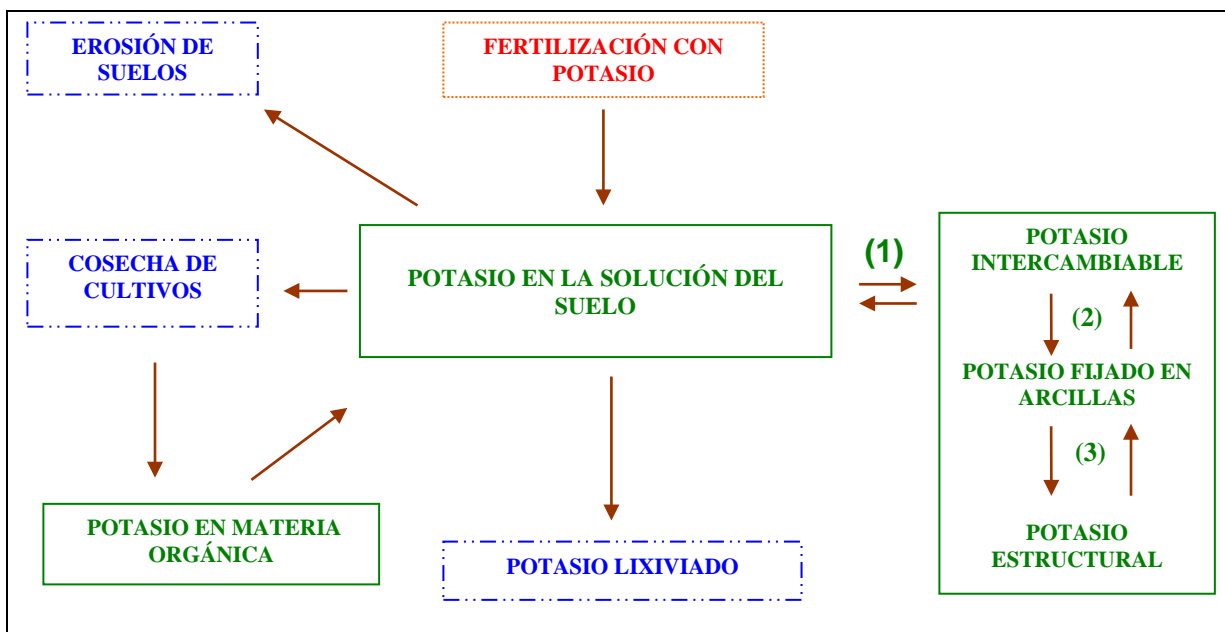
**Figura 7. Dinámica entre las diferentes formas de K en el suelo.**



#### 3.4. CICLO DEL POTASIO EN EL SUELO

La Figura 8 muestra las formas más importantes de K en el suelo, y los procesos que las relacionan. <sup>(5)</sup>

Figura 8. Ciclo del potasio en el suelo



#### Referencias



- (1) = Adsorción - Desorción
- (2) = Fijación - Liberación
- (3) = Cristalización - Meteorización

#### 3.4.1 FRACCIONES DE POTASIO (K<sup>+</sup>) EN EL SUELO

**3.4.1.1 K-NO INTERCAMBIABLE:** El potasio no intercambiable se encuentra lentamente disponible en el suelo y lo componen dos formas de potasio que están fuertemente unidas a la fase sólida mineral, las cuales se denominan "K fijado" y "K estructural" que representan el K de reserva o de reposición de los suelos. Ambas formas son denominadas no-intercambiables <sup>(5)</sup>.



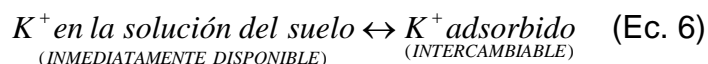
### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

**3.4.1.1.1 K-ESTRUCTURAL:** El potasio estructural, es el que se encuentra retenido fuertemente por minerales primarios-Rocas y no es disponible hasta la meteorización de los mismos <sup>(5)</sup>.

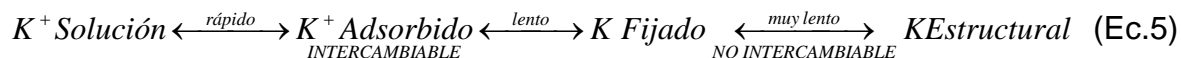
**3.4.1.1.2 K-FIJO:** El potasio fijo, se encuentra retenido moderadamente por arcillas 2:1 (Illitas, Vermiculitas), está ubicado en el espacio hexagonal de las láminas de silicio y puede o no ser liberado a la solución del suelo según la humedad del mismo y condiciones de temperatura.

**3.4.1.2 K-INTERCAMBIABLE:** El potasio intercambiable es el más dinámico en el suelo y se encuentra retenido de forma intercambiable por los coloides de la materia orgánica y por las arcillas.

Este potasio intercambiable es la forma iónica ( $K^+$ ) unido electrostáticamente a los materiales que componen la fase sólida coloidal mineral y orgánica. 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. Existe un equilibrio entre las dos fracciones que puede ser representado por el numeral (1) en la Figura 8. El proceso es instantáneo y se representa en la ecuación 6: <sup>(5)</sup>



Se produce un equilibrio entre el K intercambiable y las formas no-intercambiables (K-Estructural y K-Fijo). Dicho equilibrio es mucho más lento que cuando ocurre con el potasio de la solución del suelo. El mecanismo de reposición y equilibrio entre las formas, se muestra en la Figura 8 con los números (2) y (3) y se puede representar en la ecuación 5:



La fuente inmediata de K para las plantas es el K disuelto en la solución del suelo; la reposición que mantiene su nivel estable es en primer lugar, la forma intercambiable y luego el K de reserva. 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, el K intercambiable mucho más abundante, restablece rápidamente la concentración en la solución. El K no intercambiable, fundamentalmente el fijado, es la fracción que regula el abastecimiento al K disponible del sistema en períodos de alta demanda <sup>(5)</sup>.

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

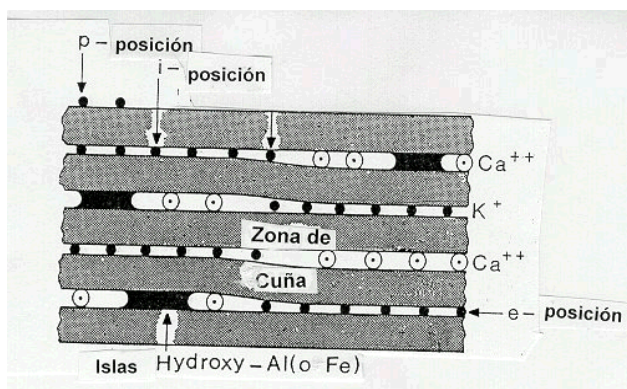
**3.4.1.3 K-SOLUCIÓN:** El potasio en la solución del suelo, es el directamente aprovechable por las plantas y puede ser absorbido a través de las raíces en forma inmediata, constituye la despensa inmediata para los cultivos; sin embargo, las cantidades presentes son muy pequeñas, apenas una mínima porción del K total del suelo se encuentra en esta forma. Las plantas en crecimiento rápidamente extraen el K de la solución del suelo, pero a medida que el K es absorbido y extraído, su concentración es renovada y restituida inmediatamente por la transferencia de formas menos fácilmente accesibles ubicadas en las zonas de adsorción de los coloides minerales y orgánicos del suelo. El proceso de adsorción-desorción repone y equilibra la concentración de K de la solución del suelo. La rapidez de restitución del potasio de la fase sólida a la solución del suelo y por consiguiente a la disponibilidad hacia las plantas depende de la capacidad Buffer de este suelo, la cual es un factor indicador de potasio disponible en solución. El K de la solución más el intercambiable, es comúnmente denominado K "disponible" y medido en los análisis convencionales para evaluar la fertilidad del suelo <sup>(5)</sup>.

### 3.5. POTASIO PRESENTE EN LAS ARCILLAS DEL SUELO

La reserva de K intercambiable y no-intercambiable depende fundamentalmente de la cantidad y calidad de arcillas presentes en el suelo.

En la Figura 9 se observan las diferentes posiciones que los iones  $K^+$  presentan en las arcillas. 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 y las interlaminares (**i**) presentan la mayor selectividad para este catión. <sup>(5)</sup>

**Figura 9. Modelo de arcilla expansible con las posiciones p, e, i de iones potasio.**



### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

---

Cuanto más débilmente estén retenidos los cationes en la arcilla, más fácilmente serán "intercambiables" y podrán ser liberados a la solución del suelo. La dinámica de las condiciones en el suelo puede provocar que los iones  $K^+$  que están mantenidos fuertemente entre las capas de arcilla (K fijado), se liberen al separarse las mismas por ensanchamiento y expansión. De esta manera, estas formas de potasio pueden ser liberadas y equilibrar al potasio intercambiable y al de la solución del suelo. También puede pasar que al penetrar los iones  $K^+$  en el espacio interlaminar, éste cierre nuevamente las laminillas, dejando así los iones en una condición difícilmente accesible, llamada K fijado <sup>(6)</sup>.

Existen muchos tipos diferentes de arcillas, pero en general pueden definirse cuatro grupos que muestran diferencias importantes con respecto al K. Los tres primeros grupos son cristalinas-laminares y el último es no cristalino o paracristalino <sup>(5)</sup>.

El primer grupo, mineral **caolinítico** (bilaminar 1:1, no expandible), puede adsorber K solamente en su superficie y en sus bordes rotos o quebrados, ellos no adsorben K con mucha fuerza. Los minerales caoliníticos no tienen posiciones de cambio interlaminares para adsorber K y además tienen una baja capacidad de cambio, por lo tanto contienen muy poco K intercambiable, comportándose casi como la arena o la materia orgánica en lo referente a la dinámica de este nutriente. Si bien no fijan K, como tampoco lo retienen, son muy sensibles a las pérdidas por lixiviación. En este sentido, los suelos caoliníticos se comportan aproximadamente igual a los arenosos, suelos pobres y sin poder de reposición del K <sup>(5)</sup>.

El segundo grupo, los minerales **illíticos** (trilaminar 2:1, no expandente) son las arcillas con mayor contenido de K. Contienen K en su superficie, en sus bordes, y entre las capas de los cristales. Estas arcillas mantienen el K mucho más fuertemente que las arcillas caoliníticas, conteniendo gran proporción en forma <sup>(5)</sup>.

El tercer grupo de minerales de arcilla es el de las **esmectitas** (trilaminar 2:1 expandente). Este grupo mantiene el K en forma intercambiable en superficie y también profundamente entre las capas expansibles cuando el suelo está húmedo. Cuando estas capas se cierran, al volverse las condiciones ambientales más secas, el espacio intercapas se contrae, atrapando y "fijando" el K que es difícilmente liberado nuevamente a la solución del suelo <sup>(5)</sup>.

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

---

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. También hay que tener en cuenta que algunos minerales arcillosos trilaminares como illita, vermiculita y tetralaminares como clorita, adsorben  $K^+$  selectivamente. La montmorillonita presenta una selectividad intermedia, menor que la illita. Cuanto más débilmente estén retenidos los cationes en la arcilla, más fácilmente se intercambian con otros cationes de la solución del suelo. De esta manera se puede distinguir el K en la arcilla; puede estar en una condición difícilmente accesible (K fijado) o ligado débilmente y por tanto fácilmente intercambiable <sup>(7)</sup>.

Los ciclos de humedad y secamiento que ocurren en las condiciones normales de campo influyen en la disponibilidad de  $K^+$  a partir de arcillas; cuando las arcillas se humedecen se expanden y cuando se secan se contraen, de esa manera el  $K^+$  atrapado podría liberarse de las arcillas expansibles. No obstante esta liberación no es completa, puesto que la energía de enlace entre el potasio y la lámina de sílice puede superar la fuerza hidratante. La repetición de este ciclo: humectación-deseccación, puede ayudar a la liberación lenta del  $K^+$  fijado <sup>(7)</sup>. A medida que ocurre la deshidratación y fijación, las láminas arcillosas se juntan, siendo difícil su separación con la rehidratación. Simultáneamente la capacidad de intercambio catiónico disminuye debido al bloqueo de cargas negativas presentes en las intercapas <sup>(8)</sup>.

El efecto del secamiento del suelo en la fijación de  $K^+$  fue reportado por Volk <sup>(9)</sup>, formulando los siguientes postulados sobre fijación de  $K^+$ :

1. La fijación aumenta cuando el suelo se seca.
2. La fijación no sólo depende del tamaño sino del tipo de arcilla, suelos con caolinita o con óxidos de hierro, a pesar de ser arcillosos no fijan  $K^+$ .
3. Al tratar el suelo con HCl disminuye la fijación, mientras que cuando se agrega  $Na_2CO_3$  o  $Ca(OH)_2$  aumenta.
4. La continua fertilización con  $K^+$  da como resultado una disminución en el poder de fijación al secar el suelo y un aumento de moscovita o un material parecido en la fracción de la arcilla.

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

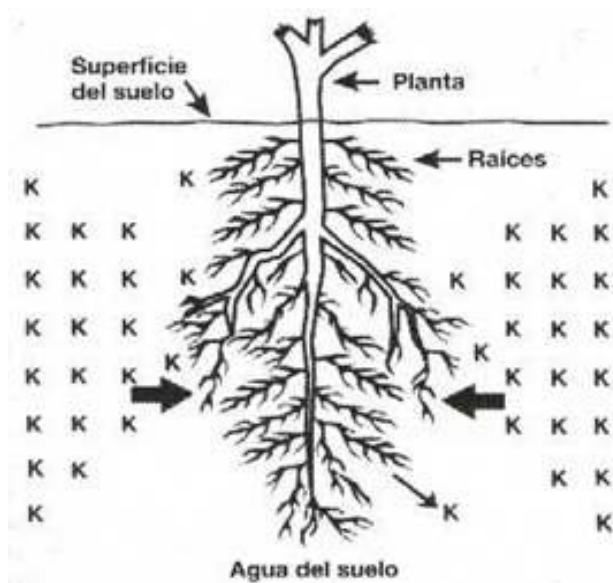
#### 3.6 MOVIMIENTO DEL POTASIO EN EL SUELO

Es vital mantener niveles adecuados de K en el suelo porque este nutriente presenta baja movilidad, excepto en suelos arenosos o en suelos orgánicos. A diferencia del N y algunos otros nutrientes, el K tiende a mantenerse en el sitio donde se coloca cuando se fertiliza. Cuando el K se mueve, lo hace por medio del proceso denominado difusión, en desplazamientos lentos y de corto recorrido por las películas de agua que rodean las partículas del suelo. Las condiciones secas hacen que este movimiento sea más lento, pero niveles altos de K en el suelo lo aceleran.

En general, las raíces de la planta hacen contacto con menos del 3% del suelo en el cual crecen. Por esta razón, el suelo debe estar bien abastecido de K para asegurar que las necesidades de la planta sean atendidas continuamente durante todo el ciclo de crecimiento, hasta el momento de la cosecha.

Dado que el proceso de difusión consiste en el movimiento de sustancias de una región donde están a alta concentración a otra de baja concentración, en la zona de las raíces se reduce la concentración de nutrientes debido a la intensa toma de sustancias por la planta, formándose un gradiente de concentración que moviliza los iones y demás sustancias hacia la interfase radical donde están menos concentradas <sup>(3)</sup>. (Figura 10).

**Figura 10. Movimiento del potasio hacia las plantas por el proceso de difusión.**



### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

---

Con base en la primera ley de Fick, la difusión se define de acuerdo a la ecuación 7:

$$F = -D \frac{dC}{dX} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde: F, es el flujo;  $dC/dX$ , el gradiente de concentración; D, es el coeficiente de difusión en un medio homogéneo. Pero ya que el suelo no es homogéneo, se han propuesto otras ecuaciones que toman en cuenta factores del suelo y de la planta que inciden en el proceso de difusión. La ecuación 8 ha sido propuesta para tomar en cuenta estos factores: <sup>(6)</sup>

$$\frac{Dq}{dt} = D \cdot A \cdot P \cdot \frac{(C_1 - C_2)}{L} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

- $Dq/dt$ , representa la velocidad de difusión del nutriente a la superficie de la raíz.
- D, es el coeficiente de difusión del nutriente en agua.
- A, es el área considerada y representa la superficie total absorbente de la raíz.
- P, es la fracción del suelo ocupado con agua e incluye un factor de tortuosidad.
- $C_1$ , es la concentración de un nutriente soluble a una distancia L de la superficie de la raíz.
- $C_2$ , es la concentración del nutriente soluble en la superficie de la raíz.
- L, es la distancia de la superficie de la raíz al sitio donde se mide  $C_1$ . <sup>(6)</sup>

#### 3.7 DINÁMICA DEL POTASIO EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA

La dinámica del potasio en el suelo está relacionada con la cantidad de minerales potásicos, coloides presentes, absorción del cultivo, intensidad y frecuencia de las fertilizaciones potásicas y la humedad del suelo que puede generar pérdidas por lixiviación principalmente en texturas medias a gruesas.

La materia orgánica, su cantidad y el tipo de arcillas determinan lo intercambiable que el potasio puede ser en el suelo, debido a que una vez el catión  $K^+$  llega al suelo, ya sea por los minerales primarios o por fertilizaciones, son los coloides con sus cargas negativas quienes retienen en forma intercambiable el potasio <sup>(10)</sup>.

### 3.7.1 Pérdidas de Potasio en el suelo

#### 3.7.1.1. Erosión

Tanto el agua como los vientos pueden provocar grandes movimientos de masa de suelo arrastrando en primer lugar las capas arables y con ellas pérdidas apreciables de los nutrientes, los suelos sin cobertura son más propensos a la erosión <sup>(6)</sup>.

#### 3.7.1.2. Lixiviación

Al agregar fertilizante potásico al suelo, éste queda como intercambiable en la zona de aplicación y durante varios meses la cantidad disponible de potasio se mantiene alta en relación con otros cationes. Sin embargo, por acción del agua, de la fijación de iones  $K^+$  y de la migración, se alcanza un equilibrio donde la relación de concentración de  $K^+$  a los demás cationes, es aproximadamente la misma que existe en el suelo antes de la aplicación del fertilizante. Las pérdidas por lixiviación tienen relación con la cantidad adicionada <sup>(11)</sup>.

En los suelos arenosos se presentan mayores pérdidas de K por lixiviación. De hecho existen amplias diferencias en las pérdidas de potasio con respecto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los suelos y a su grado relativo de saturación de K. Los suelos arcillosos retienen mayor cantidad de K que los suelos arenosos entre otras razones por su mayor CIC, no obstante si el K es percolado hacia el subsuelo puede ser readsorbido por las arcillas existentes allí, evitándose su pérdida definitiva <sup>(6)</sup>.

#### 3.7.1.3. Relaciones K, P, N.

Debido a que el  $K^+$  y el  $NH_4^+$ , poseen un radio iónico similar, la fijación de estos dos iones por las arcillas 2:1 ocurre por mecanismos similares. Por ello la presencia de  $NH_4^+$  en el suelo alterará tanto la fijación del  $K^+$  añadido como la salida de  $K^+$  fijado.

Los iones amonio son retenidos en los espacios interlaminares de las arcillas, quedando atrapados conjuntamente con iones  $K^+$  al cerrarse las láminas tetraédricas de silicio.

El potasio tiene algunas semejanzas con el fósforo en cuanto a su absorción por la planta, puesto que ambos nutrientes dependen de la difusión para llegar a la superficie de las raíces, pero las sales de potasio presentan en general altas solubilidades y así mismo el  $K^+$  en solución puede alcanzar altas concentraciones dependiendo de los aniones presentes. El  $K^+$  presenta mayor movilidad que el fósforo <sup>(6)</sup>.

#### 3.8 EL POTASIO EN LAS PLANTAS

Cuando el potasio entra en el sistema metabólico de las células de las plantas, forma sales con los ácidos orgánicos e inorgánicos del interior de las mismas, que sirven para regular el potencial osmótico celular, normalizando el contenido de agua interna. En algunas plantas jóvenes esta función puede ser reemplazada por otros cationes como el litio ( $\text{Li}^+$ ) y el sodio ( $\text{Na}^+$ ), pero siempre de una forma restringida, es decir, de la toxicidad que puedan traer colateralmente estos cationes. Las plantas absorben el potasio de la solución del suelo del complejo adsorbente en su forma catiónica,  $\text{K}^+$ . Su absorción está relacionada a la concentración de otros cationes, como es el caso de magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ ), por problemas de competencia iónica, en la cual son absorbidos con mayor facilidad y velocidad los cationes que tienen una sola carga positiva que los que tienen mayor cantidad <sup>(12)</sup>.

Después del nitrógeno y del calcio, el potasio es el elemento que presenta mayor requerimiento para los cultivos. A diferencia de N, P y S, el K no forma parte integral de los componentes de la planta tales como proteínas, ácidos nucleicos, carbohidratos o lípidos. Se encuentra principalmente en vacuolas y en el citoplasma en donde puede alcanzar concentraciones de hasta 100mM <sup>(6)</sup>.

El potasio (K) como parte del grupo de nutrientes esenciales para las plantas, es muy importante en la fotosíntesis, esencial para la síntesis de proteínas, regulador hídrico (apertura de estomas), contribuye a la resistencia de plagas y enfermedades, disminuye el efecto negativo de las heladas, participa como activador enzimático en las principales reacciones metabólicas en la planta y es importante en la formación y calidad de granos y frutos. Es el elemento de mayor concentración en la planta después del nitrógeno. Por lo tanto, la deficiencia de potasio puede ocasionar los siguientes trastornos: disminución de la fotosíntesis, disminución del traslado de los azúcares a la raíz, acumulación de compuestos orgánicos que contienen nitrógeno, pues no se produce una síntesis de proteínas, aparición en las células de las hojas de sustancias catabólicas, como la putrescina, que inicia los procesos de muerte celular y de tejidos, es decir la necrosis de los tejidos vivos, se promueve la susceptibilidad al ataque de los hongos pues disminuye la presión osmótica de las células, favoreciendo la entrada de los patógenos <sup>(12)</sup>.

##### 3.8.1 Funciones del Potasio en las plantas

El potasio cumple las siguientes funciones en la planta:



### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

---

1. Participa en el metabolismo del almidón aumentando su acumulación en tubérculos como papa; aumenta la acumulación de sacarosa en remolacha y de monosacáridos en hortalizas y frutales.
2. Refuerza la síntesis de carbohidratos de alto peso molecular (celulosas, hemicelulosas y sustancias pécticas). Engrosa las paredes celulares contribuyendo a la resistencia y calidad de fibras como el lino y el cáñamo.
3. Se han demostrado correlaciones muy significativas entre el contenido de K en la célula, la intensidad de los procesos de crecimiento y el estiramiento de células. Hay una relación muy estrecha entre el nivel de K y la síntesis de proteínas en las plantas.
4. Promueve la síntesis, translocación y almacenamiento de carbohidratos y optimiza la relación hídrica en tejidos vegetales.
5. Se acumula en cloroplastos y mitocondrias y participa activamente en los procesos de fotosíntesis y fotofosforilación oxidativa que genera ATP para el trabajo biológico.
6. El  $K^+$  es el principal contraión para neutralizar las cargas negativas tanto de ácidos orgánicos y de aniones inorgánicos como de polielectrolitos de las células. El  $K^+$  crea la asimetría iónica y la diferencia de potencial eléctrico entre la célula y el medio ambiente.
7. Controla y regula las actividades de varios elementos minerales esenciales. Interviene, con el calcio y el magnesio, por ejemplo en la nutrición armónica de los cultivos agrícolas. La deficiencia de K causa alteración del metabolismo vegetal en varios niveles.
8. Tiene un papel clave en la osmoregulación mediante el ajuste de la apertura y cierre de los estomas y su relación con la producción y transporte de varios azúcares.
9. Fomenta la resistencia de las plantas al frío y a las sequías (como resultado del aumento en la presión osmótica del jugo celular), así como a la micosis, virosis e insectos.
10. Mejora la calidad organoléptica y nutricional de los frutos tales como palatabilidad (color, sabor, consistencia y textura). Los frutales con adecuado nivel de potasio contienen más azúcares y tienen mayor capacidad de almacenamiento por la mayor dureza de sus tejidos.

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El potasio es conocido como el elemento de calidad para la producción agrícola. Una nutrición adecuada produce un incremento en las proteínas de los granos y mayor contenido de aceites y vitamina C, aumenta el tamaño de frutos y tubérculos, y produce menores pérdidas durante el almacenamiento <sup>(6)</sup>.

Algunos de los procesos bioquímicos en los cuales participa el potasio se muestran en la Tabla 1 <sup>(13)</sup>.

**Tabla 1. Sistemas enzimáticos estimulados por el K<sup>+</sup> o por otros cationes monovalentes <sup>(13)</sup>**

SISTEMA ENZIMÁTICO	PROCESO	ACTIVACIÓN
Glicólisis	Glucosa → Acetaldehído → Piruvato	K <sup>+</sup> } Rb <sup>+</sup>
Síntesis de almidón	Glucosa → Almidón	K <sup>+</sup>
Fosforilación oxidativa	Síntesis de ATP dependiente de O <sub>2</sub>	K <sup>+</sup> } Na <sup>+</sup>
Fotofosforilación	Síntesis de ATP dependiente de luz	K <sup>+</sup> } Rb <sup>+</sup>
Síntesis de proteínas	Aminoácidos → Proteínas	K <sup>+</sup>
Respiración	Absorción de O <sub>2</sub> dependiente de Glucosa	K <sup>+</sup> } Rb <sup>+</sup>

#### 3.8.2 Efectos de la carencia de potasio en la planta

La reducción en la absorción de K por la planta conduce a diversas manifestaciones carenciales que son observadas primero en las hojas viejas, debido a que el K se moviliza fácilmente a través de los tejidos y pasa a los tejidos jóvenes meristemáticos cuando se presenta deficiencia. Como resultado de las carencias de potasio se presentan las siguientes consecuencias: <sup>(6)</sup>

- a) Las hojas se vuelven inicialmente cloróticas y luego necróticas, esto ocurre en los ápices y márgenes de las hojas.
- b) Se presenta una acumulación de los carbohidratos solubles en las plantas disminuyendo la síntesis de almidón, afectando los procesos glicolíticos.
- c) Con deficiencias fuertes de K, los aminoácidos libres se convierten en amidas y tras la adición de K el proceso se revierte.
- d) La disponibilidad del K del suelo repercute no sólo en la salud del vegetal, sino también en la del animal y del hombre.

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

---

- e) La deficiencia de K disminuye el rendimiento de los cultivos, incluso se pueden presentar fuertes reducciones en la producción sin que aparezcan síntomas evidentes de deficiencia. A este fenómeno se le ha llamado “Hambre oculta”<sup>(14)</sup>.
- f) A nivel fitosanitario la deficiencia de K en los cultivos conduce a una mayor susceptibilidad al ataque de patógenos en la raíz y debilidad en los tallos, lo que hace a las plantas más vulnerables a la acción del viento, lluvias, etc.
- g) La deficiencia de K produce ante todo pérdida de turgencia y marchitamiento. Por deficiencia de agua, las hojas se vuelven flácidas con lo cual se debilitan los procesos fotosintéticos y metabólicos en general.

#### 3.9 FUNDAMENTOS DE ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA BASADA EN ATOMIZACIÓN CON LLAMA

La Espectroscopia Atómica, en términos generales, está basada en la absorción, emisión o fluorescencia por átomos o iones elementales. Hay dos regiones del espectro que dan información atómica: la ultravioleta/visible y la de rayos X <sup>(15)</sup>.

Los espectros atómicos ultravioleta y visible se obtienen mediante un adecuado tratamiento térmico que convierte los componentes de una muestra en átomos o iones elementales gaseosos. La emisión, absorción o fluorescencia de la mezcla gaseosa resultante sirve a continuación para la determinación cualitativa y cuantitativa de uno o varios de los elementos presentes en la muestra. El proceso por el cual la muestra se convierte en un vapor atómico se denomina atomización.

La sensibilidad de esta técnica cae dentro del intervalo de las partes por millón y de las partes por billón. Además, los métodos espectroscópicos atómicos están entre los procedimientos analíticos más selectivos, y presentan también las ventajas de la rapidez y comodidad <sup>(15)</sup>.

##### 3.9.1. Atomización de la muestra.

En general los atomizadores son de dos tipos: continuos y discretos. En los primeros, la muestra se introduce en el atomizador a una velocidad constante. La señal espectral es por tanto, constante con el tiempo. Con los atomizadores discretos, una cantidad medida de la muestra se introduce como un bolo de líquido

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

---

o de sólido. La señal espectral en este caso alcanza un valor máximo y luego disminuye a cero cuando el vapor atómico abandona la región calentada <sup>(15)</sup>.

#### 3.9.2. Fuentes de espectros.

Cuando una muestra se atomiza, una importante fracción de los constituyentes metálicos se transforman en átomos gaseosos; además, según la temperatura del atomizador, una cierta fracción de esos átomos se ionizan, originando así una mezcla gaseosa de átomos e iones elementales. Los espectros de emisión, absorción, o de fluorescencia de las partículas atómicas gaseosas (átomos o iones) están constituidos por líneas estrechas y bien definidas que provienen de las transiciones de los electrones más externos. En el caso de los metales, las energías de esas transiciones son tales que implican a la radiación ultravioleta, visible y la infrarroja cercana <sup>(15)</sup>.

#### 3.9.3. Atomización con llama.

En la atomización con llama, una disolución de la muestra se pulveriza en una llama mediante un nebulizador, el cual transforma la disolución de la muestra en un aerosol constituido por diminutas gotas de líquido. A continuación ocurren una serie de procesos encadenados, los cuales al final dan como resultado una mezcla de átomos del analito, moléculas de la muestra, moléculas de óxido del analito y con seguridad una variedad de especies moleculares y atómicas que se forman por reacciones entre el combustible, el oxidante y la muestra.

El tipo de llama que se utilice dependerá del metal que se pretenda determinar. Para la determinación de potasio se emplea acetileno como combustible y aire como oxidante; con esta mezcla se obtienen temperaturas entre 2100°C y 2400°C <sup>(15)</sup>.

#### 3.9.4. Atomizadores de llama.

Los atomizadores de llama se emplean para las medidas de emisión, absorción y fluorescencia atómica. Un atomizador de llama consiste en un nebulizador neumático, que transforma la disolución de la muestra en una niebla, o aerosol,

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

---

que se introduce en un quemador. El tipo más común de nebulizador es el de tubo concéntrico <sup>(15)</sup>.

La espectroscopia de absorción atómica de llama ha sido, hasta hace poco, el más utilizado de los métodos espectrales atómicos debido a su simplicidad y efectividad.

La fuente más común para las medidas de absorción atómica es la lámpara de cátodo hueco. Este tipo de lámpara consiste en un ánodo de tungsteno y un cátodo cilíndrico, cerrados herméticamente en un tubo de vidrio lleno con neón o argón a una presión de 1 a 5 torr. El cátodo está construido con el metal, cuyo espectro se desea obtener, o bien sirve de soporte para una capa de dicho metal <sup>(15)</sup>.

#### 3.9.5. Curvas de calibración.

En teoría, las medidas de absorción atómica deben cumplir la Ley de Beer, siendo la absorbancia directamente proporcional a la concentración. Sin embargo, se encuentran desviaciones de la linealidad, por lo que se debe preparar periódicamente una curva de calibración que cubra el intervalo de concentraciones que se encuentran en la muestra.

Para muchos elementos, los límites de detección en espectroscopia de absorción atómica de atomización con llama se encuentran en el intervalo de 1 a 20 ng/mL 0.001 a 0.002 ppm, aunque en algunos casos se encuentran límites de detección muy alejados de estos intervalos <sup>(15)</sup>.

### 4. METODOLOGÍA

#### 4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El suelo de estudio proviene de la finca El Porvenir de la vereda La Aurelia municipio de Cajibío, cultivado con cafeto a 1740 metros sobre el nivel del mar y con una precipitación pluvial de 1500mm a 19 °C.

Los análisis de laboratorio (físicos y químicos) se realizaron en el Laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca y los análisis de Espectrofotometría de Absorción Atómica (bases de cambio, CIC y potasio) en el Laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Sede Medellín.

**Figura 11. Ubicación geográfica de la vereda La Aurelia del Departamento del Cauca**



#### 4.2 TOMA DE MUESTRAS

La toma de las muestras de suelos se realiza de acuerdo a la metodología estandarizada en el laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca <sup>(16)</sup>. Para obtener un valor analítico representativo del volumen del suelo se divide el terreno seleccionado en unidades de muestreo de acuerdo a la altura, topografía o relieve, tipo de cultivo, vegetación, etc. Se selecciona una unidad de muestreo y se cruza en zig – zag, haciendo sondeos en la capa arable que comprende alrededor de 20 a 30cm de profundidad. Se tomaron entre 10 y 15 submuestras mezclándolas homogéneamente y se formó con estas una muestra compuesta de

5Kg. La muestra compuesta se lleva al laboratorio, se tritura y se pasa por tamiz de 2mm e inmediatamente se determina la humedad de campo. Posteriormente, se divide la muestra en dos porciones: una con humedad de campo que se almacena en doble bolsa plástica a una temperatura entre 3 – 5 °C y otra seca al aire por 24 horas, para los respectivos análisis.

### 4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL SUELO

Con el objeto de identificar el tipo de suelo con el que se trabajó, se realizaron análisis físicos y químicos, de acuerdo a la metodología estandarizada en el Laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca <sup>(16)</sup>.

#### 4.3.1. Análisis Físicos

##### 4.3.1.1 Humedad de campo

Se refiere al contenido de agua con relación al peso o volumen de la masa de suelo, en este caso se determina por el método gravimétrico que relaciona la masa de agua y la masa de los sólidos del suelo. Consiste en pesar la muestra antes y después del calentamiento a 105 °C con el objeto de eliminar el agua superficial en una estufa con circulación de aire forzado.

##### 4.3.1.2 Humedad

Igualmente se determina por el método gravimétrico una vez seca la muestra al aire. Este valor se utiliza para expresar los resultados en base seca.

##### 4.3.1.3 Densidad real

Se realiza mediante el método del picnómetro, utilizado para medir la densidad de los sólidos o gravedad específica. Consiste en determinar la masa y el volumen de los sólidos del suelo a través de un recipiente de volumen conocido. Se pesa el picnómetro completamente seco, luego se agrega aproximadamente 2g de suelo seco a 105 °C, el cual ha sido tamizado por 2mm; se pesa el picnómetro más el suelo seco, se agrega agua al picnómetro hasta completar 1/3 de su volumen, se lleva el picnómetro destapado a la campana de vidrio y se aplica vacío durante dos horas, se retira el picnómetro de la campana y se agrega agua hasta 2/3 de su volumen y se lleva nuevamente al vacío durante una hora. Se saca el picnómetro de la campana, se seca y se pesa, se llena con agua completamente y se pesa. Finalmente, se vacía su contenido, se lava y se llena nuevamente con agua destilada, se tapa y se pesa <sup>(17)</sup>.

### 4.3.1.4 Densidad aparente

Es la relación entre la masa del suelo por unidad de volumen aparente de suelo seco. Se determina mediante el método del cilindro, que consiste en tomar una muestra de suelo usando un barreno para toma de muestras indisturbadas. La técnica consiste esencialmente de un muestreador con un diámetro de 5cm y una altura aproximada de 5cm. El muestreador se introduce en el suelo ejerciendo una presión vertical al dejar caer el golpeador en una forma uniforme, luego se retira el muestreador del suelo en forma cuidadosa, se enrasa el cilindro (Vc) con una navaja cortante, se lleva a la estufa a 105 °C durante 24 horas y se pesa (Mss) <sup>(17)</sup>.

### 4.3.1.5 Textura

Se refiere a las proporciones de arena limo y arcilla (partículas menores de 2mm de diámetro) que se encuentran en una masa de suelo. Se obtiene mediante el método de Bouyoucos que consiste en determinar la cantidad de sólidos en suspensión por medio de un Hidrómetro. La profundidad del centro de flotación del Hidrómetro varía con la densidad de la suspensión y también con la textura. Después de 40 segundos, todas las partículas mayores de 50 micras sedimentarán de tal manera que no tendrán influencia sobre el hidrómetro. Las lecturas realizadas una hora después, corresponden a partículas mayores de 5 micras y a las dos horas a partículas menores de 2 micras.

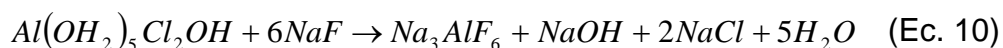
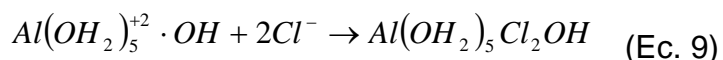
### 4.3.2 Análisis Químicos <sup>(16)</sup>

#### 4.3.2.1 pH

Se determina mediante el método potenciométrico, en una suspensión suelo:agua en relación 1:1 utilizando un pH-metro METROHM E-744 con electrodo combinado de vidrio.

#### 4.3.2.2 Acidez intercambiable

Se determina mediante el método de desplazamiento con una solución neutra de KCl 1N, que consiste en desplazar los iones H<sup>+</sup> y Al<sup>+3</sup> de la fase coloidal, por agitación de la muestra de suelo con una solución neutra de KCl. Los iones desplazados son titulables con soda en presencia de fenolftaleína. Una vez titulados estos iones quedan en forma de Al(OH<sub>2</sub>)<sub>5</sub><sup>2+</sup> y se valora el Al<sup>+3</sup> presente en forma hidratada de acuerdo a las ecuaciones 9 y 10:

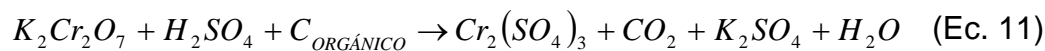




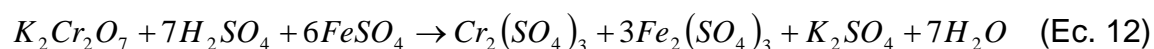
El NaOH producido se titula con HCl y como la cantidad de NaOH depende de la cantidad de  $AlCl_3$ , el número de miliequivalentes de ácido clorhídrico empleados para neutralizar el NaOH será igual al número de miliequivalentes de  $Al^{+3}$ . La acidez intercambiable menos acidez de aluminio es igual a la acidez del  $H^+$ .

### 4.3.2.3 Materia Orgánica

Se realiza mediante el método de Walckley–Black, el cual consiste en oxidar el carbono orgánico presente en el suelo con un oxidante en medio ácido, utilizando como oxidante  $K_2Cr_2O_7$  1N y como medio ácido sulfúrico concentrado. La reacción correspondiente se muestra en la ecuación 11.



Como subproducto de la reacción queda materia orgánica que no se oxida y  $K_2Cr_2O_7$  sin reaccionar, entonces se valora volumétricamente el  $K_2Cr_2O_7$  sobrante con una solución de sulfato ferroso amónico. La reacción se muestra en la ecuación 12:

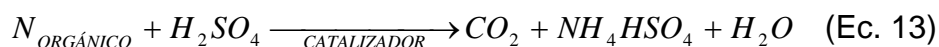


### 4.3.2.4 Determinación de nitrógeno por el método de Kjeldhal

Este método es el utilizado universalmente para la determinación cuantitativa de N procedente de diversos materiales, esta basado en tres etapas:

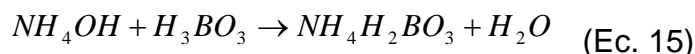
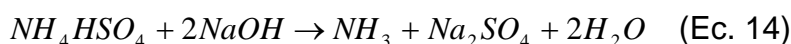
#### Oxidación de la muestra

La muestra es tratada con  $H_2SO_4$  y catalizadores los cuales tienen el propósito de oxidar la materia orgánica y convertir el nitrógeno en sulfato ácido de amonio, según la ecuación 13:



#### Descomposición del Sulfato ácido de amonio

El sulfato ácido de amonio se descompone por un exceso de álcali para liberar el amoníaco, él cual se recoge por destilación sobre ácido bórico. Las reacciones se muestran en las ecuaciones 14 y 15.



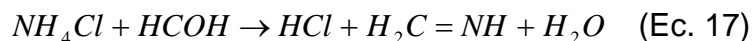
### Titulación de Borato de Amonio

El borato de amonio formado en el paso anterior se valora con HCl usando como indicador de punto final una mezcla de rojo de metilo y azul de metilo o rojo de metilo y verde de bromocresol. La reacción se muestra en la ecuación 16.



### **4.3.2.5 Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)**

Consiste en desplazar todos los cationes que tiene el suelo y reemplazarlos por otro catión, en este caso  $NH_4^+$ . El suelo seco tamizado, se satura con acetato de amonio 1N pH 7, tratando de llevar la saturación al máximo y de que sea estable. El ión amonio se desplaza con  $Na^+$  (NaCl al 10%) por lo que el  $NH_4^+$  queda en forma de  $NH_4Cl$ ; se agrega formol neutralizado al 40% de tal manera que se genera HCl, de acuerdo a la ecuación 17:



El HCl generado se valora con NaOH 0.1N en presencia de fenolftaleína.

### **4.3.2.6 Determinación de las bases de cambio Ca, Mg, Na y K**

Se utiliza el primer extracto del tratamiento con acetato de amonio 1N de la determinación de CIC y la cuantificación se realizará por espectrofotometría de absorción atómica de forma directa, utilizando una longitud de onda de 766,5nm para el potasio, 422,7nm para el calcio y 285,2nm para el magnesio.

## **4.4. EXTRACCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE POTASIO**

Con el propósito de evaluar el efecto del encalamiento y del secado sobre la dinámica del potasio en el suelo de estudio, se realiza un diseño estadístico de bloques completamente al azar, que comprende 20 tratamientos y tres réplicas por cada uno, para un total de 60 tratamientos, como se relacionan en la Tabla 2.

Para ello se toma la muestra del suelo respectivo a una profundidad de 30cm. Se lleva al laboratorio y previa evaluación del pH se determina el requerimiento de cal para llevar el suelo a un valor de pH de 5.5 (encalamiento). La fortificación con potasio se realiza incubando las muestras durante un período de 16 horas <sup>(18)</sup>. La incubación se hizo tanto para las muestras húmedas como para las muestras secas encaladas y sin encalar.

#### 4. METODOLOGÍA

Las muestras frescas, se homogenizan y tamizan a malla de 2mm, para ser almacenadas en doble bolsa plástica y así evitar pérdidas de humedad; para su incubación se llevaron a temperatura ambiente. Las muestras secas se obtuvieron secando la muestra a temperatura ambiente y para su incubación se llevaron a 70°C previo tamizaje por malla de 2mm.

**Tabla 2. Diseño Experimental**

MUESTRA	TRATAMIENTO
T1	Suelo con humedad de campo testigo
T2	Suelo con humedad de campo fortificado con Nivel 1 de Fertilizante <sup>(a)</sup>
T3	Suelo con humedad de campo fortificado con Nivel 1 de Sal <sup>(b)</sup>
T4	Suelo con humedad de campo fortificado con Nivel 2 de Fertilizante
T5	Suelo con humedad de campo fortificado con Nivel 2 de Sal
T6	Suelo con humedad de campo encalado a pH 5.5
T7	Suelo con humedad de campo encalado – fortificado con Nivel 1 de Fertilizante
T8	Suelo con humedad de campo encalado – fortificado con Nivel 1 de Sal
T9	Suelo con humedad de campo encalado – fortificado con Nivel 2 de Fertilizante
T10	Suelo con humedad de campo encalado – fortificado con Nivel 2 de Sal
T11	Suelo seco testigo
T12	Suelo seco fortificado con Nivel 1 de Fertilizante
T13	Suelo seco fortificado con Nivel 1 de Sal
T14	Suelo seco fortificado con Nivel 2 de Fertilizante
T15	Suelo seco fortificado con Nivel 2 de Sal
T16	Suelo seco encalado a pH 5.5
T17	Suelo seco encalado – fortificado con Nivel 1 de Fertilizante
T18	Suelo seco encalado – fortificado con Nivel 1 de Sal
T19	Suelo seco encalado – fortificado con Nivel 2 de Fertilizante
T20	Suelo seco encalado – fortificado con Nivel 2 de Sal

<sup>(a)</sup> Fertilizante 17:6:18:2

<sup>(b)</sup> KCl reactivo grado analítico.

Para determinar la cantidad de fertilizante 17:6:18:2 y de sal analítica (KCl) que se emplea en este estudio, como Nivel 1 y Nivel 2 <sup>(18)</sup>, se tiene en cuenta la fertilización hecha por los agricultores de la Finca El Porvenir, como se describe a continuación:

#### 4. METODOLOGÍA

Nivel 1: Para este nivel, la frecuencia de aplicación del fertilizante al cultivo es de dos veces por año por hectárea, de acuerdo a la cantidad de árboles de café cultivado.

La cantidad de fertilizante 17:6:18:2 que se utiliza en el estudio es de:

$$\frac{4200 \text{árboles}}{\text{Ha}} \times \frac{100 \text{gFertilizante}}{\text{árbol}} \times 2 \text{ veces año} = \frac{840000 \text{gFertilizante}}{\text{Ha / año}}$$

$$\frac{840000 \text{gFertilizante}}{\text{Ha}} \times \frac{\text{Ha}}{2 \times 10^9 \text{gSuelo}} \times 50 \text{gSuelo} = \frac{0.021 \text{gFertilizante}}{50 \text{gSuelo}}$$

$$\frac{0.021 \text{gFertilizante}}{50 \text{gSuelo}} \times \frac{18 \text{gK}_2\text{O}}{100 \text{gFertilizante}} = \frac{3.78 \times 10^{-3} \text{gK}_2\text{O}}{50 \text{gSuelo}}$$

$$\frac{3.78 \times 10^{-3} \text{gK}_2\text{O}}{50 \text{gSuelo}} \times \frac{78.204 \text{gK}}{94.204 \text{gK}_2\text{O}} \times \frac{1000 \text{mgK}}{1 \text{gK}} \times \frac{1 \text{meqK}}{39.102 \text{mgK}} \times 100 \text{gSuelo} = \frac{0.160 \text{meqK}}{100 \text{gSuelo}}$$

La cantidad de sal analítica (KCl) a utilizar es de:

$$\frac{0.021 \text{gFertilizante}}{50 \text{gSuelo}} \times \frac{18 \text{gK}_2\text{O}}{100 \text{gFertilizante}} = \frac{3.78 \times 10^{-3} \text{gK}_2\text{O}}{50 \text{gSuelo}}$$

$$\frac{3.78 \times 10^{-3} \text{gK}_2\text{O}}{50 \text{gSuelo}} \times \frac{78.204 \text{gK}}{94.204 \text{gK}_2\text{O}} \times \frac{74.552 \text{gKCl}}{39.102 \text{gK}} = \frac{5.98 \times 10^{-3} \text{gKCl}}{50 \text{gSuelo}}$$

$$\frac{5.98 \times 10^{-3} \text{gKCl}}{50 \text{gSuelo}} \times \frac{39.102 \text{gK}}{74.552 \text{gKCl}} \times \frac{1000 \text{mgK}}{1 \text{gK}} \times \frac{1 \text{meqK}}{39.102 \text{mgK}} \times 100 \text{gSuelo} = \frac{0.160 \text{meqK}}{100 \text{gSuelo}}$$

Nivel 2: Para este nivel, la frecuencia de aplicación del fertilizante al cultivo es de tres veces por año por hectárea, de acuerdo a la cantidad de árboles de café cultivado.

## 4. METODOLOGÍA

La cantidad de fertilizante 17:6:18:2 que se utiliza en el estudio es de:

$$\frac{4200 \text{árboles}}{\text{Ha}} \times \frac{100 \text{gFertilizante}}{\text{árbol}} \times 3 \text{ veces año} = 1260000 \text{gFertilizante} / \text{Ha} / \text{año}$$

$$\frac{1260000 \text{gFertilizante}}{\text{Ha}} \times \frac{\text{Ha}}{2 \times 10^9 \text{gSuelo}} \times 50 \text{gSuelo} = 0.0315 \text{gFertilizante} / 50 \text{gSuelo}$$

$$\frac{0.0315 \text{gFertilizante}}{50 \text{gSuelo}} \times \frac{18 \text{gK}_2\text{O}}{100 \text{gFertilizante}} = \frac{5.67 \times 10^{-3} \text{gK}_2\text{O}}{50 \text{gSuelo}}$$

$$\frac{5.67 \times 10^{-3} \text{gK}_2\text{O}}{50 \text{gSuelo}} \times \frac{78.204 \text{gK}}{94.204 \text{gK}_2\text{O}} \times \frac{1000 \text{mgK}}{1 \text{gK}} \times \frac{1 \text{meqK}}{39.102 \text{mgK}} \times 100 \text{gSuelo} = 0.241 \text{meqK} / 100 \text{gSuelo}$$

La cantidad de sal analítica (KCl) a utilizar es de:

$$\frac{0.0315 \text{gFertilizante}}{50 \text{gSuelo}} \times \frac{18 \text{gK}_2\text{O}}{100 \text{gFertilizante}} = \frac{5.67 \times 10^{-3} \text{gK}_2\text{O}}{50 \text{gSuelo}}$$

$$\frac{5.67 \times 10^{-3} \text{gK}_2\text{O}}{50 \text{gSuelo}} \times \frac{78.204 \text{gK}}{94.204 \text{gK}_2\text{O}} \times \frac{74.552 \text{gKCl}}{39.102 \text{gK}} = \frac{8.97 \times 10^{-3} \text{gKCl}}{50 \text{gSuelo}}$$

$$\frac{8.97 \times 10^{-3} \text{gKCl}}{50 \text{gSuelo}} \times \frac{39.102 \text{gK}}{74.552 \text{gKCl}} \times \frac{1000 \text{mgK}}{1 \text{gK}} \times \frac{1 \text{meqK}}{39.102 \text{mgK}} \times 100 \text{gSuelo} = 0.241 \text{meqK} / 100 \text{gSuelo}$$

### 4.4.1 Caracterización de Potasio

Para la caracterización de las formas de potasio se utilizaron soluciones extractoras apropiadas para cada caso de acuerdo a la metodología reportada por Gómez y otros <sup>(18)</sup>. Una vez que el K<sup>+</sup> está en solución, la determinación cuantitativa se realiza mediante el método de espectrofotometría de absorción atómica de forma directa a una longitud de onda de 766,5nm. La manera práctica de trabajar es hacer una curva de calibración de potasio con patrones de alta pureza (Titrisoles) e interpolar el resultado de la muestra analizada.

#### 4. METODOLOGÍA

Los parámetros necesarios para la determinación de las diferentes formas de potasio por espectrofotometría de absorción atómica en el equipo PERKIN ELMER AANALYST 300 se describen en la Tabla 3.

**Tabla 3. Parámetros para la determinación de potasio por EAA**

Técnica	Espectrofotometría de llama
Longitud de onda	766,5nm
Slit	0,70
Número de réplicas	3
Mezcla de gases	Aire / Acetileno
Flujo de gas	10.10L/min Aire/ 2.5L/min Acetileno
Rango de lectura	0 – 50ppm
Factor de correlación de la curva	0,999
Tiempo de medida	4s
Señal	Continua
Tiempo de estabilización de llama	6s
Corrección de background con lámpara de deuterio	

**Figura 12. Equipo de absorción atómica PERKIN ELMER AANALYST 300**

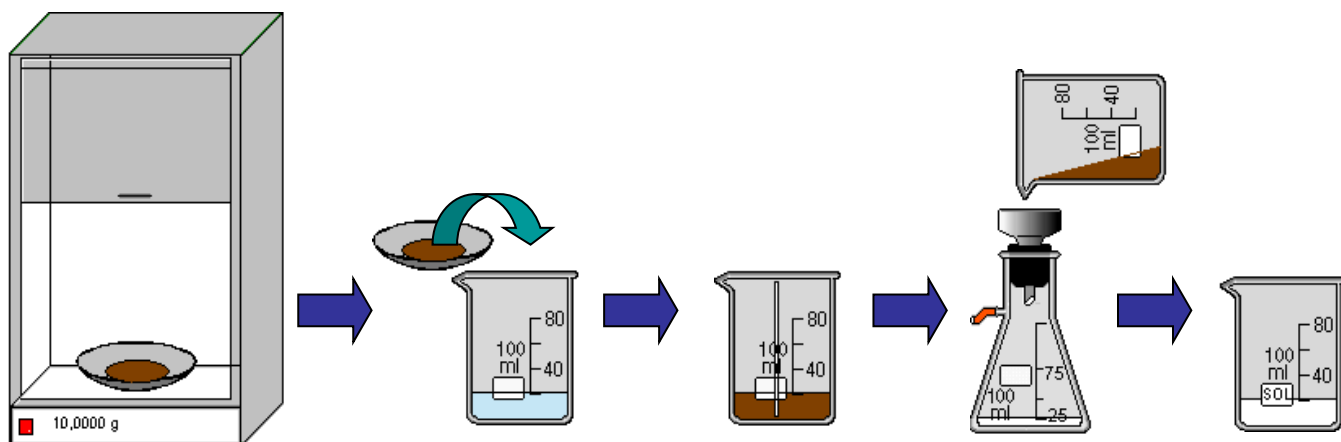


Las diferentes formas de potasio a evaluar en el suelo son:

### 4.4.1.1 Potasio Soluble

Se determina por espectrofotometría de absorción atómica en el lixiviado de una suspensión suelo:agua en relación 1:2 <sup>(3)</sup>. (Figura 13).

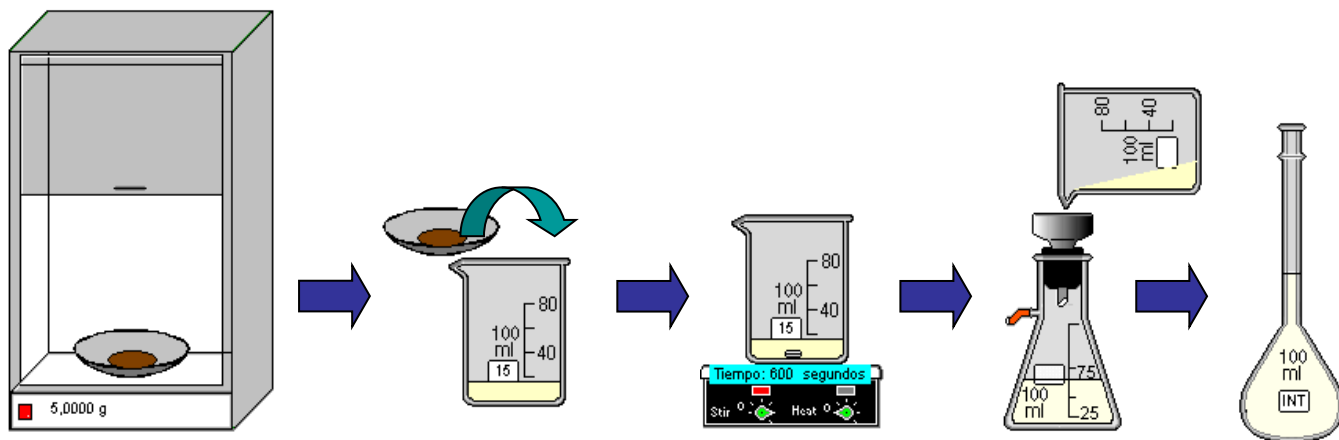
**Figura 13. Extracción para potasio soluble**



### 4.4.1.2. Potasio Intercambiable

El suelo se satura con una solución de acetato de amonio 1N a pH 7, para desplazar los cationes intercambiables hacia la solución del suelo en la cual se determina el  $K^+$  intercambiable por espectrofotometría de absorción atómica. Para esta determinación se pesan 5g de suelo y se ponen en contacto con 15mL de acetato de amonio 1N a pH 7; se agita por 10min y se filtra lavando con 5 porciones de 10mL de acetato de amonio 1N a pH 7; finalmente se lleva a un volumen de 100mL y se determina  $K^+$  flamométricamente (Figura 14). El  $K^+$  determinado incluye las formas intercambiable y soluble, por diferencia con el  $K$  soluble se determina el  $K$  intercambiable <sup>(3)</sup>.

Figura 14. Extracción para potasio intercambiable

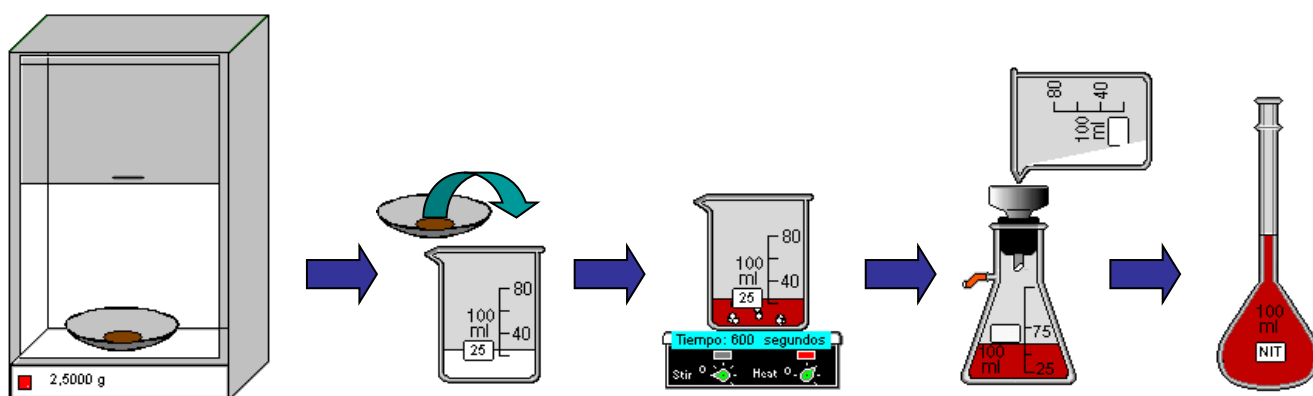


#### 4.4.1.3. Potasio No Intercambiable

El potasio no intercambiable pasa a formas solubles e intercambiables en un tiempo más o menos largo para ser tomado por las plantas.

Para su determinación se utiliza el *Método de HNO<sub>3</sub>*, que consiste en incubar 2.5g de la muestra de suelo con 25mL de una solución de HNO<sub>3</sub> 1N a temperatura de ebullición por 10 min. Cuando la muestra está a temperatura ambiente, se filtra lavando con cuatro porciones de 15mL de HNO<sub>3</sub> 0.1N; para finalmente completar a un volumen de 100mL y cuantificar el potasio por espectrofotometría de absorción atómica (Figura 15). El K<sup>+</sup> no intercambiable se halla por la diferencia entre esta extracción y el K<sup>+</sup> intercambiable extraído con acetato de amonio 1N a pH 7<sup>(3)</sup>.

Figura 15. Extracción para potasio no intercambiable



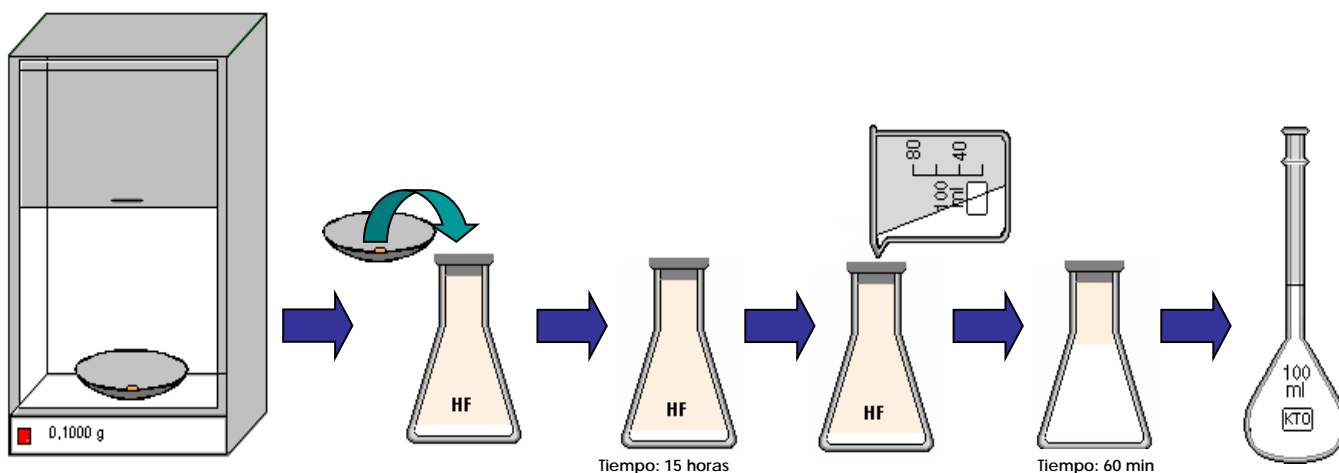


### 4.4.1.4. Potasio Total

Uno de los procedimientos más utilizados es la descomposición de los silicatos con ácido fluorhídrico (HF), con formación de  $\text{SiF}_4$  volátil.

Para su determinación se toma 0.1g de muestra de suelo, calcinada previamente y se pone en contacto con 3mL de HF al 40% durante 15 horas aproximadamente. Al cabo de este tiempo, se adicionan 50mL de una solución saturada de ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) y se agita vigorosamente, dejando en reposo con agitación ocasional, durante 60 minutos. Finalmente, se lleva a un volumen de 100mL con agua destilada y se cuantifica el potasio total por espectrofotometría de absorción atómica <sup>(19)</sup>. (Figura 16).

Figura 16. Extracción para potasio total



### 4.4.1.5. Potasio del enrejado cristalino

Se obtiene por diferencia entre el potasio total y las otras formas de potasio <sup>(3)</sup>.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL SUELO

Los resultados de los análisis físicos y químicos de la muestra de suelo se presentan en la Tabla N° 4. Para su interpretación se tiene en cuenta los parámetros establecidos y reportados por la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo 2000 (SCCS) citados en las Tablas 1-6 del Anexo 1 <sup>(20)</sup>.

El suelo en estudio, fue muestreado en la zona rural del Municipio de Cajibío del Departamento del Cauca, en el momento de la toma de muestra su cultivo es de café.

El suelo presenta una coloración oscura. Su textura es franco-arenosa, con un contenido muy alto de arenas y un bajo porcentaje de arcillas. Estas características van a desmejorar la estabilidad estructural del suelo, puesto que el tamaño del poro resulta grande, y como consecuencia de la mayor porosidad se pierden gran cantidad de nutrientes por lixiviación. Además, el alto porcentaje de humedad encontrado se atribuye así al alto contenido de materia orgánica presente (18.88%) y no a la textura del suelo. De igual forma, este alto contenido de materia orgánica induce a valores bajos de densidad aparente y de densidad real y por lo tanto, se puede ver afectado el desarrollo radicular de los cultivos, ya que valores menores de 0.7g/mL para densidad aparente afectan este desarrollo<sup>(20)</sup>.

El pH de 4.96 encontrado para este suelo lo clasifica como muy fuertemente ácido, probablemente atribuible al aluminio intercambiable cuyo valor se encuentra en un rango medio, lo mismo que su saturación y a este nivel es moderadamente tóxico para la mayoría de los cultivos, puesto que inhibe el proceso de división celular de sus raíces. Además para el suelo resulta también tóxico pues afecta su bioestructura, provocando el rompimiento de la unión entre la materia orgánica y la fracción inorgánica. La acidez generada por el Al intercambiable resulta de la hidrólisis que éste produce al agua, liberando iones H<sup>+</sup> de acuerdo a las reacciones descritas en la Tabla 5 <sup>(20)</sup>.

**Tabla 5. Reacciones de la hidrólisis de Al-polimérico.**

REACCIÓN	pH	SOLUBILIDAD Al
$Al^{3+} + H - OH \leftrightarrow Al(OH)^{2+} + H^+$	4.0 – 4.5	Alta
$Al(OH)^{2+} + H - OH \leftrightarrow Al(OH)_2^+ + H^+$	4.5 – 5.5	Media
$Al(OH)_2^+ + H - OH \leftrightarrow Al(OH)_3 + H^+$	5.5 – 7.5	Baja

Tabla 4. Análisis Físicos y Químicos de la muestra de suelo.

<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>											
% Humedad Campo	% Humedad Real	Densidad Real (g/mL)	Densidad Aparente (g/mL)	Granulometría			Textura				
				% Arenas	% Arcillas	% Limos					
66.13	20.16	2.28	0.485	87.83	4.66	7.51	FRANCO ARENOSO				
<b>PROPIEDADES QUÍMICAS</b>											
pH	%C Org	%M.O	%N	C/N	CIC	Acidez Intercambiable (meq / 100g Suelo)			% Saturación de Bases		
						Ac. Interc.	Al <sup>3+</sup> Inter.	H <sup>+</sup>			
4.96	10.95	18.88	1.21	9.05	72.01	2.30	2.09	0.20			
Bases de Cambio (meq / 100g Suelo Seco)											
Ca	Mg	Na	K	Ca/Mg	CIC <sub>EFE</sub>	Sat. Bases	Ca	Mg	Na	K	Al
0.69	0.19	0.33	0.24	3.63	3.75	38.67	18.40	5.07	8.80	6.40	55.73

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

Así mismo, esa muy fuerte acidez se puede atribuir al alto contenido de materia orgánica porque puede disociarse liberando una cantidad apreciable de iones  $H^+$ , provenientes de grupos funcionales tales como  $-COOH$ ,  $-OH$ ,  $-CHO$ .

La muy fuerte acidez afecta el desarrollo apropiado de los microorganismos del suelo impidiendo un proceso adecuado de mineralización y humificación de su materia orgánica, así como la pérdida de cationes básicos tales como Ca y Mg producidas por la alta solubilidad de sus sales, como se observa en este análisis (Tabla 4), con niveles muy bajos de estos dos nutrientes, al igual que sus saturaciones. También se observa que este suelo presenta un nivel medio de K. El nivel de sodio es propio de este tipo de suelos muy fuertemente ácidos.

La capacidad de intercambio catiónico es una propiedad muy importante, puesto que es la medida de la cantidad de cargas negativas en las superficies minerales y orgánicas del suelo; el cual actúa como anión gigante que retiene cationes de Ca, K, Mg entre otros. Para el caso de este suelo, se obtuvo una capacidad de intercambio catiónico de 72.01 meq/100g Suelo, considerado como un valor alto; ésta es atribuible principalmente a que este suelo contiene una elevada cantidad de materia orgánica. Sin embargo, esta alta CIC está saturada principalmente por aluminio, factor negativo por lo expuesto anteriormente. La capacidad de cambio real o efectiva presenta un valor de 3.75 (menor de 4), que indica un fuerte lavado de cationes, como se demostró anteriormente.

El porcentaje de nitrógeno total en este suelo es de 1.21% considerado como un valor alto y se relaciona directamente con el alto contenido de materia orgánica. Sin embargo, este valor no asegura una alta disponibilidad de este nutriente para la planta, ya que este porcentaje es del nitrógeno total y no del nitrógeno disponible. El nitrógeno en el suelo se encuentra en diferentes formas químicas, en general la mayor parte está formando compuestos orgánicos, sólo el 5-10% del nitrógeno total se encuentra en formas inorgánicas como amonio ( $NH_4^+$ ) y nitrato ( $NO_3^-$ ) aprovechables directamente por las plantas.

La relación C/N con un valor de 9.05 indicaría una mineralización alta y no corresponde con el alto valor de materia orgánica ni con la alta acidez encontrada para este suelo. Esto puede indicar una excesiva aplicación de abonos orgánicos que incrementan fuertemente el valor de materia orgánica, hipótesis confirmada con el propietario de la finca.

### 5.2. FRACCIONAMIENTO O FORMAS DE POTASIO EN EL SUELO

Con el propósito de evaluar las diferentes formas de potasio en el suelo de estudio e indicar su disponibilidad para las plantas, se realizó el fraccionamiento del potasio presente en el suelo con humedad de campo y seco, de acuerdo a la metodología indicada anteriormente. Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 6–7; y en las Figuras 17, 18, 19, 20.

#### 5.2.1. Análisis de las formas de K en el Suelo con Humedad de Campo.

En la Tabla 6 y en las Figuras 17 y 18, se observa que a medida que se adicionan los diferentes niveles de K provenientes tanto del **Fertilizante (17:6:18:2)** como de la **sal analítica (KCl)** en los diferentes tratamientos (**T1-T10**) los contenidos de K soluble, intercambiable y total aumentan en el suelo húmedo, mientras que los contenidos de K fijado y del enrejado cristalino disminuyen, siendo superior el incremento en el suelo sin encalar.

##### 5.2.1.1. Potasio soluble

El **potasio soluble** se considera inmediatamente disponible para las plantas, pero se encuentra en muy poca cantidad en el suelo. De acuerdo a cada tratamiento aplicado en este estudio se observa que el valor obtenido aumenta.

Si se comparan los tratamientos **T2** con **T3** y **T7** con **T8**, correspondientes al Nivel 1 de potasio, el incremento de K soluble es superior cuando se lo aplica en forma de **Fertilizante (17:6:18:2)**. Mientras que para el Nivel 2 (**T4-T5** y **T9-T10**) el incremento es superior cuando el K proviene de la sal pura (**KCl**), aspecto que se puede atribuir a su solubilidad.

Por otro lado, cuando se encala (**T6**) el suelo con humedad de campo hasta un pH de 5.5, se observa un decrecimiento en el potasio soluble, obteniéndose un valor de 0.005 meq K/100g Suelo Seco, siendo este un valor inferior al obtenido para el suelo testigo con humedad de campo (**T1**: 0.010 meq K/100g Suelo Seco), indicando que no se produce el proceso de fijación, sino que probablemente hay pérdida por lixiviación, ya que las otras formas de K también disminuyen.

Tabla 6. Formas de potasio en el suelo con humedad de campo<sup>(A)</sup>.

TRATAMIENTO <sup>(B)</sup>	NIVEL DE POTASIO AGREGADO (meq K/100gSS)	SOLUBLE (meq K/100gSS)	INTERCAMBIABLE (meq K/100g SS)	NO INTERCAMBIABLE		TOTAL (meq K/100g SS)
				FIJADO (meq K/100g SS)	ENREJADO CRISTALINO (meq K/100gSS)	
<b>T1: Testigo</b>	0	0,010	0,062	0,136	0,733	0,941
<b>T2: Fertilizante</b>	0.160	0,094	0,175	0,101	0,616	0,986
<b>T3: Sal KCl</b>	0.160	0,075	0,176	0,091	0,677	1,019
<b>T4: Fertilizante</b>	0.241	0,137	0,222	0,092	0,572	1,023
<b>T5: Sal KCl</b>	0.241	0,385	0,567	0,140	0,066	1,158
<b>T6: Testigo</b>	0	0,005	0,049	0,108	0,654	0,815
<b>T7: Fertilizante</b>	0.160	0,056	0,202	0,129	0,545	0,932
<b>T8: Sal KCl</b>	0.160	0,046	0,199	0,132	0,483	0,861
<b>T9: Fertilizante</b>	0.241	0,102	0,254	0,120	0,451	0,927
<b>T10: Sal KCl</b>	0.241	0,377	0,495	0,275	0,011	1,158

(A) Promedio de nueve lecturas por cada tratamiento para cada una de las formas de potasio.

(B) Descripción de cada uno de los tratamientos (Ver Tabla 2 Diseño Experimental).

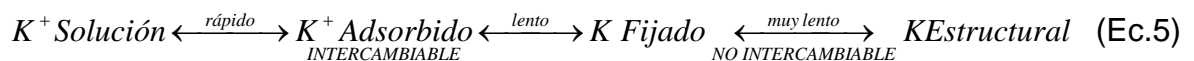
## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Analizando los contenidos de potasio soluble y potasio intercambiable para el suelo testigo con humedad de campo (**T1**) de la Tabla 6 y de las Figuras 17 y 18; se observa que el potasio soluble es menor que el intercambiable (0.010 meq K/100g Suelo Seco y 0.062 meq K/100g Suelo Seco); debido posiblemente a que el K soluble está siendo absorbido por la planta o también se está perdiendo por procesos de lixiviación, ya que las condiciones físicas y químicas del suelo tales como su valor de pH 4.96 y su textura franco–arenosa, inducen a una alta solubilidad de este nutriente y a una pérdida por lavado.

### 5.2.1.2. Potasio intercambiable

Desde el punto de vista de su disponibilidad para las plantas, el **potasio intercambiable**, es denominado como fácilmente aprovechable y existe en equilibrio dinámico en el suelo con el potasio soluble para satisfacer las necesidades de este elemento en la planta, en este estudio se presenta un aumento considerable del K intercambiable en los diferentes tratamientos aplicados al suelo con humedad de campo, de acuerdo a la Tabla 6 y a las Figuras 17 y 18.

En cuanto al K intercambiable se observa mayor incremento cuando el K se adiciona en forma de sal pura (**KCl**) (**T3** y **T5**), debido probablemente a la alta solubilidad de esta sal, en donde el ión  $K^+$  es fácilmente intercambiable por otros cationes ( $Ca^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Mg^{2+}$ ) presentes en el complejo coloidal, esto sucede porque si el  $K^+$  aumenta en cantidades superiores que las requeridas por la planta, el exceso va a pasar primero a formas intercambiables y posteriormente a formas no intercambiables <sup>(5)</sup>; este comportamiento se muestra en la ecuación 5:



Se observa además que cuando se encala el suelo (**T6**), el K intercambiable disminuye con respecto al suelo sin encalar (**T1**) en un 21.3%, contrario a lo esperado, ya que al aumentar el valor de pH se aumentaría la capacidad de intercambio catiónico (CIC), en donde se intercambian iones de mayor valencia, en este caso los iones  $Ca^{2+}$  provenientes del hidróxido de calcio (Cal agrícola) empleado para este proceso, por los iones  $K^+$  de menor valencia presentes en el complejo coloidal del suelo. El calcio por su doble valencia, desplaza a dos iones potasio de la fase intercambiable a la fase soluble dándose posibles pérdidas por lixiviación.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

El Nivel 2 de K (**T10**) a partir de la sal analítica (**KCl**), produce un incremento significativo del K intercambiable (superior al 100%) con respecto al Nivel 1 (**T8**); mientras que el incremento producido por el Nivel 2 de fertilizante (**T9**) con respecto a su Nivel 1 (**T7**) corresponde solamente al 26%, debido a que en el fertilizante la solubilidad del potasio es inferior a la de la sal.

### 5.2.1.3. Potasio No Intercambiable

El **potasio no intercambiable** (dentro de esta fracción de potasio se encuentran el potasio fijado y el potasio del enrejado cristalino), es insoluble en la solución del suelo y se transforma en asimilable por las plantas solamente tras un proceso de disgregación o desfijación, por esto se considera como un depósito del que continuamente se está nutriendo el potasio asimilable.

En general, el potasio añadido al suelo y retenido por éste de manera suficientemente fuerte para no ser reemplazado inmediatamente por sales neutras es considerado como **potasio fijado**. Esta forma de potasio es extraída con ácido nítrico, el cual no solamente extrae el potasio fijado sino el potasio intercambiable y soluble; y de acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que no tiene el mismo comportamiento que las otras formas de potasio, es decir de incremento con las diferentes aplicaciones de los distintos tratamientos. Posiblemente la baja cantidad de potasio disponible no permite fijarlo en forma de minerales insolubles o dentro de las arcillas, puesto que como se demostró anteriormente su contenido es muy bajo; efecto que se observa aún más en el suelo seco, porque la cantidad de potasio fijado disminuye significativamente.

La adición del Nivel 1 (**T2**) y del Nivel 2 (**T4**) de fertilizante al suelo producen una disminución en el potasio fijado, debido posiblemente a que todo el potasio adicionado pasa a las formas soluble e intercambiable, de acuerdo a los datos reportados en la Tabla 6; puesto que cuando se agrega fertilizante al suelo éste trae cambios en la dinámica del potasio, por eso, si los sitios de fijación se encuentran poco saturados, el ingreso de K al sistema puede implicar un incremento de la disponibilidad actual del nutriente para el cultivo, además de una fuente de reserva futura de acuerdo a lo expuesto por CONTI, M. <sup>(5)</sup>.



## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

El tratamiento **T3** (Nivel 1 de **KCl**) presenta un comportamiento similar al **T2** (Nivel 1 de **Fertilizante**), mostrando una disminución en el potasio fijado. Pero para el tratamiento **T5** (Nivel 2 de **KCl**) se observa un aumento en esta forma de potasio respecto a **T1**, que difiere de **T4** (Nivel 2 de **Fertilizante**) porque al adicionar el Nivel 2 de sal analítica (**KCl**), la solución del suelo se satura de iones  $K^+$  induciendo a un desplazamiento del equilibrio hacia los espacios hexagonales de las arcillas.

No se observa en ningún caso un incremento en la fijación de K cuando se encala el suelo, indicando que las arcillas presentes en este suelo no tienen esta capacidad de fijación que corresponde a las arcillas tipo 2:1. Probablemente las arcillas presentes son del tipo 1:1 típicas de los suelos andisoles.

Tampoco se observa un incremento en la fijación cuando se encala y se aumenta el nivel de K proveniente del **Fertilizante**, pero si se observa incremento en la fijación cuando se encala y se incrementa el nivel de K proveniente de la **Sal**, indicando que en este último caso la solubilidad permite un desplazamiento hacia las arcillas. Probablemente porque el potasio está siendo liberado de los minerales primarios que contienen potasio en su estructura, tales como la Muscovita  $[KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2]$ , la Biotita  $[K(Mg,Fe^{2+},Fe^{3+},Mn)_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2]$  y la Flogopita  $[KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2]$  <sup>(3)</sup>, haciendo que éste se equilibre rápidamente con las otras formas de potasio.

El **potasio del enrejado cristalino** se torna disponible para la planta a medida en que los agentes meteorizantes actúan sobre los minerales que lo contienen y por consiguiente es disponible a largo plazo. Esta forma de K presenta una disminución constante en cada uno de los tratamientos aplicados al suelo; sin embargo, esta forma constituye el mayor componente del K total del suelo.

El K del **enrejado cristalino** disminuye con cada uno de los tratamientos aplicados, siendo mayor la disminución cuando se encala el suelo, debido a la saturación potásica en suelo, es decir, que entre más potasio se adicione al suelo menor será la fijación que éste presente y su pérdida aumenta posiblemente por procesos de lavado o por el paso a formas intercambiables. Esta disminución es bastante marcada para los tratamientos correspondientes con Nivel 2 de **KCl**, debido posiblemente a que la saturación potásica de la solución del suelo alcanzó un máximo, sin permitir su fijación y con tendencia hacia la liberación de potasio, aumentando así el potasio disponible (K soluble y K intercambiable) para las plantas por estar más saturada la capacidad fijadora de este nutriente <sup>(18)</sup>.

Figura 17. FORMAS DE POTASIO EN EL SUELO CON HUMEDAD DE CAMPO (SIN ENCALAR)

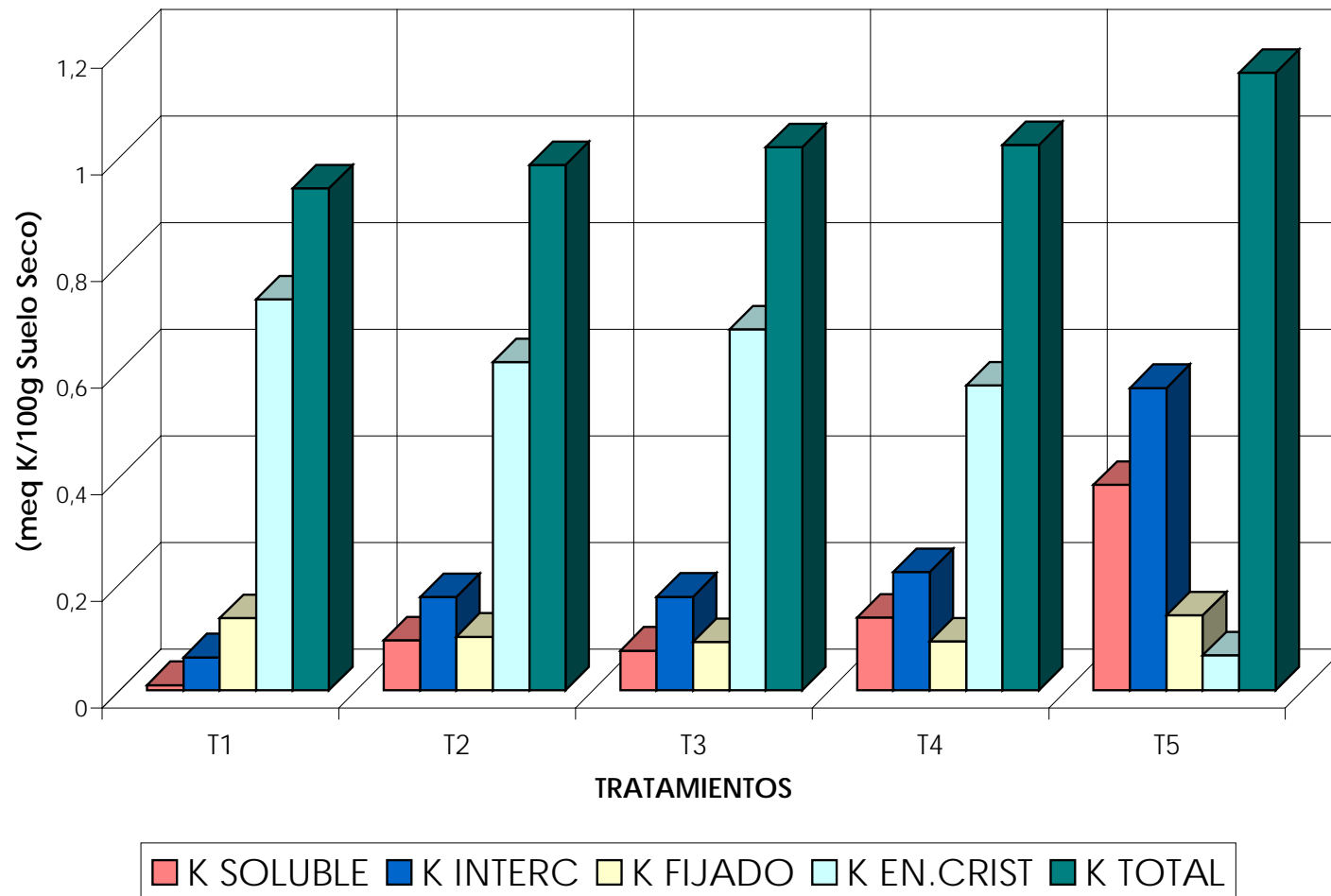
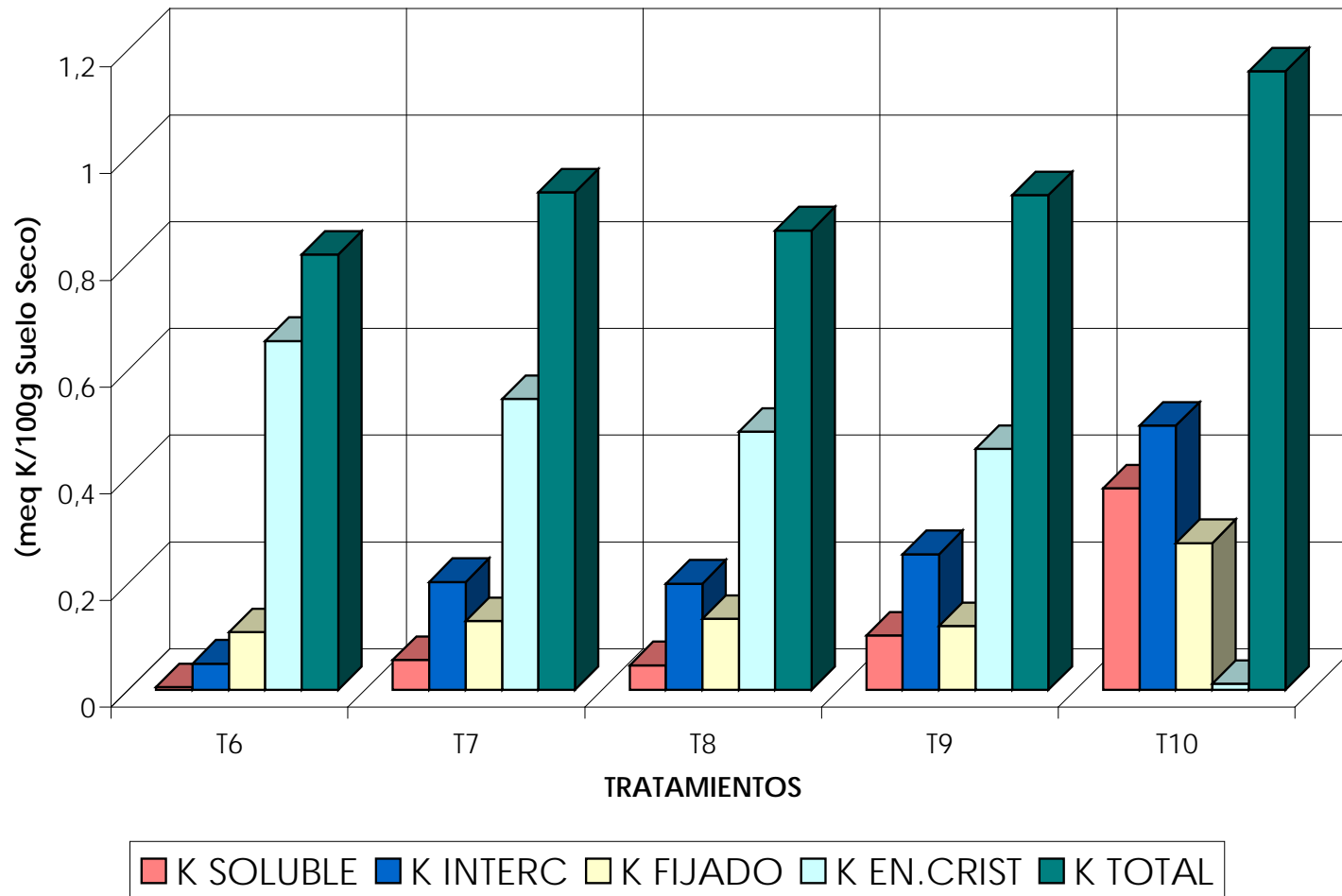


Figura 18. FORMAS DE POTASIO EN EL SUELO CON HUMEDAD DE CAMPO (ENCALADO)



## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

### 5.2.2. Análisis de las formas de K en el Suelo Seco.

De igual forma que en el suelo húmedo, se observa que en el suelo seco (Tabla 7 y Figuras 19 y 20) los contenidos de K soluble, intercambiable y total aumentan, mientras que los contenidos de K fijado y del enrejado cristalino disminuyen a medida que se adicionan los diferentes niveles de potasio provenientes tanto del **Fertilizante (17:6:18:2)** como de la **Sal analítica (KCl)** en los distintos tratamientos (**T11-T20**). Sin embargo el incremento es superior en el suelo seco debido probablemente al efecto de disminución de dilución. El incremento producido por la aplicación de la sal analítica (**KCl**), es superior al del fertilizante.

#### 5.2.2.1. Potasio soluble

Después de encalar (**T16**), los tratamientos **T17**, **T19**, **T18** y **T20** producen un aumento en la cantidad de **potasio soluble** de acuerdo a los niveles de fertilizante y de sal analítica (KCl) aplicados, respectivamente. Pero, este aumento es menor que el obtenido para el suelo seco sin encalar como se muestra en la Tabla 7 (**T11**, **T12**, **T13**, **T14**, **T15**), debido a que el potasio se solubiliza mejor en rangos ácidos de pH, tales como 4.96 correspondiente al pH de esta muestra de suelo y porque al aumentar la concentración de potasio en la solución del suelo poco después de la aplicación de fertilizantes potásicos, parte de éste pasará de la solución al material adsorbente a donde se unirá electrostáticamente <sup>(6)</sup>.

#### 5.2.2.2. Potasio Intercambiable

Para el **potasio intercambiable** en el suelo seco testigo (**T11**) el valor obtenido es mayor que para el suelo testigo con humedad de campo (**T1**), posiblemente porque el secado provoca una reorganización en la mineralogía del suelo, relacionada con el grado de cristalización e hidratación de los aluminosilicatos amorfos, que pueden reducir la fijación de potasio <sup>(21)</sup>. Además, el aumento en la temperatura (secamiento) provoca la apertura de las estructuras de minerales micáceos favoreciendo la liberación de este elemento y la saturación potásica del suelo <sup>(6)</sup>. El valor reportado para **T16** es menor que para **T11**, ya que tanto el proceso de secamiento como el de enclamiento influyen sobre la determinación de potasio en el suelo.

Para los tratamientos **T12** y **T14** el K intercambiable aumenta de acuerdo a la cantidad de fertilizante aplicado; es decir, que al aplicar el Nivel 1 el valor aumenta respecto al suelo seco testigo (**T11**) y al aplicar el Nivel 2, éste aumenta respecto al Nivel 1. Lo mismo ocurre después de encalar el suelo, para los tratamientos **T17** y **T19**; pero teniendo en cuenta que el aumento es menor respecto al suelo sin encalar.

Tabla 7. Formas de potasio en el suelo seco<sup>(A)</sup>.

TRATAMIENTO <sup>(B)</sup>	NIVEL DE POTASIO AGREGADO (meq K/100gSS)	SOLUBLE (meq K/100gSS)	INTERCAMBIABLE (meq K/100g SS)	NO INTERCAMBIABLE		TOTAL (meq K/100gSS)
				FIJADO (meq K/100g SS)	ENREJADO CRISTALINO (meq K/100gSS)	
<b>T11: Testigo</b>	0	0,027	0,188	0,108	0,503	0,826
<b>T12: Fertilizante</b>	0.160	0,074	0,318	0,043	0,598	1,032
<b>T13: Sal KCl</b>	0.160	0,057	0,312	0,048	0,445	0,862
<b>T14: Fertilizante</b>	0.241	0,114	0,364	0,124	0,311	0,913
<b>T15: Sal KCl</b>	0.241	0,340	0,697	0,091	0,008	1,136
<b>T16: Testigo</b>	0	0,015	0,121	0,040	0,483	0,659
<b>T17: Fertilizante</b>	0.160	0,057	0,292	0,046	0,396	0,791
<b>T18: Sal KCl</b>	0.160	0,059	0,308	0,021	0,390	0,778
<b>T19: Fertilizante</b>	0.241	0,081	0,389	0,036	0,353	0,858
<b>T20: Sal KCl</b>	0.241	0,317	0,760	0,066	0,008	1,152

(A) Promedio de nueve lecturas por cada tratamiento para cada una de las formas de potasio.

(B) Descripción de cada uno de los tratamientos (Ver Tabla 2 Diseño Experimental).

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

Según los valores reportados en la Tabla 7 para los tratamientos en los cuales se aplicó Nivel 1 y Nivel 2 de sal analítica (**T13, T15, T18 y T20**), se observa que el comportamiento es similar a la aplicación de fertilizante, es decir, que a medida que se aumenta la concentración de sal aplicada, aumenta el valor de K intercambiable en mayor proporción que para los tratamientos con fertilizante (**T12, T14, T17 y T19**) (Figuras 19 y 20). Debido a que la sal aplicada (**KCl**), presenta una mayor solubilidad que el fertilizante, es fácilmente dissociable y esto permite que el  $K^+$  alcance un equilibrio dinámico más rápidamente que el fertilizante.

### 5.2.2.3. Potasio No Intercambiable

El **potasio fijado**, generalmente disminuye con los diferentes tratamientos aplicados de igual forma que en el suelo húmedo, posiblemente porque no existen arcillas tipo 2:1 capaces de fijar este nutriente. Contrario a los postulados existentes <sup>(9)</sup>, en este suelo el secamiento no incrementa la fijación de potasio y de esta manera, factores térmicos, que producen la apertura de las estructuras de los minerales micáceos, favorecen la liberación de este elemento y la saturación potásica del suelo aumentando así su disponibilidad.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, el suelo testigo con humedad de campo (**T1**), presentó un valor de K **fijado** mayor que para el suelo seco testigo (**T11**), confirmando que en este suelo el proceso de secamiento disminuye la capacidad fijadora del suelo, probablemente debido a la no presencia de arcillas tipo 2:1 y a propiedades químicas tales como, pH ácido, CIC alta, alto contenido de materia orgánica, entre otros; las cuales no permiten la fijación y por consiguiente la cantidad de potasio fijado se ve disminuida.

Para los tratamientos que corresponden a la adición de **KCl (T13, T15, T18, T20)**, los valores obtenidos de potasio **fijado** incrementan proporcionalmente de acuerdo al aumento en el nivel de K aplicado, pero no crece con respecto al valor obtenido para el suelo seco testigo (**T11**), por lo tanto, este aumento no se puede relacionar con una fijación de potasio, ya que se observa también un incremento proporcional de las formas de K soluble e intercambiable.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

El **potasio del enrejado cristalino** disminuye, en todos los tratamientos puesto que está pasando a otras formas de potasio por el equilibrio dinámico confirmando nuevamente que este suelo no presenta fijación de K. El encalamiento igualmente que en el suelo húmedo produce disminución en el valor obtenido para el potasio del enrejado cristalino.

El **potasio total** se refiere a todo el potasio contenido en el suelo, sin considerar la forma en la que éste se pueda encontrar. En los resultados obtenidos (Tabla 6 – 7) se observa como es de esperarse, que la cantidad de potasio total para el suelo aumente con cada uno de los tratamientos aplicados, tanto para el suelo con humedad de campo como el suelo seco. (Figuras 17, 18, 19, 20).

De acuerdo a los resultados presentados en las Tablas 6 y 7, se observa que el contenido de potasio disponible para la planta (K soluble e intercambiable presente en el suelo,) es deficiente tanto para el suelo con humedad de campo testigo como para el suelo seco testigo, debido al poder de lixiviación o lavado que tiene este elemento en este tipo de suelos como se mencionó anteriormente. La deficiencia es mayor en el suelo húmedo posiblemente porque el secado provoca la apertura de las estructuras de minerales micáceos <sup>(5)</sup> o porque el secado aumenta obviamente la concentración de nutrientes en el suelo. Sin embargo esta deficiencia se suple desde el primer nivel de potasio aplicado.

Figura 19. FORMAS DE POTASIO EN EL SUELO SECO (SIN ENCALAR)

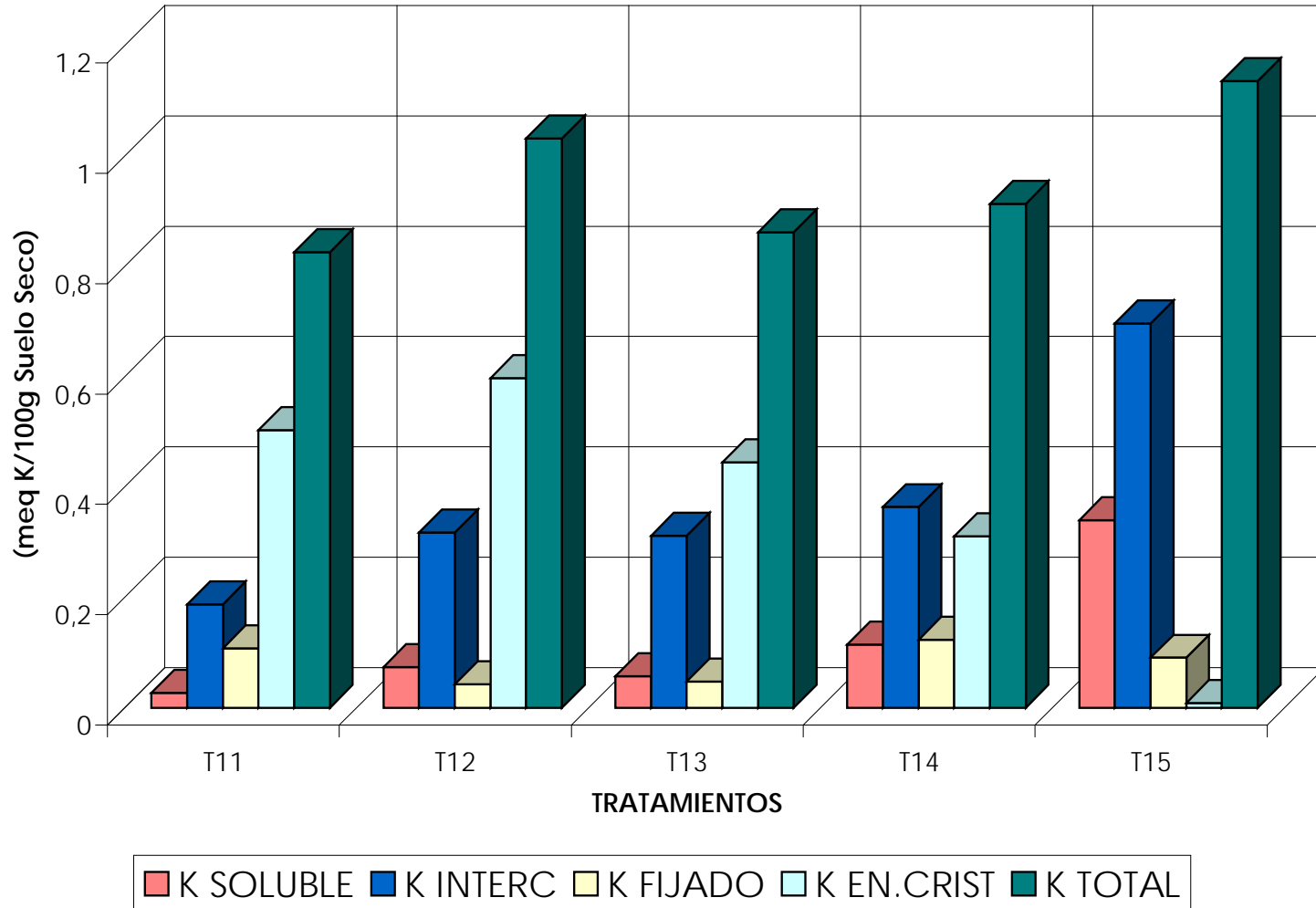
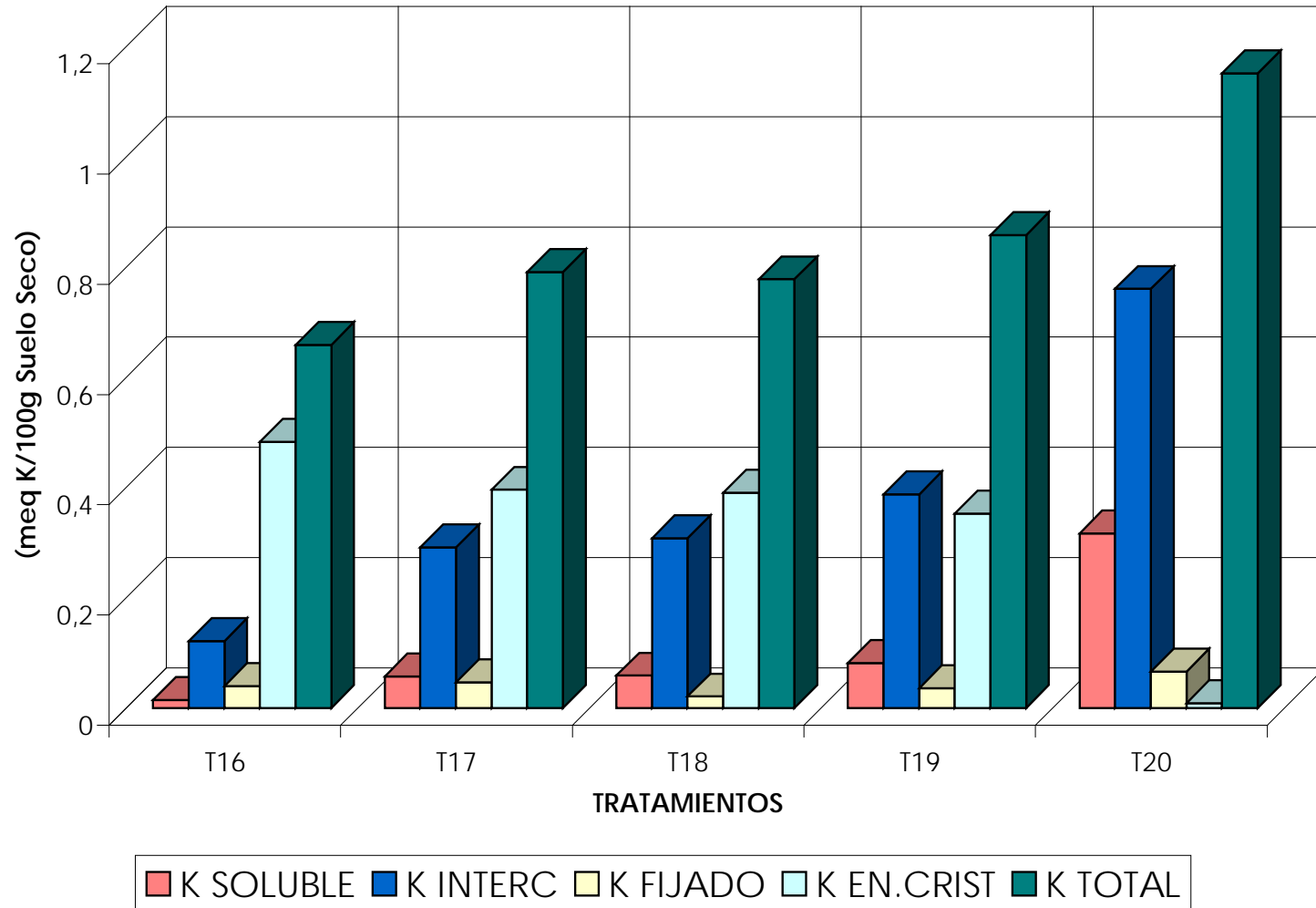




Figura 20. FORMAS DE POTASIO EN EL SUELO SECO (ENCALADO)



## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Inicialmente se someten los resultados a una prueba de Normalidad y homogeneidad de Varianzas en donde se detecta que la mayoría de las varianzas son desiguales y por lo tanto, los resultados no cumplen la homogeneidad de varianzas. Por esta razón, inicialmente se aplican pruebas no paramétricas como la de Kruskal-Wallis cuyos resultados se reportan en la Tabla 8.

**Tabla 8. Prueba de Kruskal-Wallis (a)**

Estadísticos de contraste<sup>a,b</sup>

	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
Chi-cuadrado	177.307	177.390	142.588	168.817	170.351
gl	19	19	19	19	19
Sig. asintót.	.000	.000	.000	.000	.000

a. Prueba de Kruskal-Wallis

b. Variable de agrupación: TRATAMIENTOS

En la Tabla 8 se puede apreciar que si hay diferencia significativa para todos los resultados de cada una de las formas de K, ya que el valor de la significancia en todos los casos, es menor de 0,05. Por esta razón, de todas formas, se aplica pruebas paramétricas de comparaciones múltiples, estableciendo así un análisis de varianza (ANOVA) para todas las formas de K cuyos resultados se relacionan en la Tabla 9.

**Tabla 9. Análisis de varianza para las diferentes formas de K**

ANOVA

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
K SOLUBLE	Inter-grupos	2.675	19	.141	10504.674	.000
	Intra-grupos	.002	160	.000		
	Total	2.677	179			
K INTERC	Inter-grupos	6.416	19	.338	913.525	.000
	Intra-grupos	.059	160	.000		
	Total	6.475	179			
K FIJADO	Inter-grupos	.545	19	.029	64.563	.000
	Intra-grupos	.071	160	.000		
	Total	.616	179			
K EN.CRIST	Inter-grupos	8.937	19	.470	267.660	.000
	Intra-grupos	.281	160	.002		
	Total	9.218	179			
K TOTAL	Inter-grupos	3.408	19	.179	108.912	.000
	Intra-grupos	.264	160	.002		
	Total	3.672	179			

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

El ANOVA revela que hay diferencia significativa entre los resultados de las diferentes formas de K (Sig < 0.05). Sin embargo, esta prueba no indica entre cuáles datos está la diferencia y por esto se aplica la Prueba de DUNCAN para cada una de las formas de K, cuyos resultados se muestran en las Tablas 10, 11, 12, 13 y 14.

En la **Tabla 10** se aprecian las diferencias entre los resultados correspondientes al K soluble para los diferentes tratamientos (**T1** al **T20**, cuya descripción se encuentra en la Tabla 2). Se observan 16 columnas correspondientes al mismo número de subconjuntos. Los datos del subconjunto 16 correspondientes al K soluble proveniente del tratamiento **T5** (Suelo Húmedo con Nivel 2 de KCl sin encalar) son significativamente superiores a los datos provenientes de todos los otros tratamientos, indicando un alto aporte de K a la forma disponible por parte de este nivel de sal, inclusive superior al nivel adecuado para la fertilidad de un suelo. Le siguen en orden decreciente los niveles de K provenientes de los tratamientos: **T10 > T15 > T20 > T4 > T14 > T9 > T2 > T19 > T3 = T12 > T18 = T17 = T13 = T7 > T8 > T11 > T16 > T1 > T6**. Estos últimos cuatro tratamientos pertenecen al suelo sin aplicación de ningún nivel de K, que como es de esperarse, presentan el más bajo valor de K soluble, estando a niveles inferiores al de un suelo fértil. Se deduce por lo tanto, que la aplicación de los diferentes niveles de K hacen aportes significativamente diferentes al suelo.

En el grupo 6 se encuentran los valores de K soluble provenientes de los tratamientos **T7, T13, T17 y T18** (todos implican Nivel 1 de K aplicado), entre los cuales no existe diferencia significativa, indicando que todos estos tratamientos incrementan de igual forma el contenido de K soluble respecto a los suelos sin ninguna fortificación, sin importar el encalamiento, secamiento o el tipo de fuente de K aplicado.

En el grupo 7 se encuentra que no hay diferencia significativa entre el efecto de los tratamientos **T3 y T12**, significando nuevamente que ni el secamiento ni la fuente de K influyen sobre el contenido de K soluble en este suelo. Contrario al Nivel 1, para el Nivel 2 tanto de fertilizante como de la sal si hay influencia del secamiento y del encalamiento sobre el incremento de K soluble, de tal manera que hay menor incremento de K cuando se encala y se seca el suelo.

**Tabla 10. Prueba de DUNCAN para resultados de K Soluble.**

**K SOLUBLE**

Duncan<sup>a</sup>

TRATAMIENTO	N	Subconjunto para alfa = .05															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
6	9	.004811															
1	9		.010144														
16	9			.014600													
11	9				.027064												
8	9					.045889											
7	9						.055878										
13	9						.057067										
17	9						.057211										
18	9						.058833										
12	9							.073478									
3	9							.074584									
19	9								.081244								
2	9									.093911							
9	9										.101856						
14	9											.114267					
4	9												.136867				
20	9													.317000			
15	9														.340244		
10	9															.377178	
5	9																.385300
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	.121	.522	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 9.000.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

En la **Tabla 11** se encuentran los resultados de la prueba de DUNCAN para el K intercambiable. En ella se detectan 14 columnas correspondientes a 14 subconjuntos de datos.

En orden decreciente de contenido de K intercambiable se observa que **T20 > T15 > T5 > T10 > T19 > T14**, indicando que el Nivel 2 de Sal produce mayor efecto que el mismo nivel de Fertilizante sobre el suelo, debido a la mayor solubilidad de la sal. Además, se deduce que el enclamiento en este caso aumenta el K intercambiable sin importar su fuente, contrario a su efecto sobre el K soluble como se demostró anteriormente y como era de esperarse, debido a que el enclamiento aumenta la capacidad de intercambio catiónico, pero a su vez, la concentración de K es tan alta, que impide su desplazamiento hacia la solución externa del suelo, predominando así la concentración sobre la valencia de los cationes. El secamiento también produce incremento sobre el K intercambiable (**T20, T15 > T5, T10**).

En la columna 8 se aprecian tres datos correspondientes al K intercambiable de los tratamientos **T12 = T13 = T18** entre los cuales no hay diferencia significativa indicando que el enclamiento no afecta el contenido de K intercambiable cuando se aplican niveles bajos ya sea de fertilizante o de sal. En la columna 7 se encuentran los datos provenientes de **T18 = T17** que indica nuevamente que el enclamiento no altera el contenido de K sin importar su fuente cuando el suelo está seco y cuando se aplican niveles bajos de K, pero el enclamiento si afecta el resultado cuando el suelo está húmedo indicando que la reacción de la cal sucede inmediatamente debido a que necesita agua para ello como se deduce de las columnas 6 y 5 respectivamente.

Además, se observa que en la columna 4 se encuentran agrupados los tratamientos **T7 = T8 = T11** mostrando que el secamiento del suelo produce el mismo efecto que la aplicación de niveles bajos de K proveniente tanto de sal como de fertilizante en el suelo húmedo, indicando así que el K se lixivia fácilmente en este tipo de suelo. Este mismo comportamiento se aprecia en la columna 3 de esta tabla en donde los tratamientos **T11, T3 y T2** no presentan diferencia significativa. De estas dos columnas se deduce igualmente que el enclamiento produce un aumento sobre el contenido de K intercambiable también para niveles bajos de K, efecto atribuible al aumento de la capacidad de intercambio catiónico. Cuando no se aplica K, el enclamiento produce incremento del K intercambiable si hay secamiento del suelo, como se deriva de las columnas 2 y 1.

**Tabla 11. Prueba de DUNCAN para resultados de K Intercambiable.**

**K INTERC**

Duncan<sup>a</sup>

TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = .05													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
6	9	.049244													
1	9	.062200													
16	9		.121278												
2	9			.175022											
3	9			.175778											
11	9			.187733	.187733										
8	9				.198989										
7	9				.202089										
4	9					.221956									
9	9						.254022								
17	9							.291589							
18	9							.307700	.307700						
13	9								.311856						
12	9								.317467						
14	9									.363944					
19	9										.387833				
10	9											.495200			
5	9												.567056		
15	9													.696644	
20	9														.760256
Sig.		.155	1.000	.189	.137	1.000	1.000	.077	.314	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 9.000.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

En la **Tabla 12** se presentan los resultados de la prueba de DUNCAN para el K fijado. En ella se observan 8 grupos de datos. En la columna 8 se encuentra únicamente el **potasio fijado** correspondiente al tratamiento **T10** siendo significativamente superior al efecto producido por todos los otros tratamientos. Este resultado indica que probablemente un nivel alto de K proveniente de una sal altamente soluble y en un suelo húmedo es la única forma de producir fijación en este tipo de suelos, pero esta fijación se atribuiría a una saturación de iones  $K^+$  en la fase coloidal y en la solución del suelo.

En la columna 7 se encuentran agrupados los tratamientos **T5 = T1 = T8 = T7 = T14 = T9**, mostrando que ni el enclamiento ni el secamiento ni la fuente ni el nivel de K alteran los resultados de la fijación indicando nuevamente que no se produce fijación en este tipo de suelos, puesto que además en este grupo está incluido el testigo absoluto de este suelo. Igual deducción de puede obtener de las otras columnas, generalmente en la mayoría de ellas se encuentran agrupados los testigos con los otros tratamientos.

La **Tabla 13** muestra los resultados de la prueba de DUNCAN para el K del enrejado cristalino. En ella se aprecian 13 columnas.

En la columna 13 de esta tabla se observa el K del enrejado cristalino correspondiente al testigo absoluto (**T1**), siendo significativamente superior al de los otros tratamientos, indicando que este suelo presenta una alta reserva de minerales de K y que los diferentes tratamientos tales como enclamiento, secamiento con diferentes niveles y fuentes de K inducen a que esta reserva desplace el equilibrio de las diferentes formas de K hacia formas más disponibles para las plantas. Esta deducción también se aprecia cuando se observa que los tratamientos con niveles superiores de fuentes de sal y de fertilizante inducen a menores contenidos de esta forma de K, ya que se encuentran estos tratamientos ubicados y agrupados a en las columnas correspondientes niveles inferiores de K del enrejado cristalino tal como la columna 1, 2 y 3 principalmente.

Al aplicar diferentes niveles de Fertilizante y de Sal al suelo (**T2, T4, T7 y T8**), se observa una diferencia significativa entre ellos, pero no difieren cuando se seca el suelo, lo cual se deduce de las diferentes columnas presentes en la Tabla 13: **T2 = T12** (Columna 10); **T12 = T4** (Columna 9); **T4 = T7** (Columna 8) y **T11=T8=T16** (Columna 7).

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

El encalamiento disminuye el contenido de potasio del enrejado cristalino sin importar los niveles de K aplicados tanto de Fertilizante como de Sal, ya que como se mencionó anteriormente, este proceso conduce a un incremento de formas disponibles para la planta tales como el K intercambiable y soluble.

En la **Tabla 14** se relacionan los datos correspondientes a la prueba de DUNCAN para el K Total, con 8 grupos o subconjuntos.

En el grupo 8 se aprecia que no hay diferencia significativa entre los tratamientos correspondientes al Nivel 2 de KCl con los respectivos tratamientos de secamiento y encalamiento, indicando que esta sal soluble hace un aporte significativo de K al suelo. Se destaca además que el encalamiento y el secamiento del suelo (**T16** en la Columna 1) conducen a pérdida de potasio por lixiviación, sin que implique fijación. Asimismo, se resalta que estos dos procesos (secamiento y encalamiento) no afectan los contenidos de K siempre y cuando se apliquen fuentes de este nutriente principalmente como fertilizante, (Columna 5).



Tabla 12. Prueba de DUNCAN para resultados de K Fijado.

K FIJADO

Duncan<sup>a</sup>

TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = .05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
18	9	.020767								
19	9	.036011	.036011							
16	9	.039556	.039556							
12	9		.042944							
17	9		.046367	.046367						
13	9		.047900	.047900						
20	9			.066067						
3	9				.090811					
15	9				.090911					
4	9				.092044					
2	9				.100767	.100767				
6	9				.107667	.107667	.107667			
11	9				.108000	.108000	.108000			
9	9					.119500	.119500	.119500		
14	9						.123656	.123656		
7	9						.128589	.128589		
8	9							.132522		
1	9							.135544		
5	9							.140522		
10	9								.274811	
Sig.		.075	.295	.062	.134	.087	.061	.065		1.000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 9.000.

**Tabla 13. Prueba de DUNCAN para resultados de K del Enrejado Cristalino.**

**K EN.CRIST**

Duncan<sup>a</sup>

TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = .05															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13			
20	9	.008433															
15	9	.008544															
10	9	.011311															
5	9		.065544														
14	9			.311167													
19	9				.353033												
18	9				.390511	.390511											
17	9					.395956											
13	9						.444889										
9	9						.451467										
16	9						.483189	.483189									
8	9						.483278	.483278									
11	9							.503022									
7	9								.545211								
4	9								.572144	.572144							
12	9									.597878	.597878						
2	9										.615833	.615833					
6	9											.653578	.653578				
3	9												.677411	.677411			
1	9																.733289
Sig.		.892	1.000	1.000	.060	.783	.077	.349	.175	.195	.365	.058	.230				1.000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 9.000.

**Tabla 14. Prueba de DUNCAN para resultados de K Total.**

**K TOTAL**

Duncan<sup>a</sup>

TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = .05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
16	9	.658622								
18	9		.777811							
17	9		.791122	.791122						
6	9		.815300	.815300						
11	9			.825822	.825822					
19	9				.858122					
8	9				.860678					
13	9				.861711					
14	9					.913033				
9	9					.926844				
7	9					.931767				
1	9					.941178				
2	9						.985533			
3	9						1.018567	1.018567		
4	9						1.023011	1.023011		
12	9							1.031767		
15	9									1.136344
20	9									1.151756
5	9									1.158422
10	9									1.158500
Sig.		1.000	.065	.088	.088	.184	.065	.520		.298

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 9.000.

### 6. CONCLUSIONES

- La muestra de suelo analizada se destaca por tener una textura franco arenosa, baja densidad real, bajo contenido de arcillas, muy fuerte acidez, alto contenido de MO, media saturación de aluminio, alta humedad, alta CIC y bajos contenidos de nutrientes como Ca y Mg.
- El contenido de potasio disponible para la planta (K soluble e intercambiable presente en el suelo), es deficiente tanto para el suelo con humedad de campo testigo como para el suelo seco testigo.
- La deficiencia de potasio en este suelo se logra suplir desde el primer nivel de K proveniente tanto de fertilizante como de sal.
- Este suelo no presenta capacidad de fijación del K, pero si produce pérdidas por lixiviación o lavado debido no solamente a su textura si no a sus características químicas.
- Para niveles bajos (0.160 meq K/100gsuelo) de fuentes de potasio, ni el encalamiento, secamiento y fuente, influyen sobre el contenido de K soluble en este suelo.
- Para niveles altos (0.241 meq K/100gsuelo) tanto de fertilizante como de sal, hay influencia del secamiento y del encalamiento sobre el incremento de K soluble, de tal manera que hay menor incremento de K cuando se encala y se seca el suelo.
- El encalamiento no afecta el contenido de K intercambiable cuando se aplican niveles bajos ya sea de fertilizante o de sal, mientras que este proceso y el secamiento aumentan el K intercambiable sin importar la fuente aplicada en niveles altos.
- El suelo estudiado presenta una reserva de minerales de potasio, los cuales por procesos de meteorización son capaces de liberar el K presente, de sus estructuras y desplazar el equilibrio de las diferentes formas no intercambiables hacia formas más disponibles para las plantas.
- El encalamiento y el secamiento del suelo de la vereda La Aurelia (Cajibío) conducen a pérdidas de potasio por lixiviación, sin que implique fijación. Estos dos procesos no afectan los niveles de K total en este suelo, siempre y cuando se aplique fuentes de este nutriente.

**BIBLIOGRAFÍA**

- (1) FASSBENDER, H., y BOMEMISZA, E. Química de Suelos con Énfasis en Suelos de América Latina. Segunda Edición. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica. 1987.
- (2) ZAPATA, R. 2002. Estudio de la Secuencia de Meteorización Química de un Andisol. Revista ICNE. Universidad Nacional, Sede Medellín.
- (3) GARAVITO N., F. Propiedades químicas de los suelos. República de Colombia. Ministerio de Hacienda y Crédito Público. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi". Subdirección Agrológica. Segunda Edición. Volumen X. No.11. Capítulo IX: El Potasio en el suelo. 275-288pp. Santa Fé de Bogotá, 1979.
- (4) SILVA C, A. F. Dinámica, Disponibilidad y Fijación de Potasio en Suelos Cítricos de Caicedonia, Departamento del Valle del Cauca. Tesis (Ingeniero Agrónomo). Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. 226p. 2000.
- (5) CONTI, M. E. Dinámica de la liberación y fijación de Potasio en el suelo. Cátedra de Edafología. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 1999.
- (6) GIRALDO R., E. Agroquímica: Un estudio de los nutrientes esenciales en la producción agrícola. Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación. Departamento de Química. Popayán, Noviembre 2002.
- (7) THOMAS, G. W. and HIPPEL, B. W. Soil factors affecting potassium availability. In: Kilmer, V. J., Younits, S. E., and Brady, N. C. eds. The role of potassium in agriculture. Madison, Wis., American Society of Agronomy. 269-291pp. 1988.
- (8) PAGE, J. B., y BAVER, L. D. Ionic size in relation to fixation of cations by colloidal clay. Soil Science Society America. Proc. Vol 4:150. 1979.
- (9) VOLK, N. J. The fixation of potash in difficultly available form in soil. Soil Science. 37:267-287. 1984.
- (10) GRIMME, H. The dynamics of potassium in the soil-plant system. In: Potassium in the agricultural systems of the humid tropics. Bangkok, International Potash Institute. 127-54p. 1985.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- (11) AYARZA, M. A. Potassium dynamics in a humid tropical pasture in the Peruvian Amazon. En Ph. D thesis. Raleigh, North Carolina State University. 161p. 1988.
- (12) RODRÍGUEZ, S. A. Fertilizantes, nutrición vegetal. AGT Editor. Segunda reimpresión. México, D. F. 1992.
- (13) MALAVOLTA, H. Alimentacao mineral das plantas. Ed. Pioneira. Sao Paulo, Brasil. 116p. 1974
- (14) HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. Soil fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management. 6. ed. Upper Saddle River, Prentice Hall. 499p. 1999
- (15) SKOOG, Douglas J. Análisis Instrumental. MCGRAW-HILL, México. Cuarta edición. 1994. Págs. 227-268, 625-659.
- (16) BRAVO, I. y GIRALDO, E. Manual de prácticas de química agrícola: Análisis de suelos. Departamento de Química. Universidad del Cauca. 2003.
- (17) GONZÁLES, F. A. *et al.* Métodos Analíticos de Laboratorio de Suelos. Quinta Edición. República de Colombia, Ministerio de Hacienda y Crédito Público. INSTITUTO GEOGRÁFICO "AGUSTÍN CODAZZI", (IGAC). Bogotá, D. E., 1990. Págs: 173–176, 181–184.
- (18) GÓMEZ DE R., C.; CARRILLO P., I. F. y ESTRADA E., G. Fijación de Potasio en andisoles de la zona cafetera. Cenicafé (Colombia). 34(4): 127–144. 1983.
- (19) LANGMYHR, F. J and P. E. PAUS. 1968. The analysis of inorganic siliceous materials by Atomic Absorption Spectrophotometry materials and the hydrofluoric acid decomposition technique. Part I. The Analysis of Silicate Rocks. Anal. Chim. Acta 43: 397–408.
- (20) SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO. Fundamentos para la Interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para riego. Tercera Edición. Santa Fé de Bogotá. 1990.
- (21) DÁVILA P., G. A.; GUERRERO R., R.; ROJAS E., L. A. Disponibilidad de Potasio en algunos suelos palmeros de los Llanos Orientales de Colombia. Revista Suelos Ecuatoriales. Volumen 28: 71 – 79. 1998.

- (22) HENAO T., M. C.; HERNÁNDEZ G., E. Disponibilidad de Potasio en suelos derivados de cenizas volcánicas y su relación con la nutrición de café en la etapa vegetativa. *Cenicafé (Colombia)* 53(4): 293 – 305. 2002.
- (23) ROLDÁN, M. F.; VENIALGO, C. A. y GUTIÉRREZ, N. C. Potasio disponible, de reserva y energía de reemplazamiento en suelos y el nivel foliar en rye-grass. Universidad Nacional del Nordeste argentino. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas* 2004.
- (24) RUÍZ R. S. y SADZAWKA A. R. Uso del análisis químico del K del suelo como indicador de la nutrición potásica en la vid y modificación por la fertilización potásica. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación La Platina, Santiago de Chile. Abril 2002.
- (25) Blake, L., S. Mercik, M. Koerschens, K.W.T. Goulding, S. Stempen, A. Weigel, P.R. Poulton, and S. Powlson. 1999. Potassium content in soil, uptake in plants and the potassium balance in three European long-term field experiments. *Plant Soil* 216:1-14.
- (26) Fageria, V.D. Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*. 24(8):1269-1290.
- (27) Fageria, N.K., and V.C. Baligar. 1999. Growth and nutrient concentrations of common bean, lowland rice, corn, soybean and wheat at different soil pH on an inceptisol. *Journal of Plant Nutrition*. 22:1495-1507
- (28) Adams, D., K. Franke, and P. Christensen. 1990. Elevated putrescine levels in grape vine leaves that display symptoms of potassium deficiency. *Am. J. Enol. Vitic* 41:121-125.
- (29) Ruiz, R., y A. Sadzawka. 1986. Fijación de potasio en suelos del valle de Aconcagua. *Agricultura Técnica (Chile)* 46:503-505.
- (30) Valenzuela, J., y R. Ruiz. 1984. Corrección de deficiencia de potasio en viñedos regados de la zona de Talca. I. Efecto en la planta. II. Efecto del estudio de potasio en el suelo. *Agricultura Técnica (Chile)* 44:295-298.
- (31) ROSS, G.J.; CLINE, R.A.; GAMBLE, D.S. 1989. Potassium exchange and fixation in some southern Ontario soils. *Canadian Journal of Soil Science* 69:649-661.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- (32) NIEDERBUDDE, E.A. 1986. Factors affecting potassium release and fixation in soils. In XIII Congress of the International Society of Soil Science. Transactions Vol VI, Hamburg. p.1155-1168.
- (33) GOULDING, K.W.T. 1987. Potassium fixation and release. In Methodology in soil-K research. Proceedings of the 20th colloquium of the International Potash Institute held in Baden Bei Wien/Austria. p. 137-154.
- (34) GOULDING, K.W.T..1986. Thermodynamics applied to potassium exchange in aluminosilicate minerals on soils. In XIII Congress of the International Society of Soil Science. Transactions Volume VI, Hamburg.p.1155-1168.
- (35) HOBT, H. 1978. Dinámica del potasio en el suelo. Suelos Ecuatoriales 9(2):86-92.
- (36) SHAVIV, A.; MOHSIN, M.; PRATT, P.F.; MATTIGOD, S.V. 1985. Potassium fixation characteristics of five Southern California soils. Soil Sci. Soc. Ame. J. 49:1105-1109.
- (37) Sparks, D.L., and W.C. Liebhardt. 1981. Effect of long-term lime and potassium applications in quantity intensity (Q/I) relationships in Andy soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 45:786-790
- (38) BROWN, J. H.; GÓMEZ, M. J.; BENZO, Z and VAZ, J. E. Application of the response surface methodology for potassium determination in soils by AAS using the slurry technique. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. Volume 35, Issue 2 , December 1996, Pages 239-247
- (39) BROWN, J. H.; VAZ, J. E.; BENZO, Z and MEJIAS, C. A comparison of extraction and suspension methods for determining exchangeable potassium in soils. Applied Clay Science Volume 14, Issues 5-6, July 1999, Pages 245-255.



## ANEXOS

### Anexo 1. Parámetros de comparación para niveles de fertilidad en suelos de clima medio (SCCS. 2000)

**Tabla 1. Clasificación de las partículas del suelo**

FRACCION	DIÁMETRO (mm)
Arena gruesa	2-0.2
Arena fina	0.20-0.02
Limos	0.02-0.002
Arcillas	<0.002

**Tabla 2. Niveles de densidad real**

NIVEL	BAJO	NORMAL	ALTO	MUY ALTO
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.1 – 2.3	2.3 – 2.5	2.6 – 2.8	> 2.8

**Tabla 3. Niveles de MO en suelos de clima medio**

NIVEL	BAJO	MEDIO	ALTO
% MO	< 3	3 - 5	> 5

**Tabla 4. Clasificación de acidez de suelos de acuerdo al valor de pH.**

pH	CLASIFICACIÓN
4.0 - 4.5	Acidez extrema
4.5 - 5.0	Acidez muy fuerte
5.0 - 5.5	Acidez fuerte
5.5 - 6.0	Acidez media
6.0 - 6.5	Acidez suave
6.5 - 7.0	Acidez muy suave
7.0 - 8.0	Alcalinidad suave
8.0 - 8.5	Alcalinidad moderada
8.5 - 9.0	Alcalinidad moderada
9.0 - 9.5	Alcalinidad fuerte
9.5 - 10.0	Alcalinidad muy fuerte

**Tabla 5. Toxicidad de aluminio en el suelo.**

<b>Al Inter. (meq/100g suelo)</b>		<b>EVALUACIÓN</b>	<b>EFFECTOS TÓXICOS</b>
< 1.5 meq		Bajo	No tóxico
1.6 a 3.0 meq		Medio	Mod. Tóxico
> 3.0 meq		Alto	Tóxico, especialmente en leguminosas
<b>% SATURACIÓN DE ALUMINIO</b>	>60 Reducción severa del crecimiento de plantas	30-60 Reduce moderadamente el crecimiento	<30 Generalmente no tóxica

**Tabla 6. Clasificación del Suelo de acuerdo a niveles de Ca, Mg y K**

<b>NUTRIENTE</b>	<b>(meq / 100g Suelo)</b>		
	<b>BAJO</b>	<b>MEDIO</b>	<b>ALTO</b>
Ca	< 3.00	3.00 - 6.00	> 6.00
Mg	< 1.50	1.50 - 2.50	> 2.50
K	< 0.15	0.15 - 0.30	> 0.30

**Anexo 2.**

**Tabla 1. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo testigo (T1).**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	KFIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T1	1	0,072	0,010	0,062	0,212	0,140	0,730	0,941
T1	1	0,072	0,010	0,062	0,213	0,142	0,731	0,945
T1	1	0,073	0,009	0,064	0,214	0,141	0,736	0,950
T1	2	0,073	0,010	0,063	0,210	0,137	0,731	0,941
T1	2	0,074	0,010	0,063	0,208	0,135	0,739	0,948
T1	2	0,077	0,011	0,066	0,206	0,129	0,743	0,949
T1	3	0,071	0,010	0,061	0,204	0,132	0,734	0,937
T1	3	0,070	0,010	0,060	0,202	0,132	0,724	0,926
T1	3	0,070	0,011	0,059	0,203	0,133	0,732	0,934
<b>PROMEDIO</b>		0,072	0,010	0,062	0,208	0,136	0,733	0,941

**Tabla 2. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo fortificado con Nivel 1 de Fertilizante (17:6:18:2) (T2).**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T2	1	0,265	0,094	0,171	0,382	0,117	0,596	0,978
T2	1	0,261	0,095	0,166	0,361	0,101	0,623	0,984
T2	1	0,265	0,095	0,170	0,360	0,096	0,629	0,989
T2	2	0,272	0,093	0,178	0,373	0,101	0,608	0,981
T2	2	0,268	0,093	0,175	0,374	0,106	0,612	0,985
T2	2	0,276	0,095	0,181	0,365	0,089	0,621	0,986
T2	3	0,271	0,093	0,178	0,372	0,101	0,624	0,996
T2	3	0,268	0,094	0,174	0,374	0,106	0,616	0,990
T2	3	0,276	0,093	0,183	0,367	0,092	0,614	0,981
<b>PROMEDIO</b>		0,269	0,094	0,175	0,370	0,101	0,616	0,986

**Tabla 3. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo fortificado con Nivel 1 de Sal Analítica (KCl) (T3).**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T3	1	0,253	0,076	0,177	0,354	0,101	0,669	1,023
T3	1	0,240	0,075	0,165	0,355	0,115	0,692	1,048
T3	1	0,254	0,074	0,180	0,349	0,095	0,697	1,046
T3	2	0,253	0,074	0,179	0,352	0,099	0,637	0,989
T3	2	0,249	0,075	0,174	0,347	0,098	0,631	0,978
T3	2	0,265	0,075	0,189	0,345	0,081	0,640	0,986
T3	3	0,247	0,076	0,171	0,331	0,084	0,717	1,048
T3	3	0,256	0,075	0,181	0,331	0,074	0,697	1,028
T3	3	0,238	0,073	0,165	0,307	0,070	0,716	1,023
<b>PROMEDIO</b>		0,250	0,075	0,176	0,341	0,091	0,677	1,019

**Tabla 4. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo fortificado con Nivel 2 de Fertilizante (17:6:18:2) (T4).**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T4	1	0,360	0,137	0,223	0,446	0,086	0,573	1,019
T4	1	0,360	0,137	0,223	0,456	0,096	0,547	1,003
T4	1	0,371	0,138	0,233	0,458	0,087	0,548	1,006
T4	2	0,352	0,139	0,213	0,445	0,093	0,606	1,050
T4	2	0,368	0,139	0,230	0,446	0,078	0,602	1,048
T4	2	0,371	0,139	0,232	0,454	0,082	0,584	1,038
T4	3	0,354	0,135	0,219	0,451	0,098	0,569	1,021
T4	3	0,347	0,138	0,209	0,452	0,105	0,562	1,014
T4	3	0,347	0,131	0,216	0,450	0,103	0,559	1,008
<b>PROMEDIO</b>		0,359	0,137	0,222	0,451	0,092	0,572	1,023

**Tabla 5. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo fortificado con Nivel 2 de Sal Analítica (KCl) (T5).**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T5	1	0,928	0,372	0,556	1,093	0,165	0,151	1,244
T5	1	0,940	0,373	0,568	1,095	0,154	0,156	1,251
T5	1	0,946	0,374	0,572	1,097	0,152	0,154	1,251
T5	2	0,945	0,385	0,560	1,092	0,147	0,008	1,099
T5	2	0,946	0,395	0,551	1,094	0,148	0,005	1,100
T5	2	0,938	0,400	0,538	1,085	0,147	0,004	1,089
T5	3	0,944	0,385	0,560	1,092	0,148	0,048	1,140
T5	3	0,990	0,390	0,600	1,094	0,105	0,008	1,103
T5	3	0,995	0,395	0,600	1,095	0,099	0,055	1,150
<b>PROMEDIO</b>		0,952	0,385	0,567	1,093	0,141	0,066	1,158

**Tabla 6. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo encalado (T6).**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T6	1	0,052	0,005	0,047	0,163	0,111	0,731	0,894
T6	1	0,055	0,005	0,050	0,162	0,107	0,726	0,888
T6	1	0,048	0,005	0,043	0,161	0,113	0,724	0,885
T6	2	0,055	0,005	0,050	0,161	0,105	0,503	0,663
T6	2	0,060	0,005	0,055	0,162	0,102	0,498	0,660
T6	2	0,051	0,005	0,046	0,161	0,109	0,534	0,695
T6	3	0,054	0,004	0,050	0,161	0,107	0,710	0,870
T6	3	0,051	0,004	0,047	0,161	0,110	0,714	0,875
T6	3	0,060	0,004	0,056	0,164	0,105	0,743	0,908
<b>PROMEDIO</b>		0,054	0,005	0,049	0,162	0,108	0,654	0,815



**Tabla 7. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo encalado fortificado con Nivel 1 de Fertilizante (17:6:18:2) (T7).**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T7	1	0,252	0,060	0,192	0,387	0,135	0,518	0,904
T7	1	0,252	0,058	0,194	0,386	0,134	0,546	0,932
T7	1	0,255	0,058	0,197	0,393	0,137	0,545	0,937
T7	2	0,269	0,050	0,219	0,385	0,116	0,580	0,965
T7	2	0,265	0,051	0,214	0,388	0,123	0,604	0,991
T7	2	0,266	0,051	0,215	0,395	0,130	0,581	0,976
T7	3	0,253	0,058	0,195	0,381	0,128	0,509	0,889
T7	3	0,254	0,059	0,195	0,383	0,129	0,507	0,890
T7	3	0,257	0,059	0,199	0,383	0,126	0,519	0,902
<b>PROMEDIO</b>		0,258	0,056	0,202	0,387	0,129	0,545	0,932

**Tabla 8. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo encalado fortificado con Nivel 1 de Sal Analítica (KCl) (T8).**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T8	1	0,245	0,045	0,200	0,377	0,132	0,479	0,856
T8	1	0,247	0,045	0,202	0,377	0,130	0,476	0,854
T8	1	0,245	0,046	0,199	0,384	0,139	0,473	0,857
T8	2	0,240	0,046	0,194	0,372	0,132	0,511	0,882
T8	2	0,239	0,046	0,193	0,375	0,135	0,481	0,855
T8	2	0,242	0,047	0,195	0,374	0,132	0,493	0,867
T8	3	0,246	0,046	0,200	0,375	0,129	0,482	0,857
T8	3	0,249	0,045	0,204	0,375	0,126	0,484	0,859
T8	3	0,250	0,046	0,204	0,389	0,138	0,471	0,859
<b>PROMEDIO</b>		0,245	0,046	0,199	0,377	0,133	0,483	0,861

**Tabla 9. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo encalado fortificado con Nivel 2 de Fertilizante (17:6:18:2) (T9).**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T9	1	0,349	0,100	0,249	0,480	0,131	0,451	0,931
T9	1	0,352	0,104	0,248	0,475	0,123	0,451	0,926
T9	1	0,357	0,105	0,252	0,472	0,115	0,460	0,932
T9	2	0,363	0,102	0,261	0,477	0,115	0,445	0,922
T9	2	0,368	0,102	0,265	0,473	0,105	0,458	0,931
T9	2	0,373	0,099	0,274	0,475	0,102	0,443	0,918
T9	3	0,341	0,101	0,241	0,473	0,132	0,456	0,929
T9	3	0,345	0,101	0,245	0,479	0,134	0,448	0,928
T9	3	0,354	0,102	0,252	0,474	0,120	0,452	0,926
<b>PROMEDIO</b>		0,356	0,102	0,254	0,475	0,120	0,451	0,927

**Tabla 10. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo con humedad de campo encalado fortificado con Nivel 2 de Sal Analítica (KCl) (T10).**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T10	1	0,854	0,373	0,481	1,148	0,295	0,010	1,158
T10	1	0,857	0,374	0,483	1,145	0,287	0,023	1,167
T10	1	0,860	0,376	0,485	1,146	0,286	0,019	1,165
T10	2	0,870	0,382	0,488	1,149	0,278	0,001	1,150
T10	2	0,876	0,385	0,491	1,148	0,272	0,002	1,150
T10	2	0,879	0,389	0,490	1,142	0,263	0,009	1,151
T10	3	0,872	0,371	0,501	1,147	0,275	0,015	1,161
T10	3	0,889	0,371	0,517	1,149	0,261	0,016	1,165
T10	3	0,895	0,374	0,521	1,151	0,256	0,007	1,158
<b>PROMEDIO</b>		0,872	0,377	0,495	1,147	0,275	0,011	1,159

**Tabla 11. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco testigo (T11).**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T11	1	0,213	0,027	0,186	0,282	0,069	0,563	0,845
T11	1	0,214	0,027	0,188	0,292	0,078	0,559	0,851
T11	1	0,214	0,027	0,187	0,303	0,089	0,559	0,862
T11	2	0,219	0,027	0,192	0,302	0,084	0,517	0,819
T11	2	0,221	0,027	0,194	0,303	0,082	0,517	0,820
T11	2	0,222	0,027	0,195	0,304	0,081	0,524	0,828
T11	3	0,211	0,028	0,184	0,373	0,162	0,433	0,805
T11	3	0,211	0,028	0,183	0,373	0,162	0,437	0,809
T11	3	0,209	0,028	0,181	0,374	0,166	0,419	0,794
<b>PROMEDIO</b>		0,215	0,027	0,188	0,323	0,108	0,503	0,826

**Tabla 12. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco fortificado con Nivel 1 de Fertilizante (17:6:18:2) (T12).**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T12	1	0,396	0,071	0,325	0,433	0,037	0,690	1,123
T12	1	0,391	0,072	0,319	0,435	0,044	0,692	1,126
T12	1	0,395	0,072	0,323	0,435	0,039	0,694	1,129
T12	2	0,392	0,074	0,318	0,432	0,040	0,572	1,004
T12	2	0,389	0,074	0,314	0,436	0,047	0,576	1,012
T12	2	0,388	0,074	0,314	0,438	0,050	0,576	1,014
T12	3	0,391	0,075	0,316	0,433	0,042	0,523	0,956
T12	3	0,384	0,075	0,309	0,437	0,053	0,519	0,956
T12	3	0,394	0,075	0,319	0,427	0,034	0,539	0,966
<b>PROMEDIO</b>		0,391	0,073	0,317	0,434	0,043	0,598	1,032

**Tabla 13. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco fortificado con Nivel 1 de Sal Analítica (KCl) (T13).**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T13	1	0,362	0,057	0,305	0,414	0,052	0,430	0,844
T13	1	0,360	0,057	0,303	0,415	0,055	0,439	0,854
T13	1	0,377	0,058	0,320	0,419	0,042	0,431	0,851
T13	2	0,359	0,058	0,301	0,415	0,056	0,432	0,847
T13	2	0,373	0,056	0,317	0,420	0,047	0,432	0,852
T13	2	0,373	0,059	0,314	0,418	0,045	0,440	0,858
T13	3	0,375	0,056	0,319	0,413	0,039	0,457	0,870
T13	3	0,370	0,057	0,314	0,414	0,043	0,469	0,883
T13	3	0,372	0,057	0,315	0,424	0,052	0,473	0,897
<b>PROMEDIO</b>		0,369	0,057	0,312	0,417	0,048	0,445	0,862

**Tabla 14. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco fortificado con Nivel 2 de Fertilizante (17:6:18:2) (T14)**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T14	1	0,481	0,111	0,370	0,581	0,100	0,325	0,905
T14	1	0,482	0,111	0,371	0,601	0,119	0,306	0,907
T14	1	0,484	0,112	0,372	0,610	0,126	0,301	0,911
T14	2	0,493	0,113	0,380	0,609	0,116	0,317	0,926
T14	2	0,477	0,118	0,359	0,614	0,137	0,314	0,928
T14	2	0,500	0,118	0,381	0,617	0,117	0,321	0,938
T14	3	0,459	0,106	0,353	0,593	0,134	0,301	0,894
T14	3	0,470	0,120	0,350	0,595	0,125	0,305	0,900
T14	3	0,459	0,120	0,339	0,598	0,140	0,311	0,909
<b>PROMEDIO</b>		0,478	0,114	0,364	0,602	0,124	0,311	0,913



**Tabla 15. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco fortificado con Nivel 2 de Sal Analítica (KCl) (T15)**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T15	1	0,967	0,334	0,633	1,110	0,143	0,012	1,122
T15	1	1,035	0,339	0,696	1,114	0,079	0,014	1,128
T15	1	1,058	0,341	0,717	1,115	0,057	0,008	1,124
T15	2	0,972	0,334	0,638	1,145	0,173	0,007	1,152
T15	2	1,040	0,337	0,703	1,148	0,108	0,006	1,154
T15	2	1,143	0,337	0,806	1,153	0,010	0,012	1,165
T15	3	0,973	0,343	0,630	1,120	0,148	0,006	1,126
T15	3	1,038	0,347	0,692	1,121	0,083	0,006	1,128
T15	3	1,107	0,350	0,757	1,124	0,017	0,005	1,129
<b>PROMEDIO</b>		1,037	0,340	0,697	1,128	0,091	0,009	1,136

**Tabla 16. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco encalado (T16)**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T16	1	0,138	0,014	0,124	0,172	0,034	0,480	0,652
T16	1	0,140	0,014	0,126	0,176	0,036	0,478	0,654
T16	1	0,135	0,014	0,120	0,180	0,046	0,484	0,664
T16	2	0,138	0,015	0,123	0,174	0,036	0,567	0,741
T16	2	0,134	0,015	0,119	0,175	0,041	0,568	0,744
T16	2	0,134	0,015	0,119	0,178	0,044	0,567	0,744
T16	3	0,136	0,015	0,121	0,173	0,037	0,399	0,572
T16	3	0,138	0,015	0,123	0,174	0,036	0,404	0,577
T16	3	0,131	0,015	0,116	0,177	0,046	0,403	0,580
<b>PROMEDIO</b>		0,136	0,015	0,121	0,175	0,040	0,483	0,659

**Tabla 17. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco encalado fortificado con Nivel 1 de Fertilizante (17:6:18:2) (T17)**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T17	1	0,342	0,055	0,287	0,392	0,051	0,390	0,782
T17	1	0,354	0,057	0,297	0,394	0,040	0,400	0,794
T17	1	0,358	0,057	0,301	0,400	0,042	0,398	0,798
T17	2	0,354	0,056	0,298	0,394	0,040	0,434	0,827
T17	2	0,352	0,058	0,294	0,395	0,043	0,435	0,829
T17	2	0,358	0,058	0,300	0,397	0,040	0,432	0,830
T17	3	0,330	0,058	0,273	0,392	0,062	0,358	0,750
T17	3	0,343	0,058	0,285	0,395	0,052	0,356	0,751
T17	3	0,349	0,059	0,290	0,398	0,049	0,362	0,760
<b>PROMEDIO</b>		0,349	0,057	0,292	0,395	0,046	0,396	0,791

**Tabla 18. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco encalado fortificado con Nivel 1 de Sal Analítica (KCl) (T18)**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T18	1	0,344	0,058	0,287	0,390	0,046	0,385	0,775
T18	1	0,356	0,060	0,296	0,394	0,038	0,392	0,786
T18	1	0,374	0,060	0,314	0,396	0,022	0,393	0,789
T18	2	0,355	0,057	0,298	0,380	0,025	0,376	0,756
T18	2	0,363	0,057	0,305	0,381	0,018	0,383	0,763
T18	2	0,373	0,060	0,313	0,382	0,009	0,387	0,769
T18	3	0,371	0,058	0,313	0,383	0,012	0,401	0,785
T18	3	0,375	0,060	0,315	0,387	0,012	0,400	0,787
T18	3	0,388	0,061	0,328	0,392	0,004	0,399	0,791
<b>PROMEDIO</b>		0,367	0,059	0,308	0,387	0,021	0,391	0,778

**Tabla 19. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco encalado fortificado con Nivel 2 de Fertilizante (17:6:18:2) (T19)**

Tratamiento	Réplica	K INTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	K FIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T19	1	0,469	0,081	0,388	0,502	0,033	0,337	0,839
T19	1	0,470	0,081	0,389	0,504	0,034	0,340	0,844
T19	1	0,477	0,084	0,393	0,508	0,031	0,336	0,844
T19	2	0,461	0,080	0,381	0,501	0,040	0,355	0,856
T19	2	0,468	0,081	0,387	0,503	0,035	0,359	0,862
T19	2	0,479	0,080	0,399	0,511	0,032	0,364	0,874
T19	3	0,460	0,081	0,380	0,502	0,042	0,361	0,863
T19	3	0,466	0,082	0,384	0,505	0,039	0,358	0,863
T19	3	0,471	0,082	0,389	0,510	0,039	0,369	0,879
<b>PROMEDIO</b>		0,469	0,081	0,388	0,505	0,036	0,353	0,858

**Tabla 20. Resultados obtenidos de las diferentes formas de K en el suelo seco encalado fortificado con Nivel 2 de Sal Analítica (KCl) (T20)**

Tratamiento	Réplica	KINTERC+SOL	K SOLUBLE	K INTERC	KFIJ+INT+SOL	K FIJADO	K EN.CRIST	K TOTAL
T20	1	1,008	0,313	0,696	1,135	0,127	0,001	1,136
T20	1	1,015	0,313	0,701	1,141	0,126	0,008	1,149
T20	1	1,106	0,315	0,792	1,146	0,039	0,002	1,148
T20	2	1,040	0,319	0,721	1,138	0,098	0,013	1,151
T20	2	1,116	0,320	0,797	1,148	0,031	0,009	1,157
T20	2	1,131	0,327	0,805	1,149	0,018	0,010	1,159
T20	3	1,045	0,312	0,733	1,139	0,094	0,015	1,154
T20	3	1,099	0,314	0,785	1,146	0,047	0,010	1,156
T20	3	1,135	0,321	0,813	1,149	0,014	0,008	1,157
<b>PROMEDIO</b>		1,077	0,317	0,760	1,143	0,066	0,008	1,152