

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA



**ESTUDIO DE LA COMPETENCIA IÓNICA EN LA FIJACIÓN DE POTASIO
(K⁺) Y AMONIO (NH₄⁺) EN ARCILLAS TIPO 2:1 PRESENTES EN UN
SUELO DE OCUMARE DEL TUY, ESTADO MIRANDA**

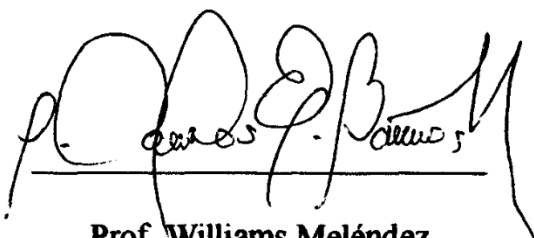
Trabajo Especial de Grado presentado
ante la ilustre Universidad Central de
Venezuela por el **Br. Miguelangel
Mahia Masip** para optar al título de
Licenciado en Geoquímica.

Caracas, Octubre 2018

ACTA

Los abajo firmantes, asignados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado **“ESTUDIO DE LA COMPETENCIA IÓNICA EN LA FIJACIÓN DE POTASIO (K^+) Y AMONIO (NH_4^+) EN ARCILLAS TIPO 2:1 PRESENTES EN UN SUELO DE OCUMARE DEL TUY, ESTADO MIRANDA”**.

Presentado por el Br. Miguelangel Mahia Masip, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna casa de estudios para optar por el título de Licenciado en Geoquímica.



Prof. Williams Meléndez

(Tutor)



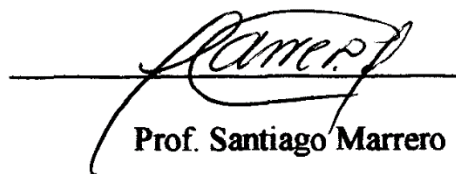
Prof. Danilo López

(Tutor)



Prof. Chaveli Fernandes

(Jurado)



Prof. Santiago Marrero

(Jurado)

Resumen

En el presente trabajo de investigación se estudió la competencia iónica entre el potasio (K^+) y el amonio (NH_4^+) en ocupar los sitios fijos en las arcillas tipo 2:1 en un suelo de Ocumare del Tuy, perteneciente al estado Miranda. Para ello se tomó una muestra de dos perfiles de un mismo suelo clasificado como Inceptisol, a diferentes profundidades espesor I (1-1,5m) y espesor II (1,5-2m). Ambos fueron clasificados como arcillosos por medio del método de Bouyoucos, mientras que el estudio por Difracción de rayos X evidenció la presencia de arcillas tipo 2:1 (Grupo de la Esmeclita). La semi-cuantificación de los minerales permitió la elección del espesor II (25 %) para realizar el posterior estudio de competencia iónica. El ensayo de la competencia fue realizado mediante cuatro experimentos de incubación los cuales consistieron en la adición de potasio en forma de una solución de KCl y amonio en forma de NH_4Cl , variando el tiempo de adición y concentración de ambas. De esta manera se pudo determinar que el suelo estudiado fue capaz de fijar tanto potasio como amonio, pudiendo relacionar esto a la presencia de montmorillonita determinada previamente. Al estudiar la fijación de ambos iones se encontró con que la presencia de uno generó una disminución de la fijación del otro proporcionalmente a la concentración del mismo, esta disminución para todos los casos fue evidenciada con una pendiente negativa hasta que esta alcanzó el equilibrio manteniéndose constante. Por otra parte, se demostró que el tiempo de adición resulta ser otra variable determinante en la fijación de estos iones. Para ambos casos la fijación se vio ligeramente favorecida cuando las sales fueron añadidas simultáneamente por sobre cuando fueron añadidas dos días después de la sal contraria. De igual forma se determinó que existe una mejor fijación de amonio sobre la de potasio, pudiendo relacionar esto a la montmorillonita presente en el suelo. Sin embargo, a pesar de esta preferencia, la capacidad de fijación de potasio y amonio recientemente añadidos resultó ser muy similar ($1,13 \pm 0,06$ y $1,04 \pm 0,06$ respectivamente), indicando que de no existir ambos iones, no existe competencia alguna y los mismos sitios fijos en las arcillas 2:1 del suelo fueron ocupados en ambos casos. En cuanto a las formas intercambiables de amonio y potasio, resultaron bajos ($0,075 \pm 0,008$ y $0,53 \pm 0,1$ respectivamente) pudiendo deberse a la gran profundidad del espesor del suelo estudiado y la poca evolución del mismo, evitando la disponibilidad de potasio por la baja meteorización sufrida por los minerales del suelo y la de amonio por la baja actividad microbiana a esas profundidades estudiadas. La alta fijación de ambos iones sobre sus formas intercambiables, demostraron la importancia y utilidad de estudios de este tipo para implementar planes de fertilización con el fin de optimizar la producción agrícola.

Palabras claves: Suelo, potasio, amonio, fijación, arcillas 2:1, montmorillonita, nutrientes, agricultura, fertilidad.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a mis padres, Eduardo Mahia y Mercedes Masip, por ser mis eternos guías y servirme de apoyo en los momentos que más lo necesité, no solo en la realización de este trabajo sino a lo largo de toda la carrera y vida, por los valores inculcados y por enseñarme que todos los obstáculos pueden ser superados si uno se lo propone; este logro es de ustedes.

A mi hermano, por apoyarme constantemente, servirme como modelo, motivarme, animarme a no desfallecer y enseñarme que los problemas nunca son tan grandes si se afrontan de la manera correcta, tus palabras me sirvieron de gran ayuda para motivarme a continuar hasta finalmente lograr alcanzar esta meta superada.

A la Universidad Central de Venezuela y todos los profesores que hacen vida en el Instituto de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ciencias, por inculcarme los conocimientos necesarios que me permitieron crecer hasta profesionalizarme y por abrirme la mente siempre haciéndome pensar como científico. Un agradecimiento especial a mis tutores, Profesores Williams Meléndez y Danilo López, por ayudarme, por sus consejos y buena disposición mostrada durante estos meses de investigación.

Un agradecimiento a el laboratorio de Suelos del Instituto de Zoología Tropical y en especial a la profesora Ana López, por su importante y gran ayuda así como por prestarme y confiarme el laboratorio, instrumentos, materiales y ayudarme a la familiarización de técnicas que fueron esenciales para la realización de este trabajo. Al profesor Marcial y en general a la escuela de Metalurgia por permitirme el uso del espectrómetro de absorción atómica.

Por ultimo a todos aquellos compañeros que me han acompañado a lo largo de este viaje, por su compañía, amistad y apoyo incondicional, muchas gracias por siempre estar ahí.

Estaré eternamente agradecido con todos ustedes ya que indudablemente sin el apoyo y ayuda de cada uno de ustedes este logro no hubiese podido ser alcanzado. ¡Gracias totales!

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo General	3
2.2 Objetivos específicos	4
3. MARCO TEÓRICO	4
3.1 Suelo	4
3.2 El Suelo como recurso Agrícola.	5
3.3 Nutrientes del Suelo.	5
3.3.1 Nitrógeno en el Suelo.....	6
3.3.2 Ciclo del Nitrógeno.	6
3.3.3 Principales procesos en el ciclo del nitrógeno.	7
3.3.4 Potasio en el suelo	8
3.4 Formación de Suelo	9
3.5 Meteorización	9
3.5.1 Hidrolisis	10
3.5.2 Etapas de la meteorización Química	10
3.5.3 Productos de la meteorización	11
3.6 Minerales de Arcilla	12
3.6.1 Estructura de los minerales de arcilla	12
3.7 Arcillas 2:1	14
3.7.1 Sustitución Isomórfica	15

3.7.2 Grupo de la Illita	16
3.7.3 Grupo de la Esmectita	17
3.7.4 Vermiculita.....	17
3.8 Capacidad de intercambio Catiónico de un suelo	17
3.8.1 Propiedades de los iones	18
3.8.2 Propiedades de las superficies de las arcillas.....	19
3.9 Fijación de Amonio	20
3.10 Fijación de Potasio	21
3.11 Relación y equilibrio de los iones potasio y amonio.	23
4. ANTECEDENTES.....	24
4.1 Nacionales	24
4.2 Internacionales.....	25
5. ZONA DE ESTUDIO	27
5.1 Ubicación.....	27
5.2 Geología Regional.....	27
5.2.1 Formación Tuy.....	27
5.2.1 Formación Tucutunemo	28
5.3 Clima	28
5.4 Vegetación.....	29
6. MARCO METODOLÓGICO	29
6.1 Etapa de Campo.....	29
6.2 Etapa de Laboratorio	31
6.2.1 Tratamiento físico de las muestras.....	31
6.2.2 Clasificación Textural del suelo.....	33
6.2.3 Caracterización mineralógica del suelo	35
6.2.4 Métodos de extracción	38

6.2.5 Competencia iónica, tiempo de adición y concentración.....	42
6.2.6 Determinación de potasio y amonio intercambiable (original).....	48
6.2.7 Determinación de la capacidad de fijación de potasio y amonio artificial en el suelo.	48
7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
7.1 Caracterización textural del suelo por el Método de Bouyoucos	49
7.2 Clasificación mineralógica del suelo por Difracción de rayos X.....	50
7.3 Competencia iónica, tiempo de adición y concentración.	55
7.4 Capacidad de Fijación de potasio y amonio recientemente añadido del suelo.	63
7.5 Amonio y potasio intercambiable original en el suelo	65
7.6 Implicaciones agronómicas	66
8. CONCLUSIONES	67
9. RECOMENDACIONES	68
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
11. Anexos.....	74
11.1 Fórmulas utilizadas para evaluar la reproducibilidad de los resultados obtenidos	74
11.1.1 Media Aritmética	74
11.1.2 Desviación Estándar.....	74
11.1.3 Coeficiente de Variación.....	74
11.2 Hidrómetro Modelo Bouyoucos H-152 utilizado para la determinación textural.	75
11.3 Condiciones de medición de la DRX.	75
11.4 Propiedades de composición del patrón (Montmorillonita de Wyoming).	76
11.5 Autoclave Mod 415. FANEM. Utilizado para las esterilizaciones	77
11.6 Muestras (Espesor I y II). Muestras en bolsas plásticas tomadas en campo	78
11.7 Espectrómetro de Absorción atómica a la llama Mod PekinElmer AAnalyst300.	78
11.8 Condiciones del Espectrómetro de absorción atómica para la medición de potasio.	78
11.9 Fijación de Potasio adiciones previas de amonio. Hoja de Cálculo	79

11.9 Fijación de Amonio con adiciones previas de potasio. Hoja de Cálculo	79
11.10 Fijación de potasio con adiciones simultaneas de amonio	80
11.11 Fijación de amonio con adiciones de potasio simultaneas	80

Tablas

Tabla 1. Composición promedio de las plantas.....	11
Tabla 2. Capacidad de intercambio catiónico de los principales minerales de arcilla.....	18
Tabla 3. Radios iónicos e hidratados de algunos cationes monovalentes, divalentes y amonio.....	19
Tabla 4. Distribución de las fracciones de los espesores del suelo expresados en porcentaje para la clasificación textural.....	50
Tabla 5. Lista de minerales y características encontrados a partir de la DRX para el espesor I.....	50
Tabla 6. Lista de minerales y características encontrados a partir de la DRX para el espesor II.....	52
Tabla 7. Semi-cuantificación de la distribución de los minerales presentes en ambos espesores del suelo estudiados.	54
Tabla 8. Fijación de K^+ , cuando el NH_4^+ fue añadido 2 días previo a la de K^+	56
Tabla 9. Fijación de K^+ , cuando el K^+ y NH_4^+ fueron añadidos simultáneamente.....	57
Tabla 10. Fijación de NH_4^+ , cuando el K^+ fue añadido 2 días previo a la adición de NH_4^+	59
Tabla 11. Fijación de NH_4^+ , cuando el NH_4^+ y K^+ fueron añadidos simultáneamente.	61
Tabla 12. Capacidad de Fijación de potasio y amonio recientemente añadido en el espesor II.....	63
Tabla 13. Cantidad de amonio y potasio intercambiable en el espesor II del suelo estudiado.....	64
Tabla 14. Comparación de potenciales fuentes de nutrientes.....	65

Figuras

Figura 1. Composición promedio de las plantas.....	5
Figura 2. Estructura de capa tetraédrica con cavidad hexagonal.....	12

Figura 3. Estructura de una capa octaédrica de un mineral de arcilla.....	13
Figura 4. Estructura de arcilla tipo 2:1 Illita (TOT).....	14
Figura 5. Sustitución catiónica en Pirofilita para formar moscovita y montmorillonita.	15
Figura 6. Estructura TOT de los minerales de arcilla illita, esmectita y vermiculita con sus distintos cationes entre capas.....	16
Figura 7. Estructura de la Vermiculita.....	21
Figura 8. Fijación de potasio en minerales illíticos.....	22
Figura 9. Dependencia del tiempo en la competencia iónica en la fijación de los iones amonio y potasio.....	26
Figura 10. Zona de estudio, adyacencias de la Carretera Charallave-Ocumare del Tuy, Edo Miranda.....	27
Figura 11. Muestreo simple.....	30
Figura 12. Toma de muestra. Etapa de campo.....	30
Figura 13. Tamizado de muestra de suelo.....	31
Figura 14. Separación de muestra homogenizada en cuatro partes iguales para el cuarteo.....	32
Figura 15. Desarrollo del método de Bouyoucos.....	34
Figura 16. Clases texturales del suelo de acuerdo a sus porcentajes de arena, limo y arcilla.....	35
Figura 17. Reflexión de rayos X entre dos planos de átomos en un sólido. Ley de Bragg.....	36
Figura 18. Método de preparación de montura del polvo desorientado.....	37
Figura 19. Filtrado de incubaciones de experimento de adiciones simultaneas para la extracción de potasio por el método de Acetato de amonio 1M pH=7.....	39
Figura 20. Agitación de muestras con Shaker para la determinación de la fijación de amonio mediante la extracción del amonio intercambiable.....	40
Figura 21. Desarrollo de color para la determinación de amonio mediante a método colorimétrico de azul de indofenol.....	41

Figura 22. Curva de calibración para determinación de amonio por método colorimétrico.....	41
Figura 23. Técnica colorimétrica. Determinación de amonio mediante espectrofotometría de absorción UV-visible.....	42
Figura 24. Muestras en el autoclave selladas y rotuladas.....	43
Figura 25. Diseño experimental planteado para el estudio del efecto de adiciones de amonio 2 días previas a las de potasio en la fijación de este último.....	44
Figura 26. Diseño experimental planteado para el estudio del efecto de adiciones de amonio y potasio simultaneas en la fijación de este último.....	45
Figura 27. Diseño experimental planteado para el estudio del efecto de adiciones de potasio 2 días previas a las de amonio en la fijación de este último.....	46
Figura 28. Diseño experimental planteado para el estudio del efecto de adiciones simultaneas de potasio y amonio en la fijación de este último.....	47
Figura 29. Triangulo de textura, clasificación textural de los espesores I y II.....	49
Figura 30. Gráfico generado por la difracción de rayos X al espesor I del suelo.....	51
Figura 31. Gráfico generado por la difracción de rayos X al espesor II del suelo.....	53
Figura 32. Gráfico generado por la difracción de rayos X a muestra patrón	54
Figura 33. Efecto de la adición previa de NH_4^+ en la fijación de K^+	56
Figura 34. Efecto del NH_4^+ en la fijación de K^+ en adiciones simultaneas.....	57
Figura 35. Comparación del tiempo de adición de NH_4^+ en la fijación de K^+	58
Figura 36. Efecto de la adición previa de K^+ en la fijación de NH_4^+	60
Figura 37. Efecto del K^+ en la fijación de NH_4^+ en adiciones simultaneas.....	61
Figura 38. Comparación del tiempo de adición de K^+ en la fijación de NH_4^+	62
Figura 39. Comparación de los 4 experimentos de competencia de fijación entre el K^+ y NH_4^+	63

1. INTRODUCCIÓN

El suelo ha sido definido de diferentes maneras de acuerdo a la disciplina que le corresponda y el uso que se le dé. Desde el punto de vista agronómico, corresponde a una parte fundamental de los ecosistemas terrestres debido a que en él están contenidos agua y elementos químicos, los cuales son de suma importancia para todos los procesos químicos y bioquímicos que ocurren dentro del sistema suelo, brindando además apoyo y nutrición a plantas y otros organismos (Echarri 1998). Entre todos los elementos presentes, el potasio, fósforo y nitrógeno resultan ser los nutrientes principales para la fertilización de cultivos en los suelos, jugando un papel importante en el desarrollo y crecimiento de las plantas. El nitrógeno puede ser absorbido como ion amonio (NH_4^+) o como ion nitrato (NO_3^-), mientras que el potasio se encuentra en el suelo en su única forma iónica (K^+) y por tal razón es de esta forma tomada por las plantas (Marschner, 1995).

Es importante indicar que, las bajas concentraciones de nitrógeno presentes en el suelo pueden deprimir la producción vegetal, sin embargo el exceso de este puede dar como resultado la lixiviación de nitratos en los suelos (Mengel et al., 2006), lo que trae como consecuencia un aumento de la concentración de este elemento en los sistemas hídricos. Por otra parte el amonio en el suelo puede ser transformado en nitrato por los microorganismos mediante un proceso conocido como nitrificación, el ion NO_3^- resultante presenta una mayor movilidad, por lo cual este proceso igualmente aumenta la pérdida del nitrógeno del sistema suelo por lixiviación. Una de las formas de protección de este nutriente de la nitrificación en algunos suelos es por medio de su fijación físico-química en arcillas, especialmente las arcillas del tipo 2:1 (Scherer y Mengel, 1986).

De acuerdo a esto, las arcillas representan uno de los constituyentes más importantes del suelo debido a que resultan ser una fase muy activa en las actividades agrícolas, ya que pueden adsorber electrostáticamente nutrientes en su superficie en posiciones intercambiables. Entre ellas, las arcillas tipo 2:1 son de gran importancia debido a su estructura, la cual básicamente consta de dos capas de tetraedro con una de octaedro en el centro de ellas (TOT), lo que permite que iones como el amonio y el potasio puedan entrar en la cavidad hexagonal entre los tetraedros fijándose así de esta manera y pasando a una posición no intercambiable.

Tanto el ion NH_4^+ como el K^+ tienen la misma carga y presentan similar radio iónico ($0.143(\text{\AA})$, $0.133(\text{\AA})$ respectivamente), lo cual resulta en una competencia de estos iones por los mismos sitios

intercambiables y no intercambiales en las partículas del suelo (adsorbidos y fijos) (Ajazi, 2013). Ambos iones se fijan mediante el mismo mecanismo ya que los dos encajan perfectamente en la cavidad hexagonal entre las capas de tetraedro. La penetración de estos iones entre las capas de las arcillas causa el colapso de su red cristalina a niveles de 1nm quedando así el K^+ y NH_4^+ atrapados entre las láminas del silicato, evitando así su participación en las reacciones de intercambio catiónico (Nommik 1965). Bien es sabido que en suelos con arcillas 2:1 los iones K^+ y NH_4^+ se encuentran de diferentes formas, la disponible que consta de los iones en solución y en posiciones intercambiables, y la no disponible la cual se refiere a los iones fijados dentro de las estructuras de las arcillas.

Nommik (1957) plantea la teoría de que los iones K^+ y NH_4^+ fijos se encuentran en equilibrio con sus formas intercambiables y en solución, esto indicaría que la liberación de estos nutrientes de sus posiciones fijas, ocurrirá cuando el que se encuentra en solución y el intercambiable (disponibles) se agoten por efectos de la nitrificación, desnitrificación o por absorción de las plantas. Lo cual quiere decir que la fijación de los mismos significará una reserva de estos nutrientes en periodos de alta demanda por las plantas debido a la baja disponibilidad (Beauchamp y Drury, 1991).

La principal fuente de nitrógeno al suelo es por medio de microorganismos fijadores que toman este elemento del aire y lo disponen a las plantas, por el contrario la principal fuente del potasio proviene de la meteorización de los minerales presentes en el suelo y es por esto que la roca parental juega un papel importante dentro de la fertilidad del mismo. Esto precisa que existen suelos donde la proporción de dichos nutrientes a la solución no llega a ser suficiente para una agricultura óptima por lo que debe recurrirse al uso de fertilizantes tanto nitrogenados como potásicos. Dentro de los fertilizantes de sales nitrogenadas, las de amonio presentan una mayor fijación que las nítricas en suelos ricos en arcillas tipo 2:1 ya que el ion nitrato no puede ser fijado por estas debido a su tamaño y carga.

La influencia del potasio en la fijación y liberación de amonio ha sido ampliamente estudiada desde hace muchos años y hasta hoy en día este tema es objeto de diversas investigaciones. Osborne (1976) determina que la adición de potasio en el suelo antes que la de amonio bloquea parcialmente la fijación del segundo en cortos periodos de tiempo. Por su parte en trabajos recientes como los de Ajazi (2013) y Scherer (2014) se demuestra que el potasio se fija con mayor rapidez que el amonio en las arcillas, ocupando los sitios y dejando menos posiciones disponibles para el amonio, esto indica que al momento de la utilización de fertilizantes amoniacados y potásicos, el tiempo de

aplicación de los mismos influirá en la fijación del amonio y por consiguiente en la fertilidad del suelo. Por otra parte también es sabido que las adiciones de grandes cantidades de sales de potasio a los suelos posterior a la de sales de amonio puede evitar la liberación de los iones de amonio de posiciones no intercambiables o fijas a disponibles, afectando de esta manera la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Scherer, 2014).

En Venezuela existen suelos de diversos tipos provenientes de diferente material parental y condiciones. Según Rey (2015) en Venezuela se encuentran 11 de los 12 órdenes de suelo de acuerdo a la Taxonomía de Suelos, sin embargo a pesar de esta gran variación de condiciones edáficas, tan solo un 2% (1,8 millones de hectáreas) de tierras no presentan limitaciones severas para la producción agrícola y que dentro de estas limitaciones la fertilidad resulta la más importante abarcando un 32% (29,3 millones de hectáreas) del país que presenta deficiencia de nutrientes y por consiguiente bajos rendimientos en los cultivos (Comerma y Paredes, 1978). Es por esto que el uso de fertilizantes en el país es de gran importancia, y que los iones K^+ y NH_4^+ añadidos por esta vía podrán ser fijados en suelos venezolanos de haber presencia de arcillas tipo 2:1 en estos.

López y Guevara (2012) caracterizan suelos de los estados Anzoátegui, Falcón y Miranda determinado que en este último, específicamente en el tramo de la carretera Charallave-Ocumare del Tuy existen suelos con altos porcentajes de arcillas tipo 2:1. Si bien se han caracterizado los suelos y se han hecho análisis mineralógico determinando el porcentaje y tipo de arcillas de diversos suelos, el estudio de la capacidad de fijación de amonio y potasio y su competitividad no ha sido estudiada anteriormente en las arcillas pertenecientes a suelos venezolanos.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se plantea en la presente investigación los siguientes objetivos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

- ❖ Estudiar la competencia iónica en la fijación de potasio (K^+) y amonio (NH_4^+) por los sitios fijos en las arcillas tipo 2:1 presentes en un suelo de Ocumare del Tuy, Estado Miranda

2.2 Objetivos específicos

- ❖ Caracterizar e identificar los minerales de arcilla presentes en un suelo de Ocumare del Tuy, Estado Miranda.
- ❖ Evaluar la influencia de la concentración y tiempo de adición de fertilizantes amoniacados y potásicos en la fijación de amonio y potasio en las arcillas tipo 2:1.
- ❖ Determinar la capacidad fijadora de potasio y amonio recientemente añadido de las arcillas 2:1 mediante la adición de fertilizantes.
- ❖ Determinar la concentración de potasio y amonio intercambiable original en el suelo de Ocumare del Tuy, Estado Miranda.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Suelo

Los suelos son uno de los recursos más importantes en nuestro planeta, sin ellos no podría haber vida y sin vida no podría haber suelos. La palabra suelo no para todos tiene el mismo significado ni representa lo mismo. Jaffe (1949) define suelo como una entidad natural de constituyentes minerales y orgánicos, diferenciados “in situ” en horizontes de espesor variable, que difieren del material suprayacente en morfología, composición química y mineralógica, así es que si bien esta es solo una de las muchas definiciones existentes de suelos logra abarcar varias áreas en las que esta “entidad natural” juega un papel importante.

Desde el punto de vista geoquímico el suelo tiene una gran importancia debido a que en el ocurren acumulaciones, distribuciones y movimientos de elementos químicos conforme varia la evolución del mismo. Sin embargo, en el área de la ingeniería civil se le ve como un material o sustrato sobre el cual se construyen obras, por lo cual su enfoque es en el estudio de las propiedades físico-químicas y el comportamiento mecánico del mismo. Por su parte los geólogos denominan esta capa como regolito y generalmente es bajo ella donde realizan sus estudios. Los hidrólogos lo consideran como una gran esponja que almacena agua para suministrar a arroyos y ríos. Sin embargo en el área de la biología se le estudia como el soporte para el crecimiento de plantas y microorganismos, el cual dispone de agua y nutrientes a estos, enfocando su trabajo hacia la capa más superficial del mismo u horizonte orgánico (Nortcliff, 1984).

3.2 El Suelo como recurso Agrícola.

El suelo es una parte fundamental de los ecosistemas terrestres debido a que en él están contenidos agua y elementos químicos que brindan apoyo y nutrición a plantas y otros organismos (Echarri 1998), lo cual quiere decir que la agricultura se apoya en este recurso para un sistema alimentario que producirá buenos cultivos para el consumo humano. De allí obtienen principalmente los minerales y materia orgánica, esta última juega un papel muy importante tanto en el suministro de nutrientes a los organismos vivos, como en la agregación de las partículas del suelo lo cual contribuirá a la estructuración y retención de agua en el mismo (Bot y Benites, 2005).

3.3 Nutrientes del Suelo.

Si bien el carbono y oxígeno representan cerca del 85% de la composición promedio de las plantas, existen elementos que son importantes para diferentes procesos bioquímicos de estas conocidos como nutrientes abarcando un 7% (Figura 1). Estos nutrientes en el suelo, se dividen en macro- y micro- nutrientes, en función de las cantidades necesarias para los diferentes procesos bioquímicos de las plantas. Los micronutrientes o microelementos si bien son requeridos en bajas proporciones por las plantas, suelen ser importantes para tanto el metabolismo vegetal como animal y estos son el hierro, zinc, manganeso, boro, cobre, molibdeno y cloro. Por otra parte los macronutrientes son necesarios en mayor proporción y estos se subdividen a su vez en dos grupos, los primarios que constan de nitrógeno, potasio y fósforo y los secundarios magnesio, azufre y calcio (Román et al, 2013).

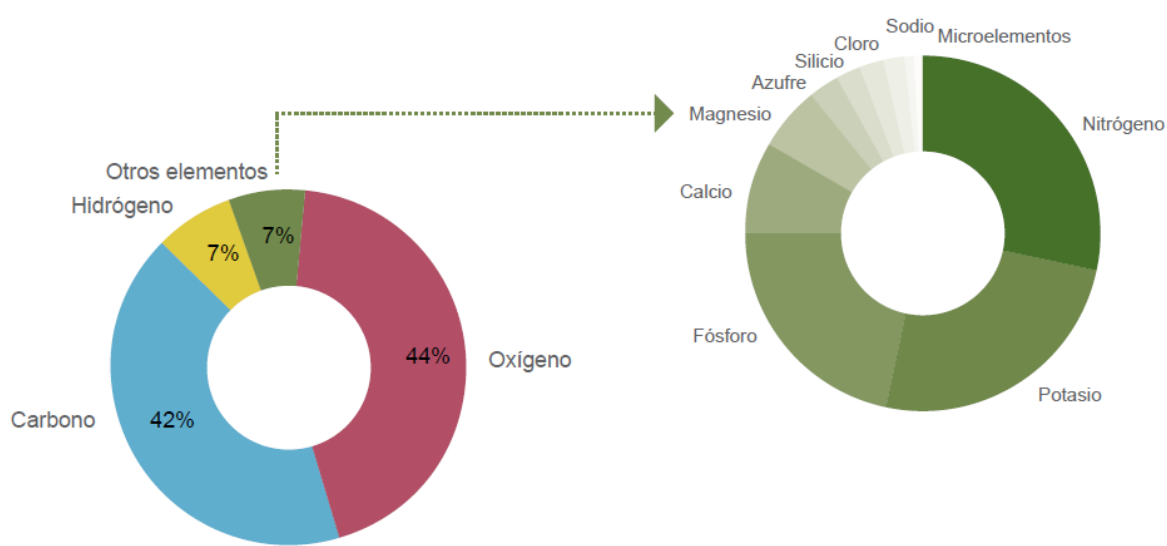


Figura 1. Composición promedio de las plantas. Tomado de Román et al (2013).

3.3.1 Nitrógeno en el Suelo

El nitrógeno es un macronutriente primario, es decir, las plantas lo requieren en concentraciones altas para su crecimiento (1-4%), este elemento forma parte de la moléculas de clorofila, proteínas, ácidos nucleicos y muchas otras biomoléculas esenciales, y es por eso que está directamente relacionado con el crecimiento de la planta ya que se involucra en los principales procesos de desarrollo de las mismas. El nitrógeno es encontrado en el suelo en diferentes formas pero es asimilado por las plantas en mayor proporción como los iones amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) (Chesworth, 2007).

La atmósfera es el mayor reservorio de nitrógeno ya que está compuesta de cerca del 78,3% de este elemento en su forma molecular $\text{N}_{2(g)}$, a pesar de ello en esta forma no está disponible para la mayoría de los organismos (Markov, 2012). Sin embargo, según Zahran, (1999) si bien la atmósfera proporciona la mayor entrada de este nutriente al suelo también puede ingresar producto de desechos orgánicos de origen animal y vegetal y en una menor proporción de los minerales del suelo principalmente como nitrato de potasio (KNO_3) en un mineral denominado Nitro. No obstante el nitrógeno resulta ser el principal elemento limitante de los cultivos por lo cual en los suelos de producción agrícola a menudo es necesario proveer de una fuente no natural de este por medio del uso de fertilizantes nitrogenados, los cuales constan de sales que pueden contener este elemento en su forma iónica de nitrato (nitrogenados) y como amonio (amoniacales).

3.3.2 Ciclo del Nitrógeno.

Es importante saber que el nitrógeno tiene tanto formas orgánicas como inorgánicas y es aquí donde radica su complejidad. Las formas orgánicas representan la mayor parte del nitrógeno del suelo y se encuentran en la biota, materia orgánica del suelo y residuos vegetales y animales. Tan solo entre 1 y 2% del nitrógeno total del suelo se encuentra en su forma inorgánica asimilable, principalmente como los iones amonio, nitrato y en menores proporciones como ion nitrito (NO_2^-) el cual en grandes cantidades llega a ser tóxico para los cultivos, más sin embargo este resulta ser un ión momentáneo ya que rápidamente se oxidará a nitrato (Chesworth, 2007).

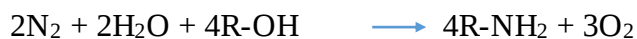
El nitrógeno en la biosfera sufre una serie de reacciones y transformaciones principalmente por microorganismos en el suelo desde que es asimilado en su forma gaseosa de la atmósfera hasta que vuelve a liberarse nuevamente a la atmósfera, este proceso es complejo y es conocido como el ciclo del nitrógeno.

3.3.3 Principales procesos en el ciclo del nitrógeno.

Los procesos que transforman el nitrógeno son principalmente por medio de la actividad biológica realizada por los microorganismos presentes en el suelo y estos serán los definidos a continuación.

Fijación biológica de nitrógeno

Existen organismos como algunas arqueas, bacterias y cianobacterias que tienen la capacidad de fijar el N_2 atmosférico y convertirlo en formas asimilables para las plantas y otros organismos, estos logran la transformación de N_2 (g) en ion amoníaco (NH_3) mediante un complejo enzimático conocido como nitrogenasa (Vitousek et al, 2013).



Mineralización e Inmovilización

Para poder ser tomado por las plantas, el nitrógeno en su forma orgánica el cual significa más del 95 % de este elemento, en el suelo debe ser mineralizado pasando a formar parte del nitrógeno inorgánico, este proceso es realizado por microorganismos con reacciones enzimáticas y químicas. Ahora, dependiendo de las condiciones del suelo, como lo son la humedad, pH y temperatura, algunos microorganismos en un proceso contrario a la mineralización podrán tomar el nitrógeno que se encuentra en forma inorgánica (mineralizado) e inmovilizarlo formando parte de sus proteínas convirtiéndolo en nitrógeno orgánico nuevamente (Glasener et al, 2002).



Amonificación

En los suelos existen organismos heterótrofos como los hongos y bacterias los cuales promoverán la hidrólisis de compuestos con nitrógeno orgánico como las proteínas, lo cual tendrá como resultado final la producción del ion amonio, el cual presenta al nitrógeno en su forma inorgánica y fácilmente asimilable por las plantas (de Melo et al, 2018).



Nitrificación

Existen condiciones en el suelo como la disponibilidad del carbono y energía en donde el ion amonio resultante puede ser rápidamente asimilado por la biomasa microbiana del suelo oxidándose

a ion nitrato (Schmidt, 1982). Este proceso biológico se conoce como nitrificación y fue establecido por Winogradsky (1889), quien identifica que ocurre por dos grupos de bacterias quimioautorofas (que obtienen la energía de minerales) las cuales actúan en los dos pasos de este proceso; la oxidación de NH_4^+ a NO_2^- y su subsecuente oxidación a NO_3^- esta última al presentar una mayor solubilidad que el amonio, puede en parte perderse del sistema suelo por lixiviación y otra en forma gaseosa por un posterior proceso llamado desnitrificación.



Desnitrificación

Proceso en el cual en ausencia de oxígeno las bacterias toman este elemento de la molécula de nitrato liberando así el nitrógeno en forma gaseosa ya sea como óxido de nitrógeno (NO_2) o nitrógeno molecular (N_2). Este proceso de reducción bioquímico es llevado a cabo por una serie de bacterias de los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas* los cuales mayormente en situaciones de anegamiento de suelos toman el oxígeno como aceptor de electrones reduciéndolo generando una pérdida de este nutriente del sistema suelo (de Melo et al, 2018).



3.3.4 Potasio en el suelo

Así como el nitrógeno, el potasio tiene una gran importancia dentro de la agricultura ya que este también es un macronutriente y se encuentra en las plantas en concentraciones entre 1-4%. La importancia de este nutriente radica en que el mismo influencia las relaciones osmóticas entre la planta y el suelo, funciones respiratorias y fotosintéticas además de ser un activador de enzimas (Chesworth, 2007).

El potasio resulta ser el 7mo elemento más abundante de la corteza terrestre, este se encuentra formando parte de las redes cristalinas de minerales como feldespatos y micas principalmente, lo cual sugerirá que la disponibilidad del potasio en los suelos estará condicionada por la mineralogía, la cual a su vez dependerá del material parental. En suelos formados a partir de rocas ígneas ácidas y su equivalente metamórfico la concentración de este nutriente en el suelo será mayor.

Junto a estas formas difícilmente movilizables, el potasio se encuentra presente en la disolución del suelo así como en el complejo de intercambio, siendo estas formas consideradas disponibles para las plantas, sin embargo existe otra forma de este ion en el suelo y es la no intercambiable o fija. Esta

forma fija a pesar de no considerarse como disponible bien es sabido que puede transformarse lentamente en formas asimilables por las plantas, constituyendo reservas a medio o largo plazo en el suelo (Sparks y Huang, 1985).

3.4 Formación de Suelo

Los suelos son formados como respuesta a condiciones ambientales físicas, químicas y biológicas las cuales actúan sobre residuos orgánicos, rocas y productos antropogénicos (Según FAO, (1998) material mineral u orgánico no consolidado producto de la actividad humana) y son propensos a erosión y transporte por viento, agua, hielo y organismos (Chesworth, 2007).

La formación del suelo comienza con la alteración de un material rocoso en donde las condiciones ambientales que imperan sobre este causan que un proceso conocido como meteorización actúe, sin embargo en este momento no se considera suelo sino regolito o saprolito; para que el suelo se genere es necesario que en conjunto con la meteorización ocurra otro proceso conocido como pedogénesis el cual construye la complejidad anisótropa del suelo a partir de un material rocoso (parental) que en un principio era isotrópico, a través de adiciones, pérdidas, translocaciones y transformaciones de sus componentes (Simonson, 1959).

Lelong et al (1976) definen la pedogénesis como el proceso de formación de suelos, el cual genera una diferenciación vertical del mismo en horizontes, derivados de la evolución “in situ” de rocas parentales preexistentes, debido a la acción de agentes meteóricos y biológicos (agua, ácidos húmicos y carbónicos, y organismos vivos, etc...) A grandes rasgos la formación de los suelos dependerá de la suma de los procesos físicos, químicos, y biológicos necesarios para la elaboración de estructuras y nuevos componentes encontrados en el suelo teniendo como proceso principal la meteorización (Chesworth, 2007).

3.5 Meteorización

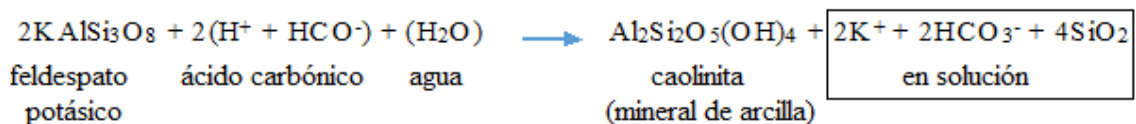
Loughran (1969) la define como un proceso por el cual agentes atmosféricos, hidrosféricos y biológicos actúan y reaccionan con los constituyentes minerales de las rocas dentro de las zonas de influencia de la atmosfera, produciendo nuevas fases minerales que son más estables a estas nuevas condiciones.

Según Fassbender (1980) este proceso puede englobarse en 3 formas de ocurrencia, la química la física y la biología siendo la química la de mayor importancia en lo que a formación de suelo respecta y teniendo como hidrólisis el proceso de mayor ocurrencia dentro de estas.

3.5.1 Hidrolisis

Este proceso resulta ser el principal agente responsable de la descomposición de los mayores minerales formadores de rocas como lo son los silicatos y consiste básicamente en la reacción de estos con el agua. Idóneamente esta reacción con los minerales podría llevarse a cabo con agua pura, la cual al disociarse, los iones H^+ atacan y sustituyen otros iones positivos encontrados en el retículo cristalino causando la destrucción del mismo y descomponiendo el mineral a otro con distinto arreglo, sin embargo en condiciones ambientales el agua proveniente de precipitaciones no es pura, ya que esta reaccionará con el CO_2 atmosférico y en menores cantidades proveniente de la materia orgánica en descomposición del suelo generando ácido carbónico (H_2CO_3), el cual rápidamente se podrá ionizar en el agua formando H^+ y bicarbonato (HCO_3^-) (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Un ejemplo de este proceso podría observarse en una roca de composición granítica la cual está compuesta principalmente por cuarzo y feldespatos, donde la acción de la hidrólisis vendrá dada por la siguiente reacción (Tarbuck y Lutgens, 2005).



3.5.2 Etapas de la meteorización Química

Adams (1995) resume lo que ocurre en la meteorización química dentro del suelo, en las siguientes etapas:

- Desalcalinización: Liberación de cationes alcalinos y alcalino térreos de la estructura de los minerales en una cantidad considerable, durante la transición inicial de roca a suelo. No obstante el suelo no pierde inmediatamente estos cationes, debido a que existe intercambio y retención de los mismos.
- Desilificación: Liberación de sílice de los minerales presentes en el suelo a la solución del mismo, parte de la cual es lixiviada inmediatamente y parte queda reaccionando para formar minerales

secundarios (caolinitas, esmectitas, cloritas, entre otros), comunes en los suelos, pero transitorios a la escala del tiempo geológico.

•Acumulación de aluminio: El aluminio tiende a acumularse en los suelos relativamente debido a la pérdida de los cationes en las dos anteriores etapas.

Las primeras etapas de la meteorización producirán alcalinidad, mientras que las etapas posteriores producen acidez y cuando estas etapas de la meteorización actúan dejarán como resultado diversos productos.

3.5.3 Productos de la meteorización

Para Porta et al. (1994), los productos de la meteorización de las rocas son: resistatos, para referirse a los fragmentos de roca resultante de la meteorización física. Por otra parte dependiendo de las transformaciones que pueda causar la meteorización química, los productos resultantes serán: minerales preexistentes en la roca, considerados resistentes a la meteorización (resistatos); minerales con ciertas modificaciones (transformados) y minerales formados como resultado de la combinación de los productos liberados en la meteorización (neoformados). Porta et al (1994) consideran también como productos de la meteorización, los materiales solubles (iones) que, dependiendo de las condiciones de drenaje, podrían ser expulsados del sistema suelo en las primeras etapas de la meteorización.

Los silicatos como los principales minerales formadores de rocas serán los que en mayor medida sufrirán este proceso dando diversos productos (Tabla 1) dependiendo de la estabilidad mineral de los mismos.

Tabla 1. Productos de la meteorización de los principales silicatos. Tarbuck y Lutgens (2005).

Mineral	Productos residuales	Material en solución
Cuarzo	Granos de Cuarzo	Sílice
Feldespato	Minerales de arcilla	Sílice, K^+ , Na^+ , Ca^{2+}
Anfibol	Minerales de arcilla	Sílice, Ca^{2+} , Mg^{2+}
Olivino	Hematita	Sílice, Mg^{2+}

3.6 Minerales de Arcilla

Dentro de los minerales neoformados, se encuentran los minerales de arcilla siendo estos de gran importancia en la presente investigación. Ellos han sido definidos como, filosilicatos y aluminio silicatos hidratados, con hidrógeno enlazado al grupo OH^- lo cual contribuye a la estabilidad electrónica de su red cristalina confiriéndole la capacidad de contener iones entre sus capas estructurales (Grim, 1953). Es importante indicar que, si bien la palabra arcilla corresponde a un tamaño de grano el cual es menor a $2\mu\text{m}$ de diámetro, también sirve para describir a los aluminosilicatos hidratados obtenidos durante el proceso de meteorización.

3.6.1 Estructura de los minerales de arcilla

La estructura de estos minerales pueden verse como combinaciones de capas de tetraedros en donde el catión central ocupante es el Si^{4+} y en menor proporción Al^{3+} y capas de octaedros en donde el catión puede ser Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} y Fe^{2+} (Raisbeck's, 2006).

Capa tetraédrica

Está compuesta por SiO_4^{4-} o AlO_4^{5-} compartiendo 3 o 4 vértices con oxígenos los cuales se van a enlazar con los pares de cationes Si^{4+} - Si^{4+} o Si^{4+} - Al^{3+} formando una red de dos dimensiones con cavidades hexagonales. Esta capa tetraédrica puede ser representada por la celda unitaria de Bravais (Figura 2) (Velde y Meunier, 2005).

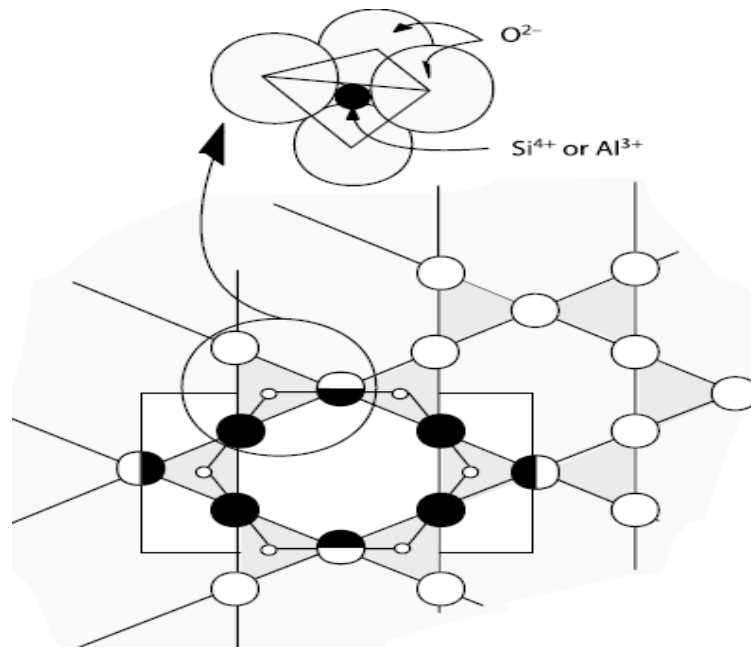


Figura 2. Estructura de capa tetraédrica con cavidad hexagonal. Celda unitaria de Bravais. Tomado de Velde y Meunier (2005).

Capa octaédrica

De acuerdo a los sus radios iónicos, consta de un catión central el cual puede ser Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} o Mg^{2+} los cuales se unen con coordinación 6 a los aniones O^{2-} u OH^- dando como resultado un octaedro (Figura 3) compartiendo en este caso sus 6 vértices (Velde y Meunier, 2005).

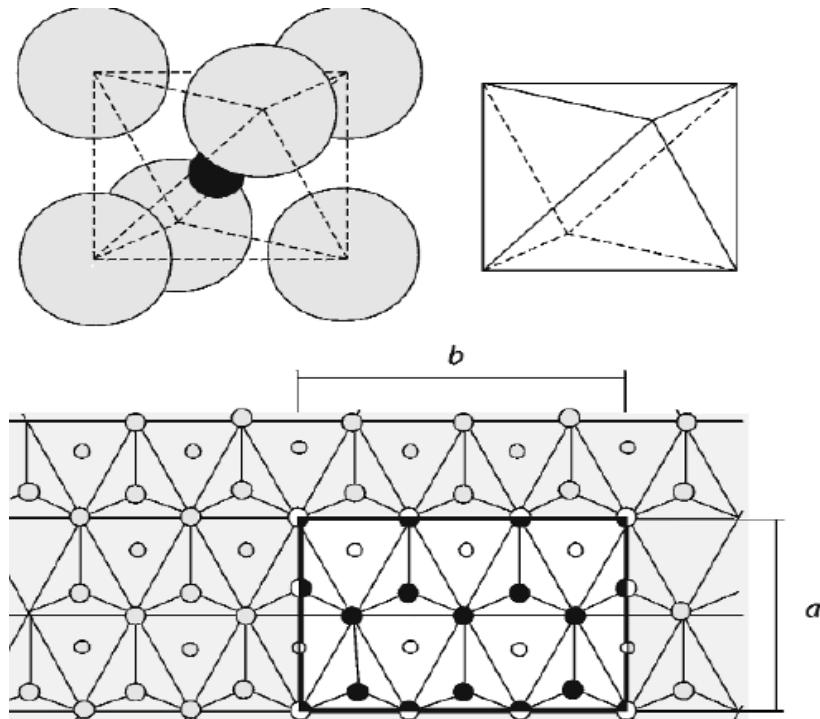


Figura 3. Estructura de una capa octaédrica de un mineral de arcilla. Tomado del Velde y Meunier, (2005).

Filosilicatos Trioctaédricos

Son aquellos minerales en los cuales 3 de las 3 posiciones de los sitios octaédricos se encuentran ocupados por cationes con estado de oxidación $2+$ como el Fe^{2+} y el Mg^{2+} dando una carga neta de $6+$ (Railsback's, 2006).

Filosilicatos Dioctaédricos

En estos minerales 2 de las tres posiciones de los sitios octaédricos están ocupados por cationes con estado de oxidación $3+$ como el Fe^{3+} y el Al^{3+} (caolinita) dando sin embargo de igual manera una carga neta de $6+$ (Railsback's, 2006). Los minerales de arcilla presentes en los suelos se pueden agrupar de acuerdo al ordenamiento de estas láminas tetraédricas y octaédricas en dos grupos

principales: arcillas de orden 1:1 y arcillas de orden 2:1, siendo estas últimas las de especial interés para la presente investigación. (McLaren y Cameron, 1996).

3.7 Arcillas 2:1

Suelen ser los minerales de arcillas dominantes en suelos de regiones templadas, estos minerales presentan una estructura en forma de sándwich, con dos capas de tetraedros y una de octaedro en el centro (TOT) la cual le conferirá unas características especiales y de gran importancia en los que a suelos se refiere. Dentro de estas arcillas encontramos las denominadas expansivas en las cuales pueden entrar cationes hidratados entre las capas generando una baja carga (esmectita) y alta carga (vermiculita). Por otro lado también se encuentran los no expansibles como la illita la cual posee potasio anhídrido (no hidratado) entre sus capas generando una estructura rígida (Figura 4).— (Velde y Meunier, 2005).

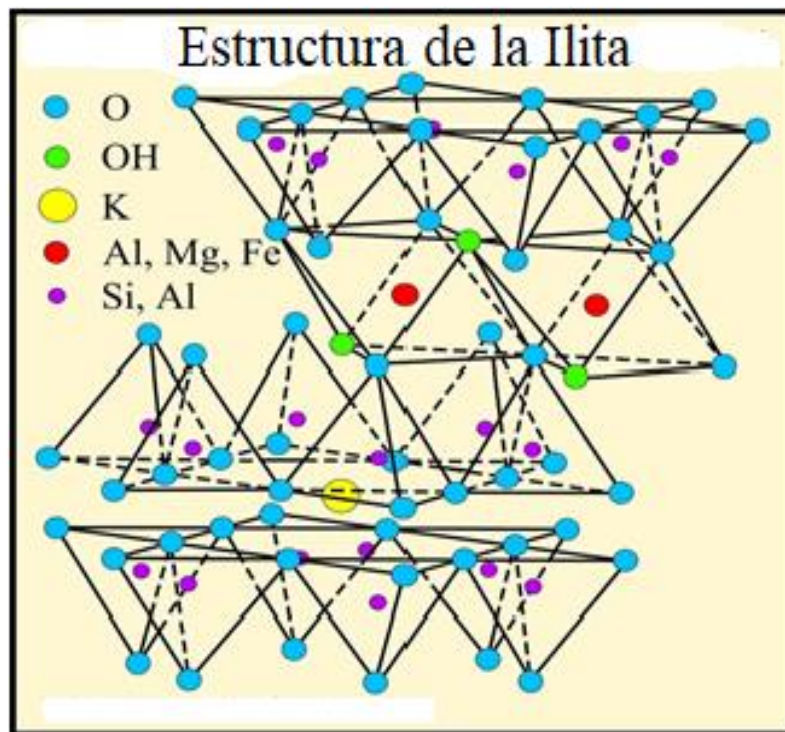


Figura 4. Estructura de arcilla tipo 2:1 Illita (TOT). Modificado de Grim 1962.

3.7.1 Sustitución Isomórfica

En estas arcillas de estructura TOT pueden ocurrir sustituciones de iones de mayor estado de oxidación por otros de menor estado, tanto en las capas tetraédricas (Al o Fe por Si) como en las octaédricas (Mg por Al), lo cual dejará una deficiencia de carga llamada permanente en la superficie de la arcilla la cual no depende del pH del medio (Figura 5). Las arcillas con dependencia de este último factor, se dicen que tienen una carga inducida. (Railsback's, 2006)

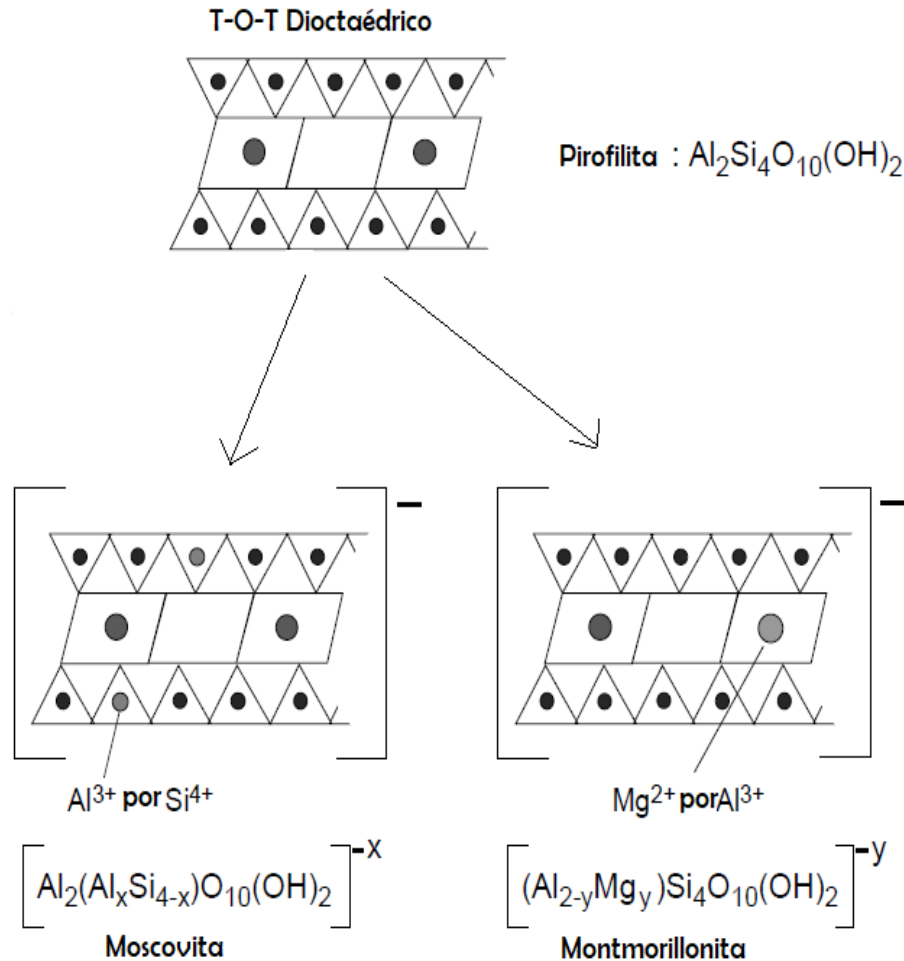


Figura 5. Sustitución catiónica en Pirofilita para formar moscovita y montmorillonita. Tomado de Railsback's (2006).

La sustitución en una capa o la otra dependerá del mineral de arcilla. Esta carga neta negativa o permanente en las arcillas de estructura TOT (2:1) podrá ser neutralizada por medio de la incorporación de uno o más cationes entre sus capas (Figura 6) dando así una variedad de minerales de arcilla con propiedades diferentes.

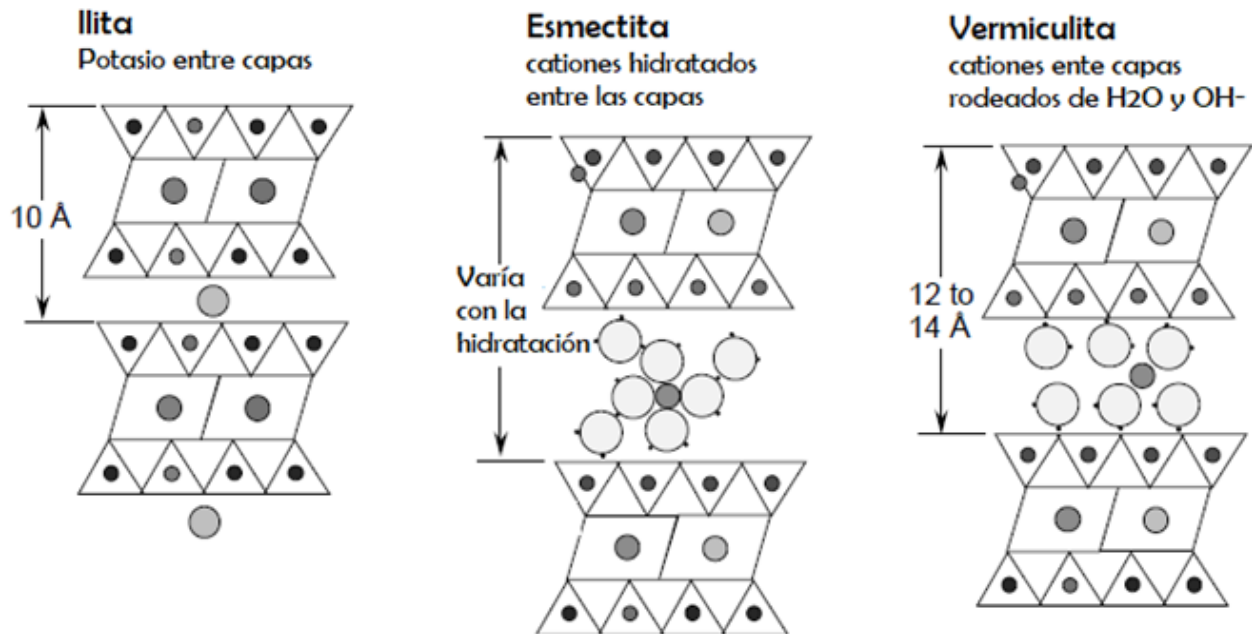


Figura 6. Estructura TOT de los minerales de arcilla illita, esmectita y vermiculita con sus distintos cationes entre capas. Tomado de Railsback's (2006).

3.7.2 Grupo de la Illita

Es un mineral de arcilla con potasio y en ocasiones amonio neutralizando la carga permanente, generando que el grosor de la celda unitaria perpendicular a la capa sea muy cercano a 10.0 Å para iones de potasio y 10.2 Å para iones de amonio. La illita es formada como producto de la meteorización principalmente de moscovita, la presencia de esta arcilla en el suelo indica la ocurrencia de una roca de origen detrítico, sin embargo una buena proporción de este mineral puede ser fácilmente transformado en el suelo a esmectita y viceversa bajo la acción de las plantas (Velde y Meunier, 2005). La illita se encuentra en casi todos los suelos excepto en los que provengan de rocas básicas debido a que en este caso la ausencia de potasio en el sistema impediría su formación. Este mineral es formado principalmente en climas templados y en condiciones que contengan abundante potasio y aluminio por lo cual las rocas graníticas serán un buen material parental para la formación de las mismas. Debido a la presencia de potasio tienen una gran importancia desde el punto de vista agrícola y en cierta medida la presencia de estas indicará fertilidad del suelo. (Velde y Meunier, 2005).

3.7.3 Grupo de la Esmectita

Poseen un espaciamento basal típico de $14\text{\AA}$, pero debido a que este grupo mineralógico tiene la capacidad de absorber moléculas de agua de manera de neutralizar la carga permanente, puede variar de $9,6\text{\AA}$ (sin agua) hasta los $21,4\text{\AA}$, siendo la montmorillonita la más común de este grupo de arcillas. Este grupo de minerales a diferencia de la illita se forman en ausencia o baja disponibilidad de potasio y aluminio. La esmectita con alta densidad de carga se llama Vermiculita y esta puede pasar a illita si por alguna razón existe una gran disponibilidad de potasio y aluminio en la solución del suelo. Este grupo de arcillas son abundantes en condiciones templadas y pueden ser dioctaédricas o trioctaédricas conteniendo tanto Al como Fe (Velde y Meunier, 2005). Son los principales minerales de los Vertisoles y son formados en condiciones de pradera seca, pueden encontrarse tanto en suelos ácidos como en básicos. Existen diferentes regímenes vegetales que pueden cambiar el tipo de mineral de arcilla manteniendo su estructura 2:1 intacta (Velde y Meunier, 2005).

3.7.4 Vermiculita

La vermiculita es un mineral hidratado de tres capas, en la cual su estructura representa una interstratificación regular de unidades de talco y una doble capa de moléculas de agua, o dicho de otra manera, iones de magnesio hidratados. Este mineral sin someterse a ningún tratamiento previo exhibe un espaciado basal (002) de entre $14\text{-}15\text{\AA}$ pudiendo contraerse o por deshidratación producto de calentamiento a $9\text{-}10\text{\AA}$. El mismo se diferencia de la montmorillonita en que al ser tratado con moléculas orgánicas como el etilenglicol no se expande a más de $15\text{\AA}$, la cual en cambio puede expandirse hasta $17,6\text{-}17,1\text{\AA}$ (Besoain, 1985).

Resultan ser componentes muy comunes de los suelos, excepto, tal vez, en suelos tropicales húmedos con un ambiente de meteorización intenso. Este mineral se presenta en formas tanto dioctaédricas como trioctaédricas y puede derivarse de una gran variedad de materiales parentales, pero en general, al igual que el caso de la montmorillonita se forma preferentemente en suelos derivados de rocas básicas (Besoain, 1985).

3.8 Capacidad de intercambio Catiónico de un suelo

Se refiere a la capacidad que tiene un suelo para retener cationes en formas intercambiables, principalmente entre las capas de los minerales de arcilla así como también en la materia orgánica, esta capacidad corresponde a la carga negativa del suelo conferida principalmente por la sustitución

isomórfica de las arcillas 2:1 y es expresada en miliequivalentes por unidad de masa (mEq kg^{-1}) o más recientemente en centimoles por kilogramo (cmol kg^{-1}) (Chesworth, 2007).

Al estudiar las reacciones de intercambio en un suelo se busca entender y predecir cómo se encuentran distribuidos los iones cargados positivamente entre las fases líquidas y sólidas del mismo. Esta distribución es de gran importancia debido a que juega un papel importante en los procesos de floculación y dispersión de los sedimentos del suelo así como la disponibilidad y transporte de los nutrientes como el K^+ y el NH_4^+ además de la regulación de la acidez del mismo (McDonald et al, 2005).

La manera de que estos cationes se puedan intercambiar depende de si se encuentran débilmente unidos a las superficies externas o internas (intercapas) de los minerales de arcilla, en el caso de las arcillas tipo 2:1 como la vermiculita y esmectita la capacidad de intercambio catiónico (CIC) refleja la alta deficiencia de carga de estas por sustituciones isomórfica en comparación que las tipo 1:1 y las 2:1:1 (Tabla 2), ya que esta capacidad dependerá en gran parte de la carga permanente de las arcillas (Velde and Meunier, 2005)

Tabla 2 Capacidad de intercambio catiónico de los principales minerales de arcilla a pH 7 y 25°C. Datos tomados de (Velde and Meunier, 2005).

Mineral de arcilla	Capacidad de intercambio catiónico (cmol Kg^{-1})
Caolinita (1:1)	5-15
Ilita (2:1)	25-40
Vermiculita (2:1)	100-150
Esmectita (2:1)	80-120
Clorita (2:1:1)	5-15

3.8.1 Propiedades de los iones

Según la ley de Coulomb la energía de interacción entre una superficie cargada y un soluto con carga opuesta es proporcional a la carga del soluto e inversamente proporcional al radio solvatado. Debido a las tendencias periódicas, los radios iónicos e hidratados, las superficies cargadas negativamente preferirán cationes divalentes sobre cationes monovalentes y dentro de un mismo grupo periódico el más débilmente hidratado. En la Tabla 3 se puede observar que tanto el ion

amonio como el potasio además de tener la misma carga poseen un radio iónico muy similar generando por consiguiente un potencial iónico parecido, lo cual se traduce en una competencia entre estos para neutralizar la carga permanente de las arcillas tanto en posiciones intercambiables como fijas. (McDonald, 2005).

En síntesis, la energía de ligadura de los cationes dependerá de: la valencia, radio iónico, radio hidratado y las características del adsorbente (los minerales de arcilla).

Tabla 3 Radios iónicos e hidratados de algunos cationes monovalentes, divalentes y amonio. Datos tomados de McDonald (2005).

Catión	Radio Iónico (nm)	Radio Hidratado (nm)
Li ⁺	0.068	1.003
Na ⁺	0.098	0.790
K ⁺	0.133	0.532
NH ₄ ⁺	0.143	0.537
Rb ⁺	0.149	0.509
Cs ⁺	0.165	0.505
Mg ²⁺	0.089	1.080
Ca ²⁺	0.117	0.96
Sr ²⁺	0.134	0.96
Ba ²⁺	0.149	0.88

3.8.2 Propiedades de las superficies de las arcillas

Los efectos de la superficie específica están siempre presentes en el suelo, aquellas que actúan como bases fuertes preferirán el ácido de Lewis más fuerte para cationes de la misma valencia. Por otro lado las superficies que presenten un comportamiento ácido débil (alto pKa) mostrarán una mayor preferencia por metales pesados, en comparación con superficies con un comportamiento ácido alto (bajo pKa). Por ejemplo, la Illita o Caolinita muestran una fuerte preferencia por Cu²⁺ o Cd²⁺ respecto a la Montmorillonita. El anión con el mayor potencial para formar complejos superficiales controlará el potencial de sorción de los metales pesados, ya que una superficie que tenga la capacidad de formar complejos de esfera interna con ciertos cationes monovalentes mostrará

preferencia por estos que por cualquier otro catión, y es por esto que en la Vermiculita los iones K^+ y NH_4^+ tendrán preferencia que el Na^+ y Ca^{2+} (McDonald, 2005).

Así mismo existen superficies que no tienen el potencial o la capacidad de formar complejos de esferas internas, y en este caso la preferencia dependerá de la magnitud del potencial eléctrico de estas. Por ejemplo, una superficie con alto potencial eléctrico tendrá una mayor preferencia por cationes divalentes en presencia de monovalentes que superficies con bajo potencial eléctrico (McDonald, 2005).

3.9 Fijación de Amonio

El nitrógeno inorgánico se encuentra presente en el suelo en formas de NO_3^- , NO_2^- y NH_4^+ , sin embargo este último se puede encontrar tanto disuelto en la solución de suelo, adsorbido en la superficie de los minerales de arcilla (NH_4^+ intercambiable) como NH_4^+ fijado entre las capas de estos. El NH_4^+ fijado se define como el NH_4^+ que está retenido por el suelo en una forma que no es libre ni fácilmente intercambiable, o que no puede ser removido por una prolongada extracción con una solución salina de potasio (Feigenbaum et al., 1994).

El mecanismo de fijación resulta principalmente del reemplazo de los cationes interlaminares (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e H^+) por el NH_4^+ en la red expandida de los minerales arcillosos y se debe a que la baja energía de hidratación (85 kcal mol^{-1}) determina deshidratación y colapso de entre-capas y la fijación consecuente de este ión, además, el tamaño del ión NH_4^+ permite un calce exacto en la cavidad hexagonal del oxígeno estructural de las hojas tetraédricas facilitando el colapso de las capas. Así mismo, la posición de la carga isomórfica negativa en hojas tetraédricas u octaédricas es muy importante ya que estará más cerca o más lejos del catión adsorbido reteniéndolo más o menos firmemente (Williamd y Ferrel, 1991).

Como ejemplo, en las vermiculitas los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ en posiciones interlaminares no están fijos, es decir ocupan posiciones intercambiables mientras que los iones K^+ y NH_4^+ no pueden ser intercambiados por procesos ordinarios ya que estos serán fijados (Figura 7) (Ajazi, 2013).

La fijación de NH_4^+ ocurre principalmente en los suelos en los que predominan filosilicatos secundarios del tipo 2:1, tales como vermiculita, ilita y montmorillonita. Tanto la ilita como la vermiculita fijan NH_4^+ bajo condiciones de hidratación, mientras la montmorillonita sólo fija después de secada (Chen et al., 1989). Stevenson, (1994) explica la tendencia relativa de los

minerales 2:1 en fijar amonio la cual se encuentra en el siguiente orden decreciente: vermiculita>ilita>montmorillonita y de ultima la caolinita (arcilla tipo 1:1).

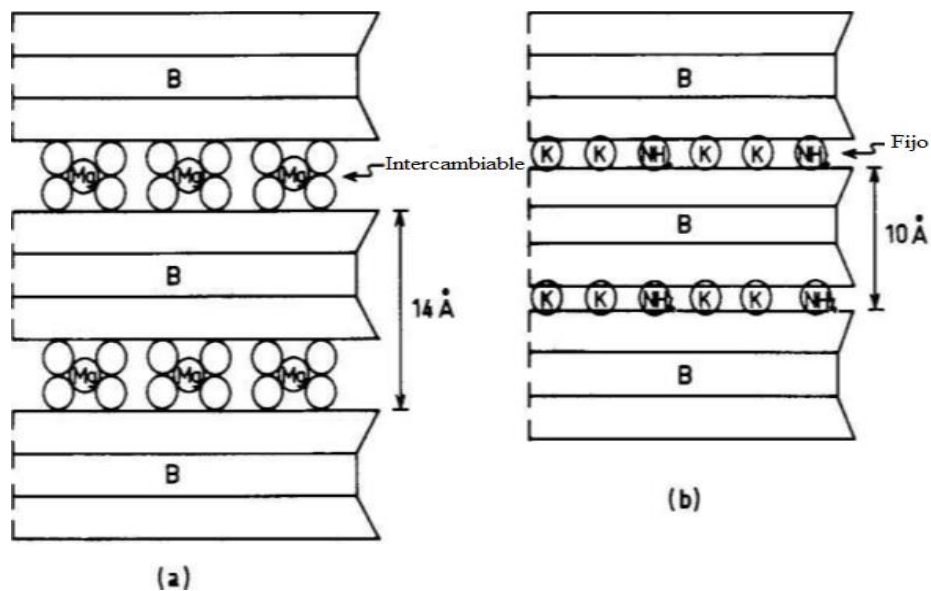


Figura 7. Estructura de la Vermiculita. (a) Estructura expandida por iones de Magnesio hidratados en posición interlaminar. (b) Estructura colapsada de la Vermiculita luego de la saturación de K^+ y NH_4^+ ; capa de B-brucita. Tomado y traducido de Nommik y Vahtras, (1982)

Cuando hablamos de fijación de iones de amonio en la estructura de las arcillas 2:1 Kudeyarov (1981) sugiere los términos nativo y artificial, siendo nativo el amonio fijado en la estructura de las arcillas durante la formación del suelo y artificial el cual es producto del uso agrícola, (fertilizantes amoniacales). Por otra parte estudios como los de Mohammed (1979) indican que aproximadamente un 38% del amonio fijo total (Nativo más Artificial) se hace disponible para el cultivo, concluyendo que el 100% del amonio fijo artificialmente es liberado contrariamente al fijo el cual es liberado tan solo en un 3,4 %.

3.10 Fijación de Potasio

El potasio en el suelo se encuentra en cuatro formas, las cuales difieren en su disponibilidad para los cultivos. De mayor a menor disponibilidad se tiene: potasio en solución, intercambiable, no intercambiable (fijo) y mineral o “estructural” (García y Quinke, 2012). La cantidad de potasio en la solución del suelo es mínima y rápidamente es absorbido por las plantas por estar inmediatamente

disponible. Cuando este es absorbido y extraído por las plantas, es renovado y restituido inmediatamente por la cesión de formas menos fácilmente accesibles ubicadas en las zonas de adsorción de los coloides minerales y orgánicos del suelo (intercambiables). El proceso de adsorción-desorción es el que repone y equilibra la concentración de potasio de la solución del suelo (Conti, s/f).

Cuando la concentración de potasio de la solución ha disminuido (intercambiable mínimo), el mismo es liberado de las interláminas de las arcillas (potasio fijado) para reponerlo a la solución del suelo. Ante la fuerte extracción de potasio por los cultivos, el no intercambiable juega un papel fundamental en la nutrición potásica cuando la forma intercambiable es insuficiente, pero es importante aclarar que el potasio no intercambiable pasará a la solución con mucha menor velocidad que el intercambiable (Intagri, 2017).

El proceso de fijación de potasio es común en suelos que en su constitución mineralógica contienen principalmente arcillas del tipo illita y esmectita. Cuando a estos suelos se les agrega potasio proveniente de fertilizantes, en realidad este ocupa en primera instancia los lugares interlaminares (Figura 8). Por otro lado, cuando los sitios de fijación se encuentran poco saturados, el ingreso de potasio al sistema puede implicar una disminución de la disponibilidad actual del nutriente para el cultivo, pero una fuente de reserva futura. Aunque la anterior es quizá la principal razón de fijación de potasio, ésta también puede surgir por factores térmicos, que producen la apertura de las estructuras de los minerales micáceos, favoreciendo la liberación de este elemento y la saturación potásica del suelo. Los valores de potasio fijado aumentan a un nivel máximo, después del cual los valores de fijación suelen ya modificarse poco debido a la saturación de los sitios del complejo de intercambio. Por esta razón, es importante estudiar los mecanismos responsables de la fijación de cada suelo para poder implementar estrategias de manejo de la fertilidad buscando incrementar la eficiencia de la fertilización tanto potásica como amoniacal (Conti, 2007).

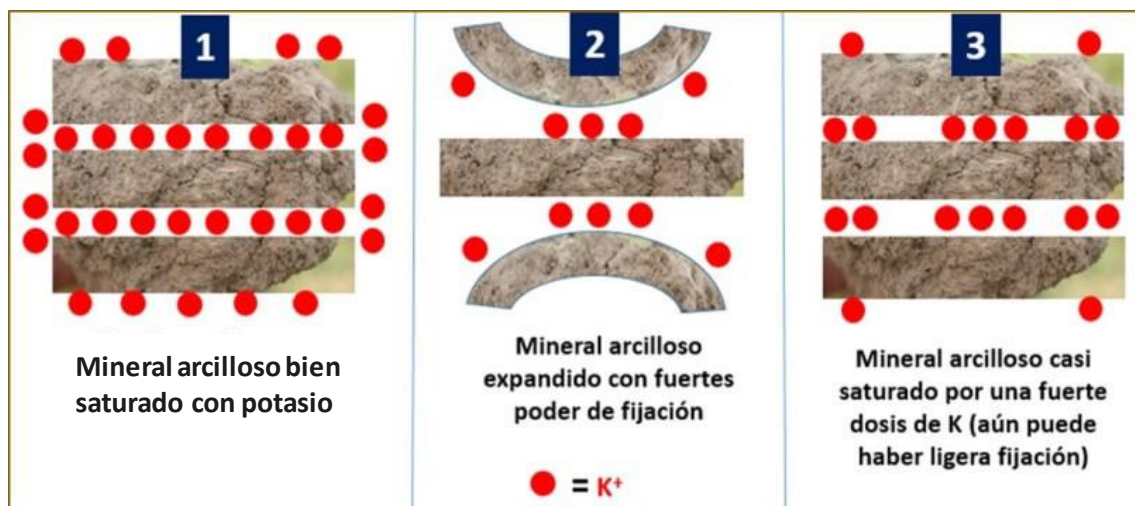
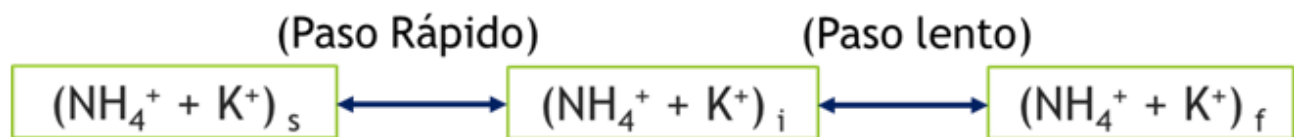


Figura 8. Fijación de potasio en minerales illíticos. Adaptado por Intagri (2017) de Conti (2007).

3.11 Relación y equilibrio de los iones potasio y amonio.

Según lo reportado anteriormente (Tabla 3) estos dos iones poseen la misma carga y radios iónicos muy similares, 0.143 nm NH_4^+ y 0.133 nm K^+ , lo cual hace que ambos puedan ser fijados en las cavidades hexagonales de las arcillas 2:1 (radio de 0.140 nm), en las láminas de tetraedro u octaedro substituidas quedando atrapados entre las capas de silicio fuertemente protegido de reacciones de intercambio. El equilibrio de los iones de NH_4^+ fijados en el suelo está basado en el siguiente esquema equilibrio relacionado al K^+ (Ajazi, 2013).



Equilibrio de los iones amonio y potasio en solución (s), posiciones intercambiables (i) y fijas (f) en el suelo. Tomado de Nommik, (1957).

Por lo tanto debido a esta competitividad generada por los potenciales iónicos similares, las concentraciones de los iones de K^+ en la solución del suelo y en posiciones intercambiables van a ser un factor importante en la regulación de la fijación y liberación de NH_4^+ en el mismo (Ajazi, 2013). Así mismo esto indicará que ambas especies se encuentran en equilibrio con sus diferentes formas en el suelo, en solución, intercambiable y fija. Esto supone que cuando uno de estos iones en su forma más disponible (en solución) sea tomado por las plantas, la reacción se desplazará hacia la izquierda generando la liberación de las posiciones intercambiables a la solución del suelo en un paso rápido y por consiguiente los iones fijos a las posiciones intercambiales (proceso más lento), demostrando la importancia de este fenómeno en los suelos como reserva de nutrientes en periodos de baja disponibilidad o alta demanda por los cultivos.

Sin embargo el caso especial del NH_4^+ aumentando su fijación en el suelo además de ser una manera de tener una reserva de nitrógeno para de alguna forma optimizar la producción de cultivos también servirá como protección de este nutriente de la actividad biológica presente en el suelo minimizando así su pérdida por la alta solubilidad del NO_3^- resultante del proceso de nitrificación o por una posterior pérdida del sistema suelo en su formas gaseosas (ya sea como N_2 o como NO_2) debido al proceso de desnitrificación (Guo et al, 1983) y (Liu et al, 2008).

4. ANTECEDENTES

A continuación se presentan una serie de investigaciones nacionales e internacionales las cuales sirven como base o apoyo a la presente investigación, así como también ayudaran a interpretar los resultados obtenidos en el presente trabajo.

4.1 Nacionales

Prieto y López-Hernández, (1984) realizaron estudios físicos y químicos de suelos de la región del Estero de Camaguan en el estado Guárico los cuales ellos identificaron como Vertisoles con algunos Entisoles desarrollados sobre pequeñas elevaciones de dunas. Dentro de su metodología les realizaron análisis de rayos X a dos muestras, una la cual describían como una arcilla superficial localizada en Corozo Pando (Edo. Guárico) y otra muestra proveniente de las barracas del río Apure; si bien en ambos casos encontraron un predominio de cuarzo cristalino determinaron la presencia de arcillas 2:1 como montmorillonita e illita en ambos suelos estudiados.

Hernández, (2006) en su trabajo realizó un estudio de reconocimiento de las arcillas presentes en los suelos de una zona compuesta por planicies de agradación de las riberas al sur de Maracay en el estado Aragua. Por medio de la Difracción de Rayos X (DRX) a 7 muestras reveló la presencia de illita, caolinita y montmorillonita en casi 50% del peso total de las muestras.

Lopez y Guevara, (2012) realizaron una determinación de arcillas expansivas en 3 estados al norte de Venezuela, Anzoátegui, Falcón y Miranda. A 13 de las muestras de suelo tomadas en estos estados le realizaron difracción de rayos X (DRX) y 9 muestras más las analizaron por microscopia electrónica de barrido (SEM). En sus resultados logran semi-cuantificar la presencia de minerales de arcilla, indicaron además que en el estado Falcón determinaron la presencia de 57,3% de caolinita, 12% de esmectita y 32% de illita, por otro lado los suelos de Anzoátegui presentaron 53% de caolinita, 29 % de illita y 9% de esmectita, por último en suelos del estado Miranda reportaron 58% de illita, 28% de esmectita, de igual forma detectan caolinita y clorita pero en porcentajes muy bajos.

Lopez-Hernández y Infante, (S/F) Analizaron la fijación de amonio en un molisol del estado Yaracuy cultivado con caña de azúcar localizado entre Farriar y Palmarejo con abundante presencia de arcillas 2:1 (montmorilloníticas y muscovíticas) por medio del método clásico de Silva y Bremner. De esta manera determinaron un alto contenido de nitrógeno como amonio fijo en el suelo representando del 18-57% del nitrógeno total el cual se encontró asociado a la abundante presencia

de minerales de arcilla 2:1 presentes en la fracción limo del suelo debido a que la fracción de arcilla en este molisol estudiado resultó ser insignificante. Así mismo de esta manera pudieron encontrar una correlación positiva entre el % de limo y de NH_4^+ en el suelo.

4.2 Internacionales

Nommik, (1957) demuestra que el amonio fijo en los suelos aumenta con adiciones de este ion al sistema y que esta fijación es mayor en la fracción de arcilla del suelo. Por medio de adiciones simultaneas de potasio y amonio encontró que, el amonio se fija preferencialmente que el potasio y que una adición equivalente de ambos iones, resulta en una proporción de fijación de 1:3,5 potasio - amonio respectivamente, además la adición simultanea de amonio con diversas concentraciones de potasio determina que existe un intervalo en donde tras añadir pequeñas cantidades de potasio la fijación de amonio aumenta poco pero significativamente. Todos estos resultados le permitieron plantear que ambas especies iónicas se encuentran en un equilibrio en el suelo en sus formas en solución, intercambiables y fijas. Años después Nommik, 1965 determina que en suelos de predominancia de vermiculita el NH_4^+ tiene una fijación más rápida que el K^+ y que la relación NH_4^+/K^+ disminuye conforme aumenta la concentración de las sales añadidas.

Hinman, (1965) analizó en dos suelos canadienses de la provincia de Saskatchewan de textura fina, el NH_4^+ nativo así como su capacidad de fijación, potasio intercambiable y materia orgánica; determinando que la fijación de amonio disminuía con la proximidad a la superficie del suelo, contrariamente el potasio intercambiable y materia orgánica aumentaban. Así mismo demostró que añadiendo KCl al suelo aumentaba el K^+ intercambiable y disminuía la fijación de amonio proporcionalmente a la cantidad de KCl añadido.

Ajazi et al, (2013) analizaron el efecto del potasio en la fijación de amonio en los minerales de arcilla presentes en diferentes horizontes de suelos de Albania. Se encontraron con que en los horizontes más superficiales la capacidad de fijación de amonio es menor que en los más profundos e indicaron que se debe a que en los horizontes más superficiales la presencia de arcillas 2:1 como la vermiculita e illita es menor. Así mismo determinaron que la adición de fertilizantes potásicos 2 días antes de los amoniados puede reducir la fijación de amonio debido a que el potasio podrá ocupar los espacios fijos dejando menor disponibilidad para el amonio.

Scherer et al, (2014) estudiaron la fijación y liberación de amonio en minerales de arcilla y la influencia del potasio en estos procesos. Añadieron diferentes sales de amonio en dosis de 250

mg/Kg de suelo y K_2SO_4 como fertilizantes de potasio en dosis de 250 y 500 mg/Kg de suelo variando el tiempo de adición y la concentración de K añadido. Señalaron que la adición de K^+ previo a la de NH_4^+ produjo una disminución de la fijación de este último del 20% debido la competición por los mismos sitios de fijación en las capas de las arcillas 2:1. También lograron precisar que la adición de altas concentraciones de potasio iba a bloquear la liberación de los iones de amonio que se encuentran fijos, evitando que estas pasen a sus formas disponibles.

Abasiyan y Towfighi, (2018) estudiaron la cinética en la competencia de fijación de los iones amonio y potasio en arcillas presentes en suelos. El estudio fue realizado mediante 7 modelos matemáticos en los cuales determinaron que, adiciones simultaneas de ambas especies iónicas genera una elevada fijación de potasio y en menor proporción amonio lo cual demostró la preferencia de potasio ante el amonio en la fijación en la fracción limo de los suelos estudiados, esto debido a la presencia de micas y esméctica. Así mismo lograron determinar que la tasa de fijación de estos iones fue exponencial, más sin embargo con el paso del tiempo se tornó prácticamente constante (Figura 9).

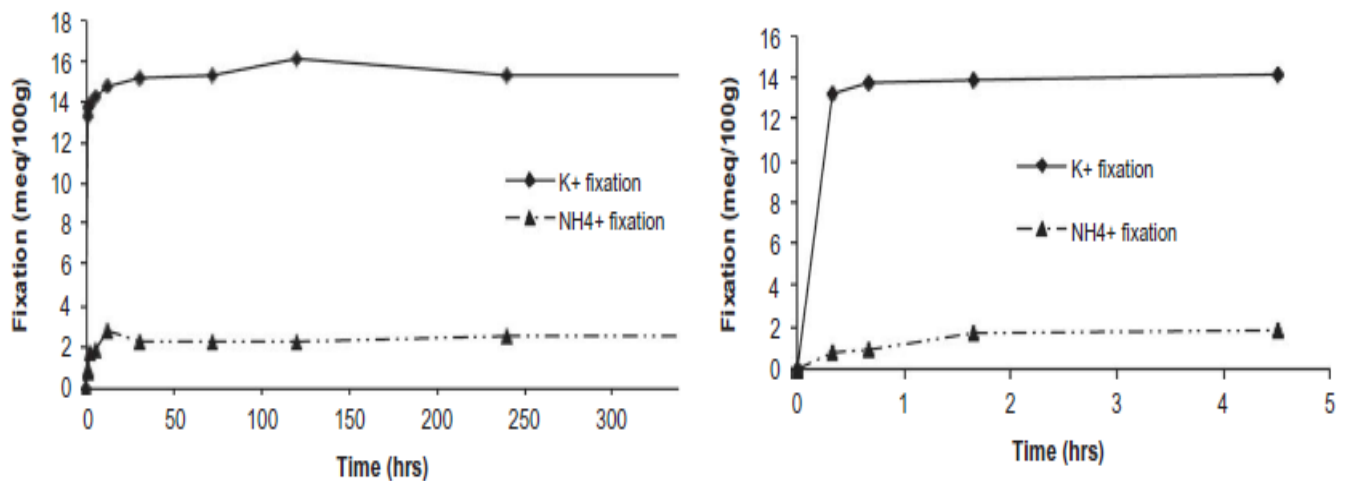


Figura 9. Dependencia del tiempo en la competencia iónica en la fijación de los iones amonio y potasio. En la fracción de limo del suelo. Tomado de Abasiyan y Towfighi, (2018)

5. ZONA DE ESTUDIO

5.1 Ubicación

La zona de estudio se ubica en el estado Miranda, en la sub-región de los Valles del Tuy, específicamente en las adyacencias al tramo correspondiente a la carretera de Charallave (734980.00 m E, 1131830.00 m N UTM) hasta Ocumare del Tuy (743184.00 m E, 1121727.00 m N UTM), (Figura 10).

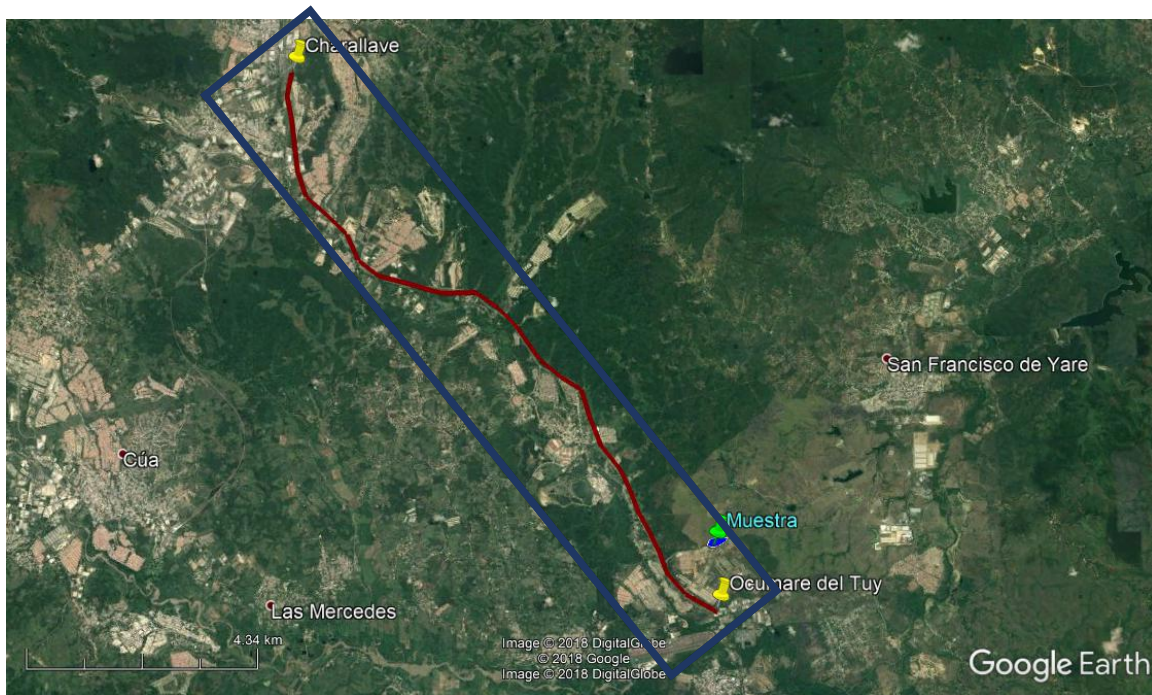


Figura 10. Zona de estudio, adyacencias de la Carretera Charallave-Ocumare del Tuy, Edo Miranda. Tomado de Google Earth Pro, versión 7.3.1.

5.2 Geología Regional

A continuación se identifican las 2 formaciones presentes en el área de estudio correspondiente a Charallave-Ocumare del Tuy, recopilación tomada del Léxico Estratigráfico de Venezuela en su versión en línea.

5.2.1 Formación Tuy (Plioceno – Pleistoceno): es una unidad de sedimentos poco consolidados restringida a la cuenca de Santa Lucía-Ocumare del Tuy (Picard y Pimentel, 1968), se caracteriza por una intercalación de capas gruesas, generalmente de 1 a 3 metros de espesor de gravas

heterogéneas y conglomerados líticos mal consolidados, con matriz limo arcillosa abundante y a veces con cemento calcáreo, intercaladas con lutitas y cantidades menores de margas y areniscas. Los cantos son redondeados de rocas metamórficas, provienen de las formaciones Las Mercedes, Chuspita y Las Brisas hacia el norte de Suapire y Santa Lucía; Rocas de Conoropa, Formación Urape, metaconglomerado de Charallave, Formación Paracotos y el Grupo Villa de Cura en el resto de la cuenca. Las lutitas se presentan en capas menores de 1 m de color crema a rosado y ocasionalmente verdosas, frecuentemente calcáreas hasta margosas.

La Formación consiste de areniscas y conglomerados mal consolidados (55%) y lutitas, generalmente impuras (30%); el resto es de areniscas y margas. La Formación Tuy cubre aproximadamente el 70% de la cuenca Santa Lucía-Ocumare del Tuy, en una poligonal con vértices en Santa Lucía, Santa Teresa, Ocumare del Tuy, Cúa, Charallave y Suapire.

5.2.1 Formación Tucutunemo (Cretácico Tardío): Según Grande (1995) consiste de filitas y filitas esquistas, las filitas son grises a gris oscuro, cuarzo-ceríticas; metaconglomerados polimícticos con cantos volcánicos y de cuarzo, lentes de caliza recristalizada de grano fino, grises a negruzcas y metagrawacas así como se encuentran zonas de mármoles gris oscuros a negros, asociados a un metaconglomerado carbonático. La Formación se extiende de este a oeste, desde la región de Los Teques-Cúa en el estado Miranda, hasta la región de Tinaquillo en el estado Cojedes.

5.3 Clima

Debido a la ubicación geográfica de Venezuela, posicionada al norte de América del Sur, y su cercanía con el ecuador, el país se encuentra bajo la influencia de la hondonada intertropical de bajas presiones ecuatoriales, donde los vientos alisios provenientes del sureste convergen con los vientos alisios del noreste. Este fenómeno trae como consecuencia que a alturas mayores de los 2000 msnm el aire carezca de humedad, por lo que el proceso convectivo de generación de nubes sea muy limitado, esto generalmente deriva en un clima seco en el país, aunque la zona norte se ve afectada con relativa frecuencia por frentes fríos especialmente, entre los meses de Enero a Abril, que provocan precipitaciones dentro de la temporada seca (Barreto, 2010).

El tipo de clima general del área de estudio es un clima monzónico, el cual es un clima transicional entre los climas tropical de sabana y tropical de selva, típico de regiones piemontinas o valles intramontinos como Los Valles del Tuy. Este tipo de clima domina gran parte del país y es difícil de diferenciar. Dado a que la carretera Charallave-Ocumare del Tuy se encuentra en una cota menor de

lo 800 msnm, corresponde al piso térmico de tierra caliente, la cual posee temperaturas que varían generalmente desde los 22 °C hasta los 29°C. Los meses donde las posibilidades de pluviosidad son mayores son los meses de; Junio, Julio y Agosto, con una media anual de 800 mm (Barreto, 2010).

5.4 Vegetación

La vegetación de la zona de estudio, es una vegetación de arbustales y matorrales, donde domina la presencia de arbustos, que no superan los 2m de altura. Este tipo de vegetación está condicionada por el clima, de este factor depende la densidad del mismo. Otro factor que determina la densidad de este tipo de vegetación es la altura, pues se observa un aumento en la densidad de la vegetación hacia el tope de las colinas. Entre los tipos de arbóreas más comunes se observan el Jabillo (*Hura crepitans*) y el Dividive (*Libidibia coriana*), mientras que los arbustos que con mayor presencia se observan son el Cují y la Guayaba sabanera. Hacia la parte de menor altura de la colina y en el resto del valle, la vegetación que se presenta es de tipo de sabanas y herbazales, que se caracteriza por ser una cubierta de hierbas, la cual presenta arbustos aislados y en algunos casos en pequeños grupos. (Barreto, 2010).

6. MARCO METODOLÓGICO

La metodología a seguir para cumplir con los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación se basó primordialmente en dos etapas, siendo la primera una etapa de campo en la cual fue realizada la toma de muestras así como una etapa de laboratorio en la cual las muestras previamente captadas fueron preparadas y analizadas.

6.1 Etapa de Campo

Una vez realizada la revisión bibliográfica antes descrita se procedió a planear los recursos y materiales necesarios para la ejecución de la salida de campo, de manera de realizar el muestreo.

Fue realizado un muestreo simple, específicamente en un solo punto, correspondiente a las coordenadas (743188.00 m E, 1122977.00 m N). Fue escogido concretamente ese único punto debido a que estudios físicos previos de expansividad en la zona, determinaron la mayor concentración de arcillas expansivas del área estudiada (Azul) en el punto el cual fue elegido para la realización del muestreo (Figura 11) (Ing. L. Scremin, comunicación personal, Julio del 2018).



Figura 11. Muestreo simple. (El color azul representa la zona previamente estudiada para delimitar el punto de mayor presencia de arcillas expansivas). Tomado de Google Earth Pro, versión 7.3.1.

Se realizó una calicata de aproximadamente 2m^3 . El primer metro del suelo fue separado debido a la presencia de materia orgánica en él. Sin embargo los espesores de 1-1,5 m y de 1,5-2m fueron captados y guardados en sacos y llevados al laboratorio para analizar (Figura 12). A partir de ahora a ellos nos referiremos como espesor I y II.



Figura 12. Toma de muestras. Etapa de campo.

6.2 Etapa de Laboratorio

6.2.1 Tratamiento físico de las muestras

Una vez en el laboratorio se les aplicó un tratamiento previo físico antes de la realización de los respectivos análisis del suelo. Este tratamiento implicó la disgregación, secado, tamizado, homogeneizado, cuarteo y pesada de las muestras previamente tomadas para su posterior conservación y análisis químicos.

Disgregación

Para proceder a la disgregación fue necesaria la remoción manual de cualquier elemento ajeno al suelo que pudo encontrarse en las muestras tomadas, como pequeños fragmentos de raíces y restos vegetales. Posterior a esto se procedió a la fractura de los agregados del suelo mediante el uso de un mortero de porcelana, realizando movimientos suaves debido a que fue de suma importancia tener cuidado de no alterar granulométricamente las fracciones del suelo para de esta manera no interferir en los posteriores análisis a realizar. Esta disgregación de las muestras fue realizada sobre una lámina de plástico.

Secado y tamizado

Las muestras disgregadas sobre la lámina de plástico fueron dejadas secar al aire en el laboratorio a condiciones ambientales por 24 horas. Seguidamente de esto se procedió a realizar el tamizado de las mismas, para ello se pasó el material a través de un tamiz (N°70) con malla de 2 mm de manera de retirar la fracción mayor a 2mm y conservar los fragmentos de menor diámetro (fracción activa del suelo) (figura 13) (Jackson, 1976).



Figura 13. Tamizado de muestra de suelo. (Tamiz N°70).

Homogeneización y cuarteo

Fue de suma importancia que las muestras estuvieran mezcladas en todas sus fracciones (menores a 2mm) de manera de homogeneizarlas para que a la hora de realizar los respectivos análisis estas fueran representativas. Esta mezcla fue realizada de forma manual en la cual se tomaron dos puntas o vértices opuestos del plástico en que estas se encontraban, estirando uno de estos diagonalmente a través de la muestra de forma que se viera obligada a rodar, sin deslizarse, hasta el vértice opuesto. Posteriormente se estiró el vértice opuesto de manera que la muestra esta vez girara en sentido contrario. Se repitió este proceso con los dos vértices opuestos restantes y la operación se realizó 10 veces de manera de asegurarse que la homogeneización fue óptima.

Seguido de esto se procedió a cuartear y homogeneizar la muestra, para ello se genera un cono lo más simétrico posible. Luego se dividió en cuatro partes iguales con ayuda de una espátula de metal (figura 14). Se descartaron dos cuartos opuestos y se tomaron los restantes de manera de volver a repetir el proceso una vez más hasta tener un volumen de muestra de aproximadamente 1 kg para cada espesor, posteriormente fueron guardados en bolsas plásticas y rotulados como espesor I (1m-1,5m) y espesor II (1,5m-2m).



Figura 14. Separación de muestra homogeneizada en cuatro partes iguales para el cuarteo.

6.2.2 Clasificación Textural del suelo

Una vez realizado el tratamiento físico de las muestras de manera de prepararlas para los análisis químicos, se procedió a determinar y clasificar la textura del suelo por medio del Método de Bouyoucos.

Método de Bouyoucos

Este método resulta ser una de las formas más sencillas y rápidas de determinar la textura de un suelo por medio del análisis de la distribución de las diferentes fracciones o partículas del suelo. La cuantificación de cada fracción textural fue obtenida por medio de la ley de Stokes, la cual determina la cantidad de estas partículas de acuerdo a su velocidad de caída en una suspensión, esta resulta directamente proporcional al diámetro de la misma. Este método es adecuado para la identificación de la clase de textura de acuerdo al análisis de laboratorio y cuyos resultados se expresan en porcentajes de arenas, limo y arcillas (McKean, 1993).

Ley de Stokes

$$VT = g(d_p - d_l)D^2/18\eta$$

Donde VT = velocidad

g = es la fuerza de gravedad en cm/s²

$d_p - d_l$ = es la diferencia de densidad entre la partícula y el líquido

D = diámetro de la partícula en cm y

η = viscosidad del líquido

La velocidad VT puede ser expresada como $V = h/t$, donde h = es distancia en cm y t = tiempo en s.

De esta manera la ecuación anterior se puede escribir como:

$$t = 18\eta h / g(d_p - d_l)D^2$$

Esta última ecuación describe cómo una partícula se decanta en un líquido con una altura h (en cm) en un tiempo t (en s).

Procedimiento

Se pesaron 50 g de suelo en un beaker, posteriormente fueron añadidos 100mL de una solución 50g/L del agente dispersante $(\text{NaPO}_3)_6(\text{Na}_2\text{CO}_3)$ (hexametáfosfato de sodio), seguido de esto se

procedió a la agitación con ayuda de una varilla de vidrio de manera de mezclar bien, luego de esto se dejó en contacto el suelo con la solución dispersante durante aproximadamente 20 h según lo reportado por Bouyoucos, (1962).

Una vez pasadas las 20h se procedió a transvasar el contenido de los beakers a un vaso del batidor Hamilton ayudándose con la piceta, asegurándose de que todo el suelo fue transvasado. Una vez en el batidor se procedió a batir por 15 minutos. Concluido el batido el contenido del vaso fue transvasado a una probeta graduada de 1L y nuevamente con ayuda de la piceta se aseguró de no dejar residuos de suelo en el vaso del batidor, luego se aforó la probeta y se agitaron manualmente con movimientos circulares 10 veces tapando la boca de la probeta con ayuda de una bolsa. Inmediatamente concluido el agitado se inició el cronometro y se midió la densidad y temperatura con ayuda de un hidrómetro Bouyoucos H-152 y un termómetro respectivamente a los 40 s y 2 horas (Figura 15). Esta metodología fue realizada por triplicado para ambos espesores del suelo estudiado.



Figura 15. Desarrollo del método de Bouyoucos

Cálculos necesarios

Debido a que el hidrómetro se encuentra calibrado para una medir densidad de líquidos a una temperatura de 68°F fue necesaria una corrección mediante la temperatura medida por el termómetro a través de la siguiente ecuación:

$$(c) = (t^{\circ}F - 68) * 0.2$$

Donde:

t= temperatura encontrada.

c= se adicionó al valor al del hidrómetro para corregirlo en ambas mediciones tanto en los triplicados como en el blanco.

% Arena=100-(((1ra lectura corregida)-(1era lectura blanco corregido))*100)/peso de la muestra.

% Arcilla=(2da lectura corregida-2da lectura blanco corregido) (*100)/peso de la muestra.

%Limo=100-(%Arena+%Arcilla)

Una vez hallados estos porcentajes se procedió a determinar la textura del suelo por medio del triángulo de la textura (Figura 16).

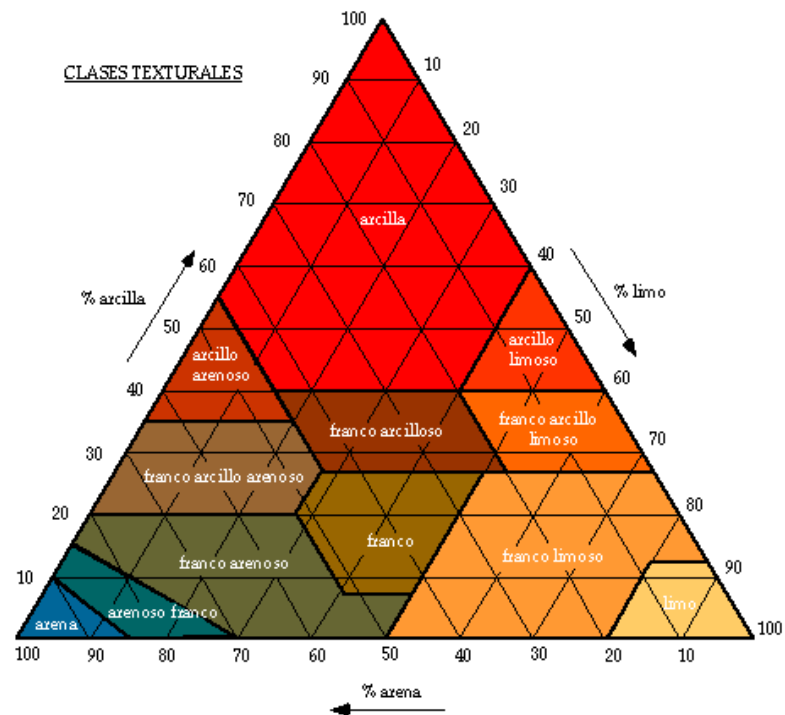


Figura 16. Clases texturales del suelo de acuerdo a sus porcentajes de arena, limo y arcilla. Tomado de Universidad de Granada, (2004).

6.2.3 Caracterización mineralógica del suelo

Difracción de Rayos X

Una vez clasificado el suelo mediante su respectiva clase textural se procedió a la caracterización mineralógica del mismo. Esto fue realizado mediante Difracción de rayos X (DRX) concretamente con el método del polvo (Dana y Hurlbut, 1960).

Fundamento

Los rayos X resultan ser radiaciones electromagnéticas de alta frecuencia con una longitud de onda corta, aproximadamente $1\text{\AA}$, la cual es cercana al tamaño de un átomo, la radiación ocurre en la porción del espectro electromagnético entre los rayos gamma y los ultravioleta. Estos rayos se generan cuando un haz de electrones de alta energía o velocidad incide sobre la materia (figura 17).

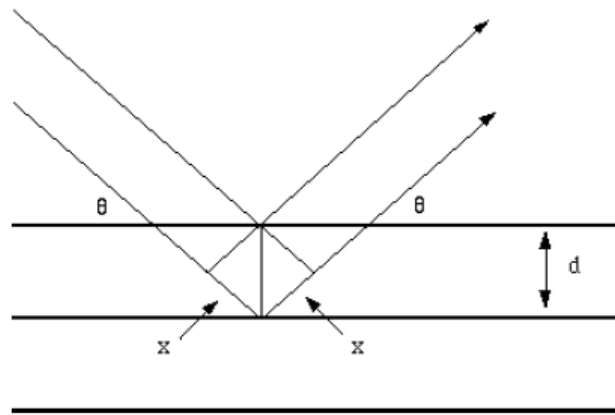


Figura 17 Reflexión de rayos X entre dos planos de átomos en un sólido. Ley de Bragg. Tomado de Hernández (2006).

La aplicación fundamental de la difracción de rayos X es la identificación de la composición mineralógica de una muestra cristalina. Está basada en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación X (Dana y Hurlbut, 1960).

Método del Polvo

Para asegurar la máxima orientación u orientación total de estas pequeñas partículas con el haz de rayos X incidente, generalmente se hace girar la muestra en el haz de rayos X durante la exposición (Dana y Hurlbut, 1960). Cuando el haz monocromático de rayos X incide en la muestra, se producen

simultáneamente todas las difracciones posibles. Si la orientación de las partículas cristalinas en la muestra es realmente estadística, para cada familia de planos atómicos con un característico espaciado (d), existen muchas partículas cuya orientación es tal que hacen el Angulo apropiado Θ con el rayo incidente, de tal manera que se satisface la ley de Bragg $n\lambda=2d \text{ sen}\Theta$. (Dana y Hurlbut, 1960).

Diseño experimental

El siguiente método fue llevado a cabo de acuerdo al procedimiento descrito por Moore y Reynolds, (1989). El mismo se describe a continuación:

Se colocó un vidrio esmerilado a una plaquita de aluminio especial de difracción por el lado de incidencia de los rayos X, el vidrio fue ajustado con cinta plástica transparente y se volteó el conjunto vidrio esmerilado- plaquita. Se agregó el polvo fino (muestra) con una espátula cuidando que esta se mantuviera perpendicular a la superficie del aluminio para lograr la máxima desorientación.

Se llenó el espacio de la plaquita con el polvo, posteriormente se colocó un vidrio normal ajustándolo también con cinta plástica transparente teniendo cuidado de no hacer mucha presión. Se volteó el conjunto y fue retirado el vidrio esmerilado cortando las cintas con una hojilla (figura 18 C). De esta manera la cara de incidencia de los rayos x quedó desorientada por la superficie esmerilada (figura 18 D)

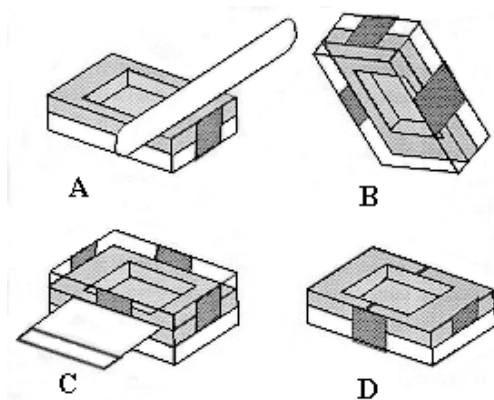


Figura 18. Método de preparación de montura del polvo desorientado. Tomado de Moore y Reynolds (1989).

Una vez obtenidos los difractogramas correspondientes se procedió a semi-cuantificar los minerales presentes en ambos espesores según el tratamiento descrito por Pozas et al, (1971). El mismo se basó en la normalización de las señales emitidas por los minerales en relación a sus respectivas reflectancias pudiendo de esta manera llegar a un porcentaje aproximado de los minerales presentes y por consiguiente una semi-cuantificación. La reflectancia utilizada para la albita fue la reportada para los feldespatos. De esta manera se pudo determinar cuál de los espesores del suelo fue el más óptimo para realizar el estudio de competencia iónica de fijación de amonio y potasio.

6.2.4 Métodos de extracción

Para el cumplimiento de los objetivos de competencia iónica, tiempo de adición y concentración, determinación de la capacidad de fijación y formas intercambiables, fue necesaria la realización de las extracciones de potasio y amonio disponible, estas mismas fueron realizadas por los métodos descritos a continuación.

Determinación de la fijación de potasio

El potasio fue determinado mediante el método de Acetato de amonio ($\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$) 1M a pH=7 el cual permitió la liberación de potasio intercambiable a la solución del suelo producto de una saturación con iones de amonio, un posterior análisis por emisión atómica del potasio intercambiable y en el filtrado permitió determinar el potasio fijo (Pansu y Gautheyrou, 2006).

Método de Acetato de amonio 1M a pH=7 (Pansu y Gautheyrou, 2006)

Fue preparada una solución de acetato de amonio 1M la cual requirió la adición de unas gotas de Ácido acético de manera de ajustar el pH a 7 con ayuda del pH metro. Las extracciones fueron realizadas para todos los ensayos una vez concluidos los tiempos de incubación para cada experimento. En un principio fueron añadidos 25mL de la solución de $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$ en cada fiola, posteriormente fueron tapadas y agitadas manualmente de manera de mezclar bien y dejar reaccionando la solución extractante con el suelo durante la noche. Al día siguiente se volvieron a agitar y tras esperar que decantaran se procedió a filtrar con ayuda de papeles de filtro Whatman °2 (figura 19). Este procedimiento fue repetido 2 veces más añadiendo 25mL del extractante, agitando y dejando decantar 10 minutos entre cada extracción, de manera de finalmente aforar en balones de 100mL y llevar a frascos de análisis.

Una vez extraído el potasio se procedió a determinar el mismo mediante espectrometría de emisión atómica a la llama, debido a que la curva óptima para este método es de 1-5 ppm fue necesaria la dilución de 5/100 mL (20 veces) de los triplicados de 0, 2, 5, 10 y 20 mEq de NH_4^+ /100g de suelo mientras que los ensayos de H_2O y el blanco fueron determinados sin dilución alguna tanto en el diseño experimental de adición de amonio previa como de adiciones simultaneas de ambas sales.



Figura 19. Filtrado de incubaciones de experimento de adiciones simultaneas para la extracción de potasio por el método de Acetato de amonio 1M pH=7.

Bien es sabido que una vez se hayan añadido sales de potasio de concentraciones conocidas al suelo, una parte de estas pasará a la solución, otra a posiciones intercambiables y otra se fijará. Sabiendo esto y añadiendo una sal potásica de concentración conocida en cada caso (2mEq K^+ /100g suelo) y determinando el potasio intercambiable (Original) en un suelo sin adiciones previas se pudo determinar cuánto de ese K^+ añadido se fijó por medio de la siguiente ecuación:

$$K^+(\text{fijo}) = K^+(\text{añadido}) - K^+(\text{disponible}) + K^+(\text{Intercambiable original}) \text{ (Zhan et al, 2014)}.$$

Determinación de la fijación de amonio

Fue realizada para cada caso siguiendo la metodología planteada por Ajazi, et al (2013) la cual se basa análogamente a la realizada para el potasio con el método de acetato de amonio ($\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$) 1M pH=7. Para ello fue necesaria la determinación del amonio intercambiable por medio de una saturación del suelo con potasio provocando la liberación de los iones de amonio de posiciones

intercambiables a solución (disponibles). Posteriormente se procedió a la medición del mismo por medio de una determinación colorimétrica siguiendo el método de Wang y Øien, (1986).

Para la realización de este método fue necesaria la preparación de una solución de KCl 1M. Una vez concluidas las incubaciones de 96 y 48h según el caso (adiciones de K^+ previas y simultaneas respectivamente) fueron añadidos en cada fiola 50mL de la solución de KCl 1 M previamente preparada, seguido de esto fueron tapadas y agitadas en un Shaker a una velocidad de aproximadamente 100rpm durante 2h (figura 20).



Figura 20. Agitación de muestras con Shaker para la determinación de la fijación de amonio mediante la extracción del amonio intercambiable.

Una vez concluidas las 2 horas se dejaron decantar y se filtraron de manera similar al procedimiento para la extracción del potasio. Posterior a esto fue necesaria la adición de otros 45mL de la solución de KCl en cada fiola para de esta manera asegurarse que todo el amonio fuese extraído, se agitaron y dejaron decantar 10min para nuevamente filtrar y aforar a 100mL en balones, los cuales fueron agitados para homogenizar el extracto y pasados a frascos para el posterior análisis.

Una vez extraído el amonio su determinación fue realizada por medio del método colorimétrico a través de la formación de un complejo coloreado llamado azul de indofenol (figura 21) según el procedimiento descrito por Wang y Øien, (1986)



Figura 21. Desarrollo de color para la determinación de amonio mediante a método colorimétrico de azul de indofenol.

Para el desarrollo de este método fue necesaria la preparación una solución de NaOH y tartrato de sodio y potasio ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), una solución alcalina de fenol y por último fue necesaria la preparación de una solución de hipoclorito de sodio (NaClO). Para un óptimo desarrollo de este método fueron realizadas pruebas previas con patrones generados a partir de una sal de NH_4Cl previamente sacada a 105°C en una estufa por 20 minutos variando las concentraciones de la solución de hipobromito de sodio hasta encontrar la que desarrollara una mejor reproducibilidad, con la cual se obtuvo una curva de calibración de $R^2=0.9987$ (Figura 22).

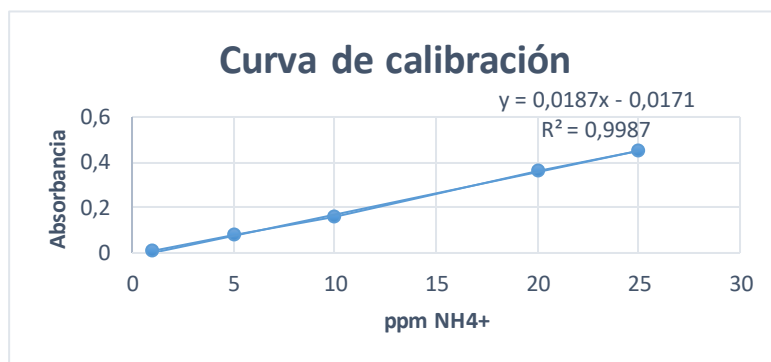


Figura 22. Curva de calibración para determinación de amonio por método colorimétrico.

Una vez calibrado el método se procedió a determinar el amonio previamente extraído mediante el método descrito por Wang y Øien, 1986. Una vez añadidos los 10mL de extracto, 10mL de solución alcalina de tartrato, fueron agitados en fioas de 250mL, posteriormente fueron añadidos 7mL de la solución alcalina de fenol y por último 5mL de la solución de hipoclorito previamente preparadas, seguido de esto las fioas fueron agitadas hasta desarrollar el color y tapadas. Las mediciones se realizaron a la hora de la agitación con ayuda de un espectrofotómetro UNICO 1100RS a una

longitud de onda de 635nm de manera de obtener la absorbancia (figura 23). El equipo fue llevado a 0% de absorbancia y 100% transmitancia con el blanco y fue necesaria la realización de una curva de calibración con patrones de 1, 2, 5, 10, 20 y 25 ppm obteniendo nuevamente una alta correlación.



Figura 23. Técnica colorimétrica. Determinación de amonio mediante espectrofotometría de absorción UV-visible.

Ahora bien, una vez añadida una sal de amonio de concentración conocida y determinado el amonio intercambiable tanto en un suelo sin adición como posterior a la adición de la sal de amonio se pudo determinar que fracción de esta fue fijada, para ello es utilizada la siguiente ecuación:

$$NH_4^+ \text{ (no fijo)} = NH_4^+ \text{ (en el filtrado)} - NH_4^+ \text{ (intercambiable)}$$

$$NH_4^+ \text{ (fijo)} = NH_4^+ \text{ (añadido)} - NH_4^+ \text{ (no fijo)} \text{ Ajazi et al, (2013)}$$

6.2.5 Competencia iónica, tiempo de adición y concentración

Fue evaluado cómo afecta el tiempo de adición y la concentración de una sal de potasio con relación a la de amonio en la fijación de los mismos. Para esto fueron desarrollados 4 experimentos de incubación

Para la realización de estos experimentos fue necesaria la esterilización previa de las fracciones del suelo con ayuda de un autoclave. Las fiolas con el suelo previamente pesado fueron selladas con ayuda de gasas y tirro así como envueltas con papel de aluminio y posteriormente rotuladas. Una vez hecho esto se procedió a llenar el autoclave con agua, se colocaron las muestras (figura 24) y fueron llevadas a 120°C y 1Atm durante 45 minutos. Para asegurarse de que la esterilización fue

realizada con éxito, cada una de las fiolas fue provista de un tirro especial para el autoclave el cual indica que esta fue realizada exitosamente.

Este paso resulta de suma importancia para la investigación ya que de esta manera fue eliminada la biomasa microbiana de los suelos suprimiendo de esta forma pérdidas de amonio por nitrificación y actividad de microorganismos reduciendo el error en el transcurso de las mediciones.



Figura 24. Muestras en el autoclave selladas y rotuladas.

Una vez realizado esto se estudió la competencia de los iones K^+ y NH_4^+ por ocupar los sitios fijos en las arcillas presentes en el suelo. Para esto fueron realizados 4 experimentos de 6 ensayos cada uno por triplicado dando un total de 72 incubaciones las cuales serán descritas a continuación. Dicha metodología fue tomada y modificada de Ajazi et al (2013).

1 - Determinación de la Fijación de K^+ con adiciones de NH_4^+ dos días previos.

Para ello fueron pesados 10g de suelo en fiolas de 250mL. Una vez realizada la esterilización anteriormente desarrollada se procedió a añadir 0, 2, 5, 10 y 20 mEq de NH_4^+ /100g de suelo en forma de soluciones previamente preparadas de NH_4Cl en un volumen fijo de 10mL cada una y en vez de eso a otras a las cuales nos referiremos como “ H_2O ” 10mL de agua desionizada de manera de obtener 6 ensayos. Hecho esto fueron rápidamente tapadas y dejadas incubar durante 48 horas en el laboratorio a condiciones ambientales.

Una vez concluidas las 48 horas fueron añadidos en forma de 10mL de una solución de KCl una única concentración de 2mEq de K^+ /100g de suelo a excepción de las fiolas del ensayo con agua desionizada (H_2O) a las cuales en vez de esto fueron añadidas 10mL de agua des ionizada nuevamente, tras estas adiciones se le agregaron 4 gotas de tolueno de manera de inhibir la actividad

microbiana, fueron bien tapadas y se dejaron incubar durante 48 horas más de manera que a las 96 horas de comenzada la incubación fuera extraído el K^+ intercambiable por medio del método de Acetato de amonio 1M pH=7 previamente descrito siguiendo el método Pansu y Gautheyrou, (2006) (Figura 25)

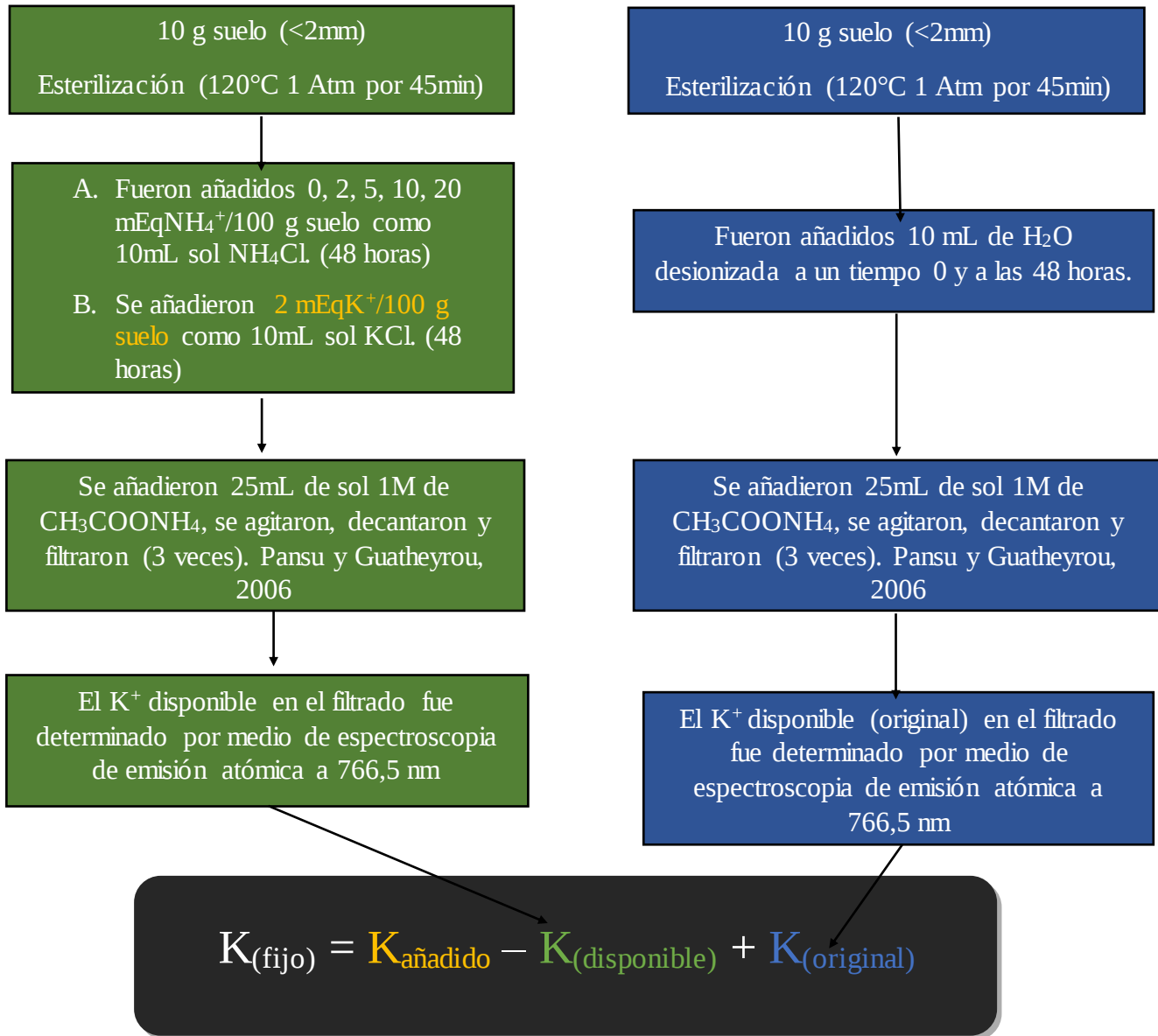


Figura 25. Diseño experimental planteado para el estudio del efecto de adiciones de amonio 2 días previas a las de potasio en la fijación de este último. Las mediciones se realizarán por triplicado. Tomado y modificado de Ajazi et al, 2012.

2- Determinación de la Fijación de K⁺ con adiciones simultaneas de NH₄⁺.

Fue realizado un experimento análogo al anteriormente descrito, pero variando el tiempo de adición de las sales, es decir, una vez realizada la esterilización fueron añadidos 10mL de las soluciones conteniendo 0,2,5,10 y 20 mEq de NH_4^+ /100g de suelo y la misma concentración fija de 2 mEq de K^+ /100g de suelo de manera simultánea, las fiolas de H_2O en vez de esto fueron provistas de 20mL de agua desionizada. Seguido de esto fueron añadidos 4 gotas de tolueno, tapadas y dejadas incubar en el laboratorio por 48h para que una vez culminado este tiempo fuera realizada la extracción del potasio siguiendo el mismo método realizado para el experimento anterior de fijación de potasio con adiciones previas de amonio (Figura 26).

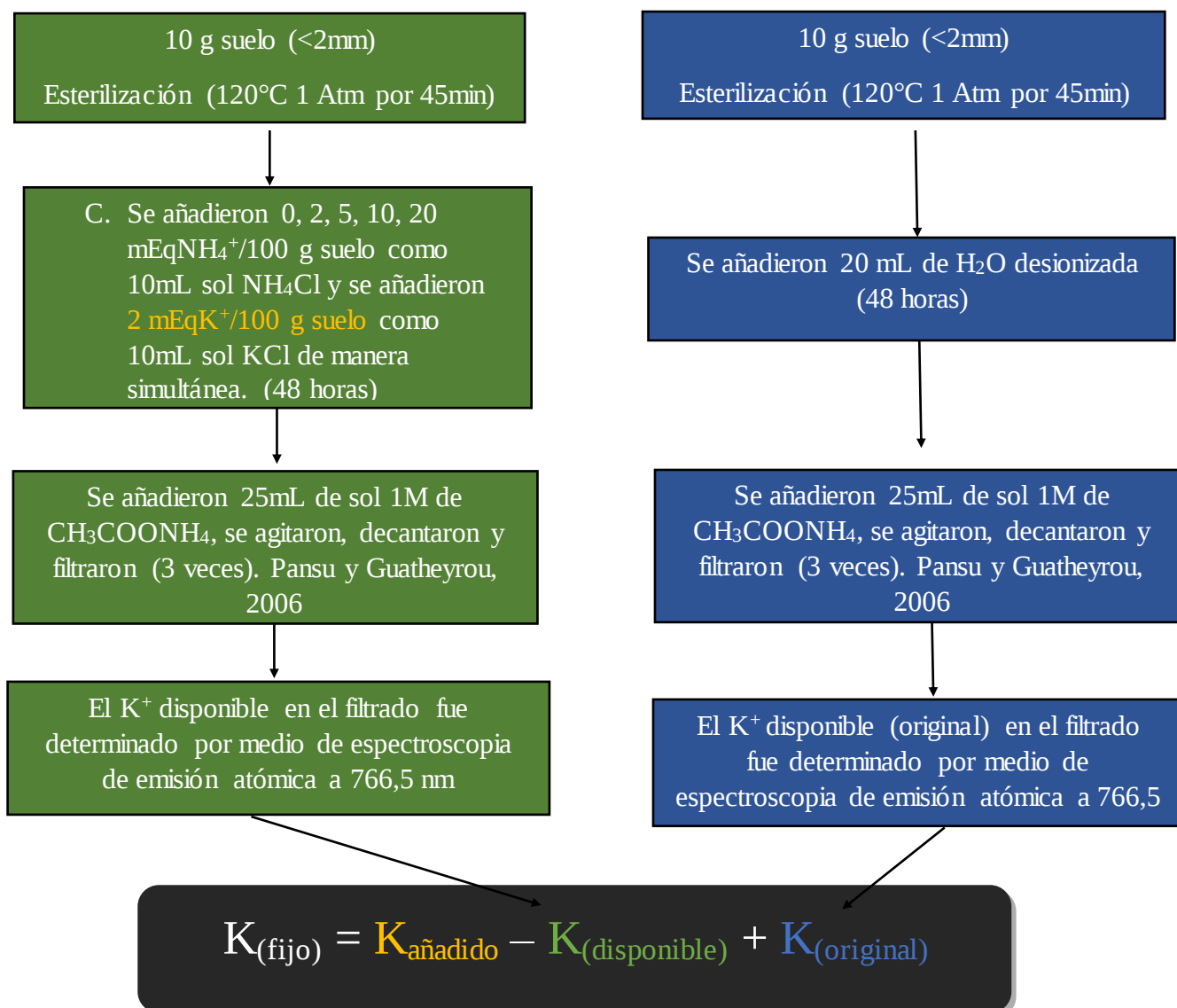


Figura 26. Diseño experimental planteado para el estudio del efecto de adiciones de amonio y potasio simultáneas en la fijación de este último. Las mediciones se realizaron por triplicado. Tomado y modificado de Ajazi et al, 2012.

3- Determinación de la Fijación de NH_4^+ con adiciones de K^+ dos días previos.

En este caso por la gran cantidad de reactivo necesaria para la extracción y la baja cantidad de extracto necesario para la medición, las cantidades fueron reducidas a la mitad, manteniendo la misma relación Sólido/Líquido. Por lo cual fueron pesados 5 gramos de suelo, nuevamente en fiolas de 250mL. Posteriormente fue realizada la pertinente esterilización en el autoclave de la misma manera descrita anteriormente. Una vez hecho esto se procedió a añadir en este caso 5mL de soluciones de KCl previamente preparadas conteniendo 0,2,5,10 y 20 mEq de K^+ /100g de suelo y nuevamente fue realizado un ensayo añadiendo en vez de esto 5mL de agua desionizada de manera de obtener la misma relación sólido/líquido. Las fiolas fueron tapadas y dejadas en el laboratorio por 48h, concluido este tiempo les fueron añadidas una única concentración de 2mEq de NH_4^+ /100g excepto a las de H_2O , a las cuales en vez de esto se añadieron nuevamente 5mL de agua desionizada. Hecho esto se añadieron 2 gotas de tolueno y se taparon. A las 48h de esto y 96 h del comienzo de la incubación fue extraído el amonio intercambiable por medio del método de KCl 1M previamente descrito (Figura 27)

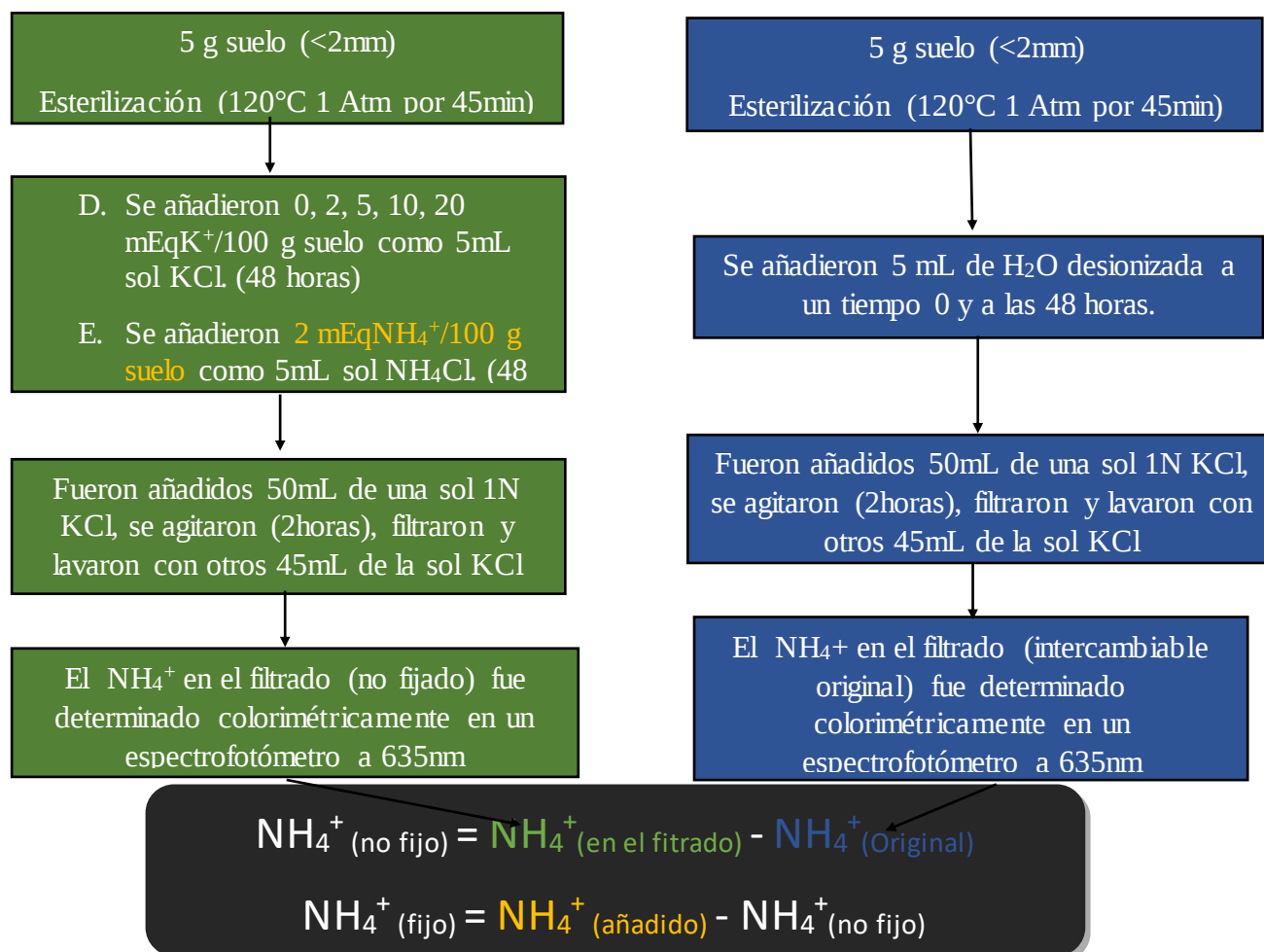


Figura 27. Diseño experimental planteado para el estudio del efecto de adiciones de potasio 2 días previas a las de amonio en la fijación de este último. Las mediciones fueron realizadas por triplicado. Tomado y modificado de Ajazi et al, 2012.

4- Determinación de la fijación de NH_4^+ con adiciones simultaneas de K^+

Para este experimento fueron pesados nuevamente 5g de suelo, esterilizados y añadidos de forma simultanea 0,2,5,10 y 20 mEq de K^+ /100g de suelo en cada una y una única concentración de 2mEq de NH_4^+ en forma de 5mL de soluciones de KCl y NH_4Cl respectivamente seguidas de 2 gotas de tolueno de manera de inhibir la actividad microbiana. Por otra parte, a las fiolas H_2O en vez de estas sales fueron añadidos 10 mL de agua desionizada. A las 48horas de estas adiciones fue realizada la extracción de NH_4^+ mediante el mismo método posteriormente descrito y realizado en el experimento anterior de fijación de NH_4^+ con adiciones previas de K^+ (Figura 28).

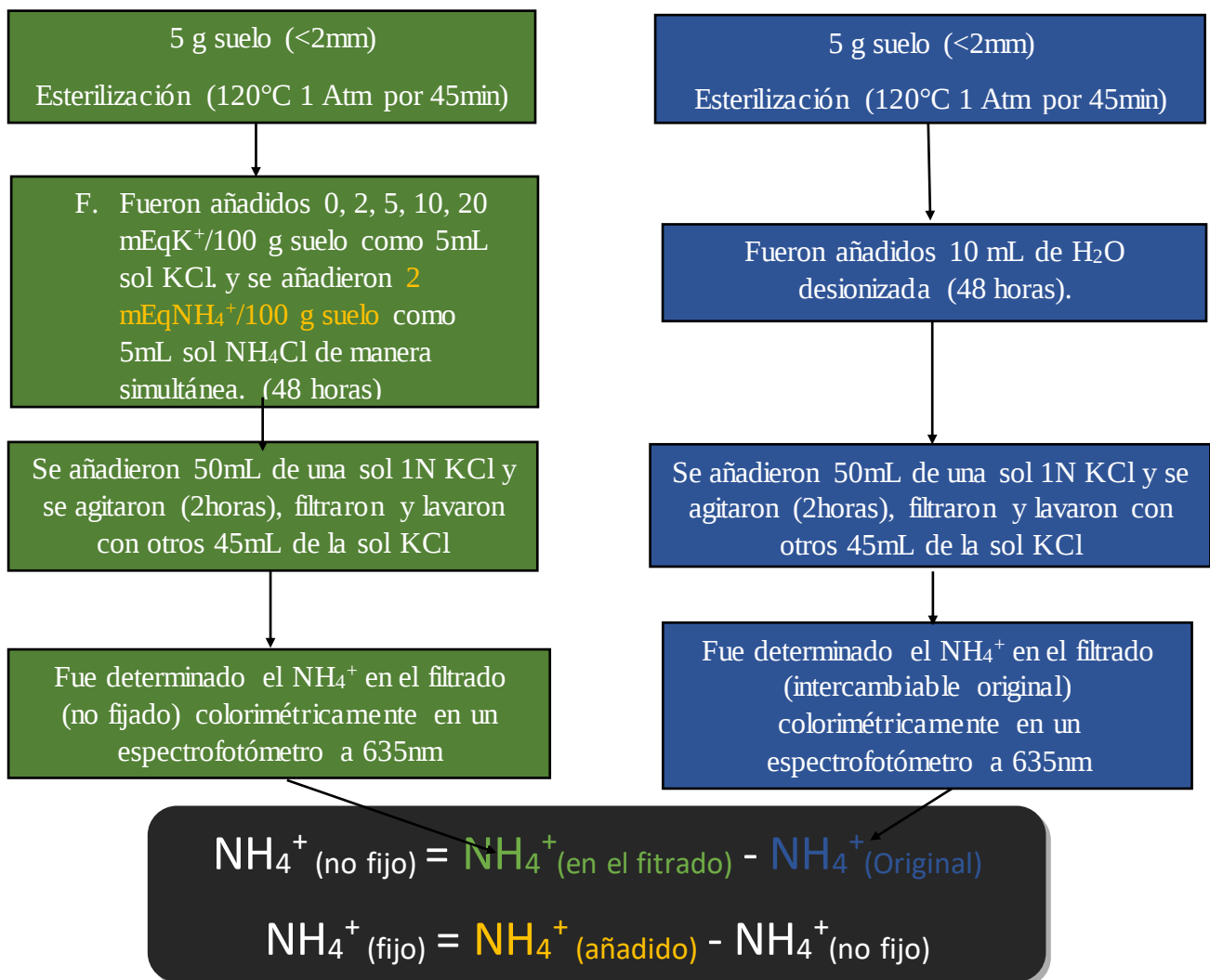


Figura 28. Diseño experimental planteado para el estudio del efecto de adiciones simultaneas de potasio y amonio en la fijación de este último. Las mediciones fueron realizadas por triplicado. Tomado y modificado de Ajazi et al, 2013.

6.2.6 Determinación de potasio y amonio intercambiable (original)

Tanto el potasio como amonio intercambiable en el suelo fue determinado siguiendo la metodología correspondiente al estudio de la competencia iónica, esto fue realizado añadiendo en los periodos de incubación agua desionizada en las fiolas en vez de las pertinentes sales potásicas y amoniacaes en las fiolas previamente referidas como H₂O. La extracción de los iones de potasio y amonio fueron realizadas de la misma manera descrita anteriormente con los métodos de Acetato de amonio 1M pH=7 planteado por Pansu y Gautheyrou, (2006) para el potasio y el método de extracción con KCl planteado por Ajazi et al, (2013) respectivamente. Estas determinaciones fueron realizadas tanto en los experimentos de adiciones 2 días previos como simultaneas dando un total de 6 resultados para cada uno.

6.2.7 Determinación de la capacidad de fijación de potasio y amonio artificial en el suelo.

La capacidad de fijación de ambos iones recientemente añadidos fue determinada intrínsecamente en las incubaciones desarrolladas, específicamente en los ensayos de adición de 0mEqNH₄⁺/100g de suelo para el potasio en ambos tiempos de adiciones, debido a que el potasio agregado en forma de 2mEq/100g de suelo no presentó competencia alguna por la ausencia del ion competente (NH₄⁺). El mismo caso ocurrió en los ensayos de adiciones tanto previas como simultaneas de 0mEq de K⁺/100g suelo y 2mEq de NH₄⁺/100g suelo, pudiendo hallar la capacidad de fijación de este último debido a la ausencia de en este caso potasio en ambos ensayos. De igual manera fueron obtenidas 6 resultados correspondiente a los triplicados de los 2 ensayos de cada capacidad de fijación determinada.

Tratamiento de datos

Todas las mediciones en los experimentos de este trabajo fueron realizados por triplicado de manera de evaluar la precisión de las técnicas y métodos implementados. Los valores fueron reportados como la media aritmética de los triplicados seguidos del error estándar calculado para cada uno.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Caracterización textural del suelo por el Método de Bouyoucos

El suelo estudiado es clasificado según la taxonomía (USA Taxonomy Soil) como un Inceptisol debido a su baja evolución y desarrollo incipiente de horizontes observados en campo, lo cual resulta normal al ser este uno de los tipos de suelos más comunes a lo largo del territorio nacional venezolano. Para la clasificación textural de los dos espesores del suelo estudiado fue necesaria la determinación de los porcentajes de arena, limo y arcilla; lo cual fue realizado mediante el método de Bouyoucos encontrando los siguientes resultados:

La textura del suelo en ambos espesores estudiados presentaron una distribución de tamaño de granos muy similar (figura 29), esto puede deberse a la poca evolución del mismo anteriormente mencionada, generando una homogenización textural a lo largo de este por la baja diferenciación sufrida. Así mismo ambos espesores presentaron un predominio de la fracción de arcilla ($<2\mu\text{m}$) en ambos casos con más del 40% del suelo, seguidos de limo aproximadamente de 39% y por último un bajo porcentaje de arenas menor al 20% (Tabla 4), debido a este predominio de arcillas ambos espesores fueron clasificados en arcillosos según el triángulo de textura (figura 29).

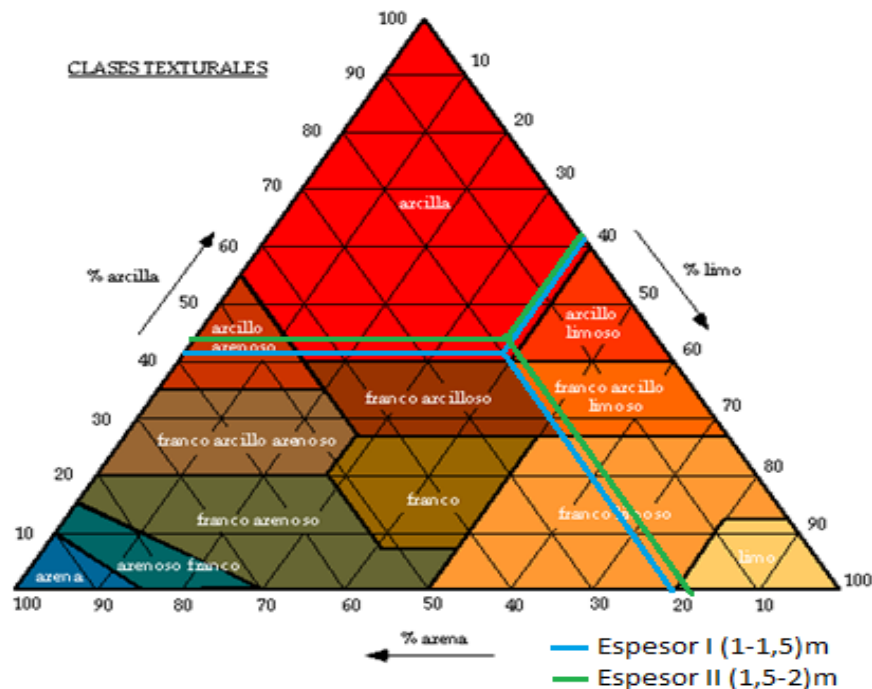


Figura 29. Triángulo de textura, clasificación textural de los espesores I y II.

Tabla 4. Distribución de las fracciones de los espesores del suelo expresados en porcentaje para la clasificación textural.

Espesor	Profundidad	% Arena	% Limo	% Arcilla	Clasificación Textural
I	1-1,5m	20,0% ± 0,0	38,7% ± 0,0	41,3% ± 0,0	Arcilloso
II	1,5-2m	19,0% ± 0,7	39,1% ± 0,7	41,9% ± 0,0	Arcilloso

El método de Bouyoucos implementado para esta determinación resultó presentar una buena precisión en los resultados obtenidos a partir de este en ambos espesores estudiados, esto puede deberse a las pertinentes correcciones de temperatura efectuadas para las mediciones del hidrómetro a la hora de la realización del cálculo de cada porcentaje.

7.2 Clasificación mineralógica del suelo por Difracción de rayos X

El método del polvo permitió determinar los principales minerales presentes en el suelo a los dos espesores estudiados y por medio del método desarrollado Pozas et al, (1971) se semi-cuantificaron estos a partir de los picos obtenidos y las reflectancias de cada uno.

El espesor I, correspondiente a una profundidad de 1-1,5m indicó la presencia de cuarzo, albita, nontronita y caolinita (Tabla 5), respaldando de esta manera el trabajo de López y Guevara (2012) por la existencia de una arcilla 2:1 específicamente del grupo de las esmectitas. La presencia de esta arcilla puede deberse a la poca evolución presentada por el suelo, en la cual la meteorización no ha alterado por completo la estructura de la nontronita evitando la desalcalinización de la misma para provocar una subsecuente formación de caolinita, sin embargo la presencia de esta última resulta ser evidencia de que con el tiempo, al avanzar el frente de meteorización ocurrirá un aumento en las proporciones de esta arcilla 1:1 en el suelo con relación a la 2:1.

Tabla 5 Lista de minerales y características encontrados a partir de la difracción de rayos X para el espesor I.

Visible	Ref. Código	Score	Nombre	Desplazamiento [°2Th.]	Factor de escala	Formula Química
*	01-083-0539	46	Cuarzo	0,000	0,470	Si O ₂
*	01-076-0898	26	Albita	0,000	0,125	Na (Al Si ₃ O ₈)

*	00-002-0017	18 Nontronita	0,000	0,097	$\text{Na}_{0.33} \text{Fe}_{2+3} (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot x \text{H}_2\text{O}$
*	00-001-0527	24 Caolinita	0,000	0,094	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$

Como era de esperarse, debido a su elevada reflectancia (6) el pico más intenso presentado fue el de cuarzo a una posición de aproximadamente 26,5 (2°Teta) abarcando 733 cuentas, así mismo el pico de la albita presentó una importante intensidad (202 cuentas), a diferencia del generado por las arcillas (figura 30), esto puede deberse a la baja reflectancia que ambas presentan en relación al cuarzo y albita respectivamente. Así es que, a grandes rasgos la intensidad de los picos correspondió a la generada por los respectivos poderes reflectantes, siendo 6, 2, 2 y 1 para cuarzo, albita, montmorillonita (nontronita) y caolinita respectivamente.

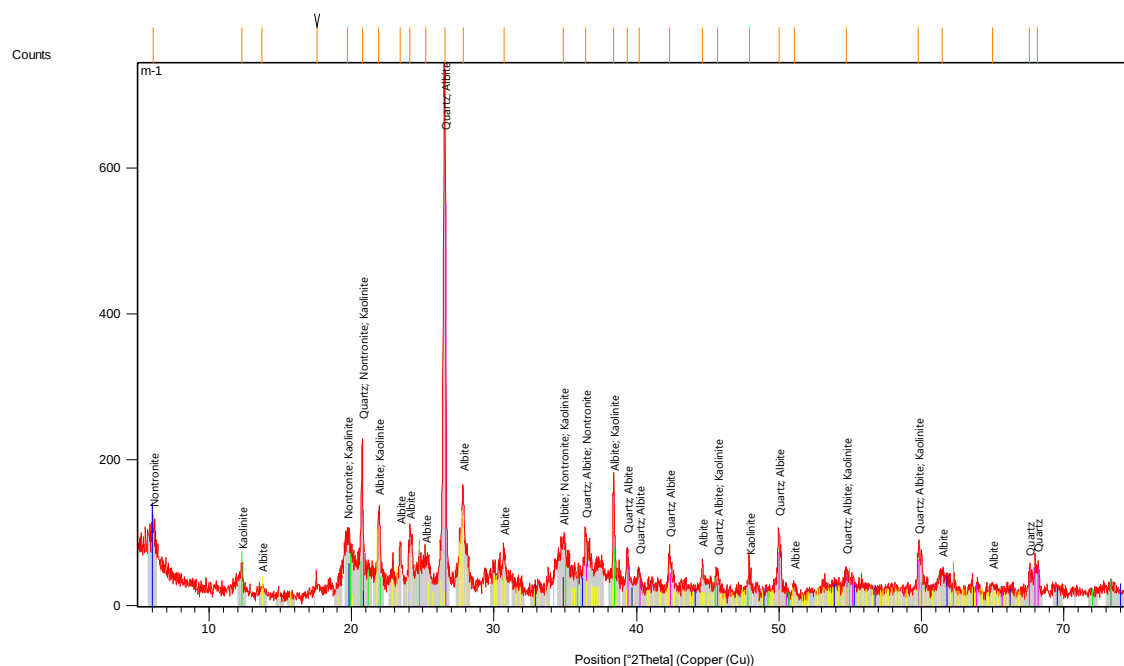


Figura 30. Gráfico generado por la difracción de rayos X al espesor I del suelo.

Por otro lado, el espesor II (1,5-2m) presentó a grandes rasgos el predominio de prácticamente los mismos minerales encontrados en el espesor I (tabla 6). Nuevamente siendo esta similitud mineralógica en profundidad (horizontal) evidencia de la incipiente alteración y por consecuente diferenciación que ha sufrido el suelo estudiado.

Tabla 6. Lista de minerales y características encontrados a partir de la difracción de rayos X para el espesor II.

Visible	Ref. Código	Score	Nombre	Desplazami ento [°2Th.]	Factor de escala	Formula Química
*	01-083-0539	66	Cuarzo	0,000	0,874	Si O ₂
*	01-076-0898	26	Albita	0,000	0,142	Na (Al Si ₃ O ₈)
*	00-003-0015	31	Montmorillo nita (bentonita)	0,000	0,094	(Na , Ca)0.3 (Al , Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (O H) ₂ !x H ₂ O
*	00-001-0527		Caolinita	0,000	0,091	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄

Por consiguiente, el difractograma generado resultó ser similar al encontrado en el espesor I, nuevamente conservando el orden de intensidad dado por el poder de reflectancia de cada mineral encontrados en los mismos (figura 31). Así mismo estos fueron encontrados en las mismas posiciones al ser estas señales intrínsecas de cada estructura mineralógica. Sin embargo, a pesar de encontrar igualmente la presencia de una arcilla expansiva, en este caso la arcilla 2:1 encontrada fue la montmorillonita a diferencia de la nontronita determinada en el anterior difractograma, esto se debe a la alta similitud de las estructuras de ambas, las cuales se agrupan de hecho dentro de las arcillas 2:1 en el mismo grupo, el de la esmectita, por lo cual presentan señales y posiciones muy similares siendo prácticamente no diferenciables por la difracción de rayos X y a fines de esta investigación igualmente útiles.

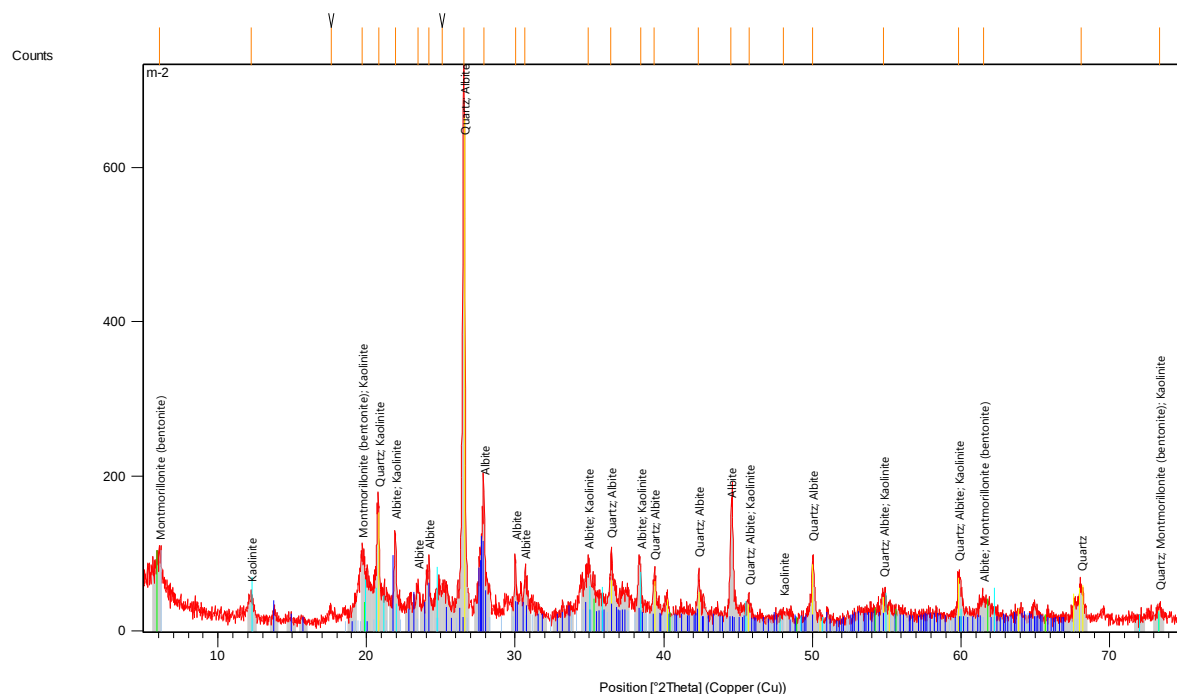


Figura 31. Gráfico generado por la difracción de rayos X al espesor II del suelo.

En la figura 32 se presenta el espectrograma realizado a partir de un patrón correspondiente a la denominada Montmorillonita de Wyoming, el cual resulta ser un depósito natural de esta arcilla expansiva. Se puede apreciar la diferencia con los difractogramas generados a partir del suelo analizado, es evidente el predominio de montmorillonita encontrado en este patrón en relación a las señales de los picos emitidos para el mismo mineral a la misma posición en ambos espesores del suelo estudiado. Así mismo la señal de cuarzo a pesar de este ser 3 veces más reflectante que la montmorillonita presentó un pico menor (menores cuentas) indicando así la supremacía de este mineral expansivo en el patrón analizado.

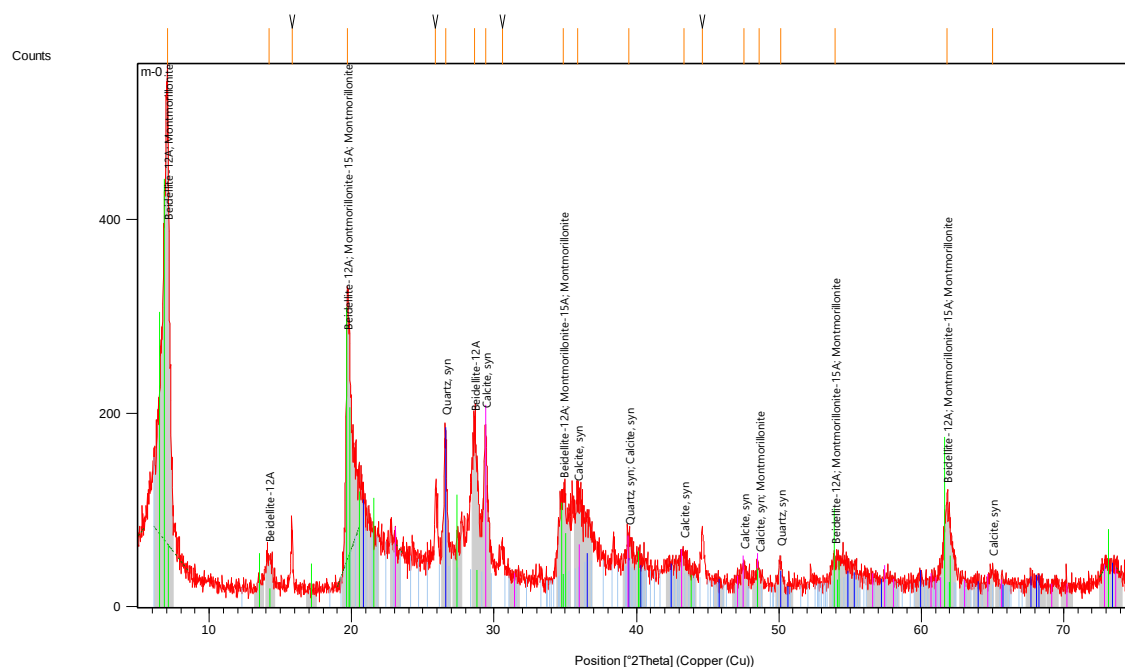


Figura 32. Gráfico generado por la difracción de rayos X a muestra patrón (Montmorillonita de Wyoming).

Ahora bien, siguiendo el método desarrollado por Pozas et al (1971) se realizó la semi-cuantificación de los minerales determinados por la DRX presentes en los espesores del suelo estudiado. Estos resultados son reportados en la tabla 7.

Se pudo determinar un predominio en ambos espesores de cuarzo, esto puede deberse a la alta estabilidad de este mineral a ser alterado, acumulándose así relativamente en relación a la transformación de los minerales sufrida por los menos competentes en el suelo. Sin embargo, a pesar de tener la misma mineralogía se puede observar una diferencia en los porcentajes presentados para cada mineral en ambos espesores a excepción del cuarzo, el cual debido a su elevada resistencia a las alteraciones presentó un porcentaje prácticamente invariable.

Tabla 7 Semi-cuantificación de la distribución de los minerales presentes en ambos espesores del suelo estudiados. Determinado a partir del método de Pozas et al (1971).

Espesor	%Cuarzo	%Albita	%Nontronita/ Montmorillonita	%Caolinita
I	37,2	25,0	20,0	17,8
II	37,5	31,5	16,4	14,6

Como se pudo observar en la tabla 7, la albita fue encontrada en mayor proporción en el espesor más profundo, esto se debe a que el frente de meteorización avanza hacia abajo en el perfil de suelo, por lo cual el espesor más superficial teóricamente habrá sufrido una mayor meteorización al encontrarse más expuesto, generando la transformación de la albita en mayor proporción en relación a la del espesor más profundo (II). Así mismo se pudo observar una disminución de la caolinita con la profundidad, siendo esto también producto de la variación en la intensidad de la meteorización con la profundidad, provocando que en el espesor más superficial se pudiera generar una mayor desalcalinización de los minerales presentes dando como producto final la caolinita debido a su alta estabilidad en dichas condiciones, indicando de esta manera una mayor meteorización sufrida. Por otro lado, el porcentaje de arcilla 2:1 presentada en ambos espesores pareciera aumentar en el espesor I, sin embargo este aumento puede ser relativo debido a la mayor pérdida de albita en el mismo, producto de una mayor alteración anteriormente señalada al éste encontrarse más cerca del ambiente exógeno.

En grandes rasgos, ambos espesores del suelo estudiado presentaron una gran similitud, pudiendo por lo cual realizar el estudio de la competencia en la fijación de potasio y amonio con cualquiera de los dos. Sin embargo fue tomado para dicho análisis el espesor de mayor profundidad (II), debido a que de esta manera nos aseguramos una mínima cantidad de materia orgánica y biomasa microbiana debido a que esta pudiera influir en dicho análisis ya que la primera es capaz de adsorber tanto potasio como amonio a posiciones intercambiables debido a su capacidad de intercambio catiónico, y la segunda debido a que la presencia de microorganismos pueden modificar el amonio añadido en forma de sal generando en ambos casos interferencias en las mediciones.

7.3 Competencia iónica, tiempo de adición y concentración.

A continuación se procederá a desarrollar los resultados obtenidos en los 4 experimentos de incubaciones realizados.

Fijación de potasio con adiciones previas de amonio.

En primera instancia se logró determinar que el suelo estudiado fue capaz de fijar K^+ , esto puede corresponderse con la presencia de arcillas 2:1 del tipo montmorilloníticas determinadas por DRX presentes en el espesor estudiado (1,5-2m). La tendencia obtenida fue de manera general la misma encontrada por Nommik (1957) respaldando de esta manera el equilibrio planteado en su investigación, evidenciado por una pendiente negativa generada producto de que el amonio añadido

2 días previos al potasio ocupó los sitios fijos en los minerales de arcilla dejando así menos disponibilidad para la subsecuente fijación de potasio añadido posteriormente (Figura 33). Por lo cual, la mayor fijación se obtuvo cuando no hubo adiciones previas de amonio ($0\text{mEqNH}_4^+/100\text{g}$) debido a que en este caso no existió competencia alguna por la ausencia de amonio en dichos ensayos (Tabla 8).

La curva generada a partir de este experimento de incubación presentó una caída exponencial en la cual a partir de $5\text{mEqNH}_4^+/100\text{g}$ añadidos, la fijación de potasio fue prácticamente nula cambiando a un comportamiento constante en 5, 10 y 20 mEq NH_4^+ ($0,023\pm0,035$, $0,01\pm0,027$ y $0,045\pm0,01$ $\text{mEqK}^+/100$ fijados respectivamente) (Tabla 8), esto puede deberse que a partir de esas concentraciones de amonio añadidas previas, prácticamente todas las posiciones o los sitios fijos en las arcillas fueron ocupados indicando que a partir de los 5mEq de amonio añadidos los sitios fijos en la montmorillonita fueron saturados, lo cual podría indicar la alta competitividad del amonio sobre el potasio en la fijación en el suelo estudiado.

Tabla 8 Fijación de K^+ , cuando el NH_4^+ fue añadido 2 días previo a la de K^+ . Incubación de 96 h.

NH_4^+ añadido $\text{mEq}/100$ g de suelo	K^+ añadido $\text{mEq}/100$ g de suelo	K^+ Fijado $\text{mEq}/100$ g de suelo
0	2	$1,16 \pm 0,02$
2	2	$0,15 \pm 0,09$
5	2	$0,023 \pm 0,035$
10	2	$0,01 \pm 0,027$
20	2	$0,045 \pm 0,01$

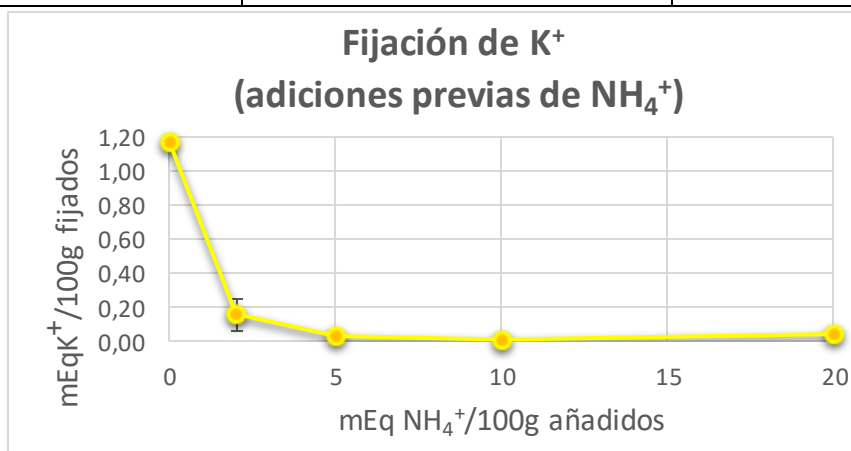


Figura 33. Efecto de la adición previa de NH_4^+ en la fijación de K^+ . Fueron añadidos $2\text{mEq K}^+/100\text{g}$ suelo dos días después de la adición de NH_4^+ .

Fijación de potasio con adiciones simultaneas de amonio.

El comportamiento presentado cuando ambas sales tanto potásicas como de amonio fueron añadidas de manera simultánea fue similar más no igual a la presentada con adiciones previas. Esto concuerda con lo reportado por Ajazi et al (2013). De igual manera, en estas adiciones simultaneas conforme aumentó la concentración de amonio añadida, la fijación de potasio disminuyó de manera significativa (Figura 34). Sin embargo, en este caso aún con adiciones de 5mEq/100 de amonio el suelo logro fijar potasio, manteniéndose de igual manera constante a partir de los 10mEq de amonio añadidos pero dando en este caso una capacidad mínima de fijación entorno a los 0,11mEq de K^+ (tabla 9).

Tabla 9. Fijación de K^+ , cuando el K^+ y NH_4^+ fueron añadidos simultáneamente (incubación 48 horas).

Simultanea		
NH_4^+ añadido mEq/100 g de suelo	K^+ añadido mEq/100 g de suelo	K^+ Fijado mEq/100 g de suelo
0	2	1,09 ± 0,06
2	2	0,26 ± 0,03
5	2	0,15 ± 0,02
10	2	0,12 ± 0,08
20	2	0,11 ± 0,07

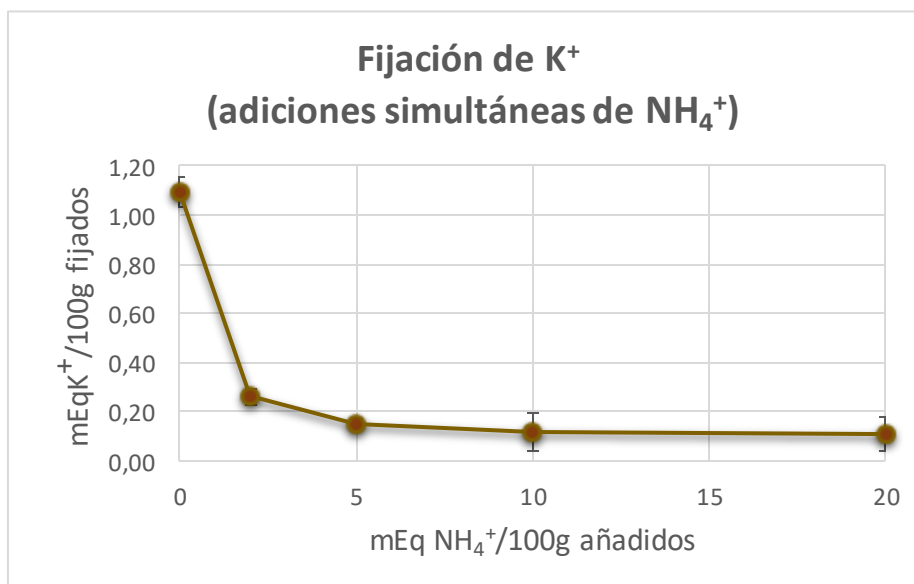


Figura 34. Efecto del NH_4^+ en la fijación de K^+ en adiciones simultaneas.

Al comparar el tiempo de adición de amonio en la fijación de potasio se pudo evidenciar que si bien ambos presentan el mismo comportamiento de pendiente negativa, la disminución con las adiciones previas de amonio resultó ser más abrupta que la obtenida en adiciones simultáneas (Figura 35). Esto puede corresponderse a que al ser añadido el amonio con dos días de antelación, la fijación del mismo al no tener el ion potasio en el ambiente que le hiciera competencia ocurre con mayor eficiencia ocupando más sitios fijos y dejando una menor posibilidad de fijación de potasio, generando esta abrupta disminución. Por otro lado al ser añadidos simultáneamente, se observa que la competencia de estos iones ocurrió en la incubación desde un principio, pudiendo fijarse de esta manera en mayor proporción el potasio. Sin embargo de igual forma la tendencia de ambas curvas podría indicar una leve preferencia de la fijación de amonio de la montmorillonita presente en el suelo estudiado sobre la de potasio.

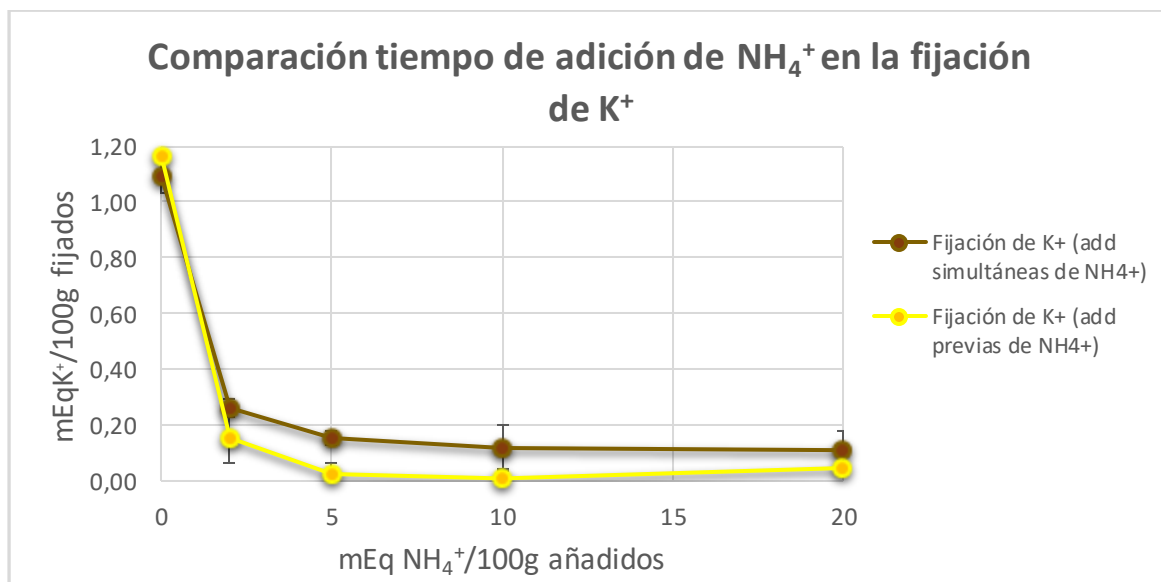


Figura 35. Comparación del tiempo de adición de NH_4^+ en la fijación de K^+ .

Fijación de amonio con adiciones previas de potasio

La adición de potasio dos días previos generó, que la fijación de amonio presentara una curva de comportamiento similar a la obtenida en los experimentos de incubación de fijación de potasio. De nuevo esto es respaldado teóricamente con el equilibrio planteado por Nommik, (1957). La tendencia resultó ser muy similar a la presentada por Ajazi et al (2013) en un experimento análogo,

específicamente para lo que ellos denominaron como perfil I, es posible que la similitud se deba a que en su caso la arcilla de mayor predominancia en el perfil fue la Esmectita, grupo al cual pertenece la arcilla de predominio obtenida en la presente investigación (Montmorillonita), lo cual evidencia una similitud en el proceso de fijación de ambas, generando así un comportamiento y capacidad de fijación similares.

De igual manera la mayor fijación fue obtenida cuando no hubo adiciones previas del ion competitivo. Conforme la concentración de potasio añadida previamente aumentó, la fijación de amonio disminuyó (Figura 36), por otro lado, al igual que en el caso de la fijación de potasio, a partir de 5mEq de potasio añadidos previamente, fue alcanzado un mínimo de fijación manteniendo un comportamiento constante de fijación de amonio entorno a los 0,20 mEqNH₄⁺ fijados (Tabla 10), presentando así, una mayor capacidad mínima de fijación a la encontrada en el experimento análogo para el potasio la cual al añadir los 5mEq de amonio previos se tornó prácticamente nula.

Esta mayor capacidad de fijación obtenida, resulta ser otra evidencia de la preferencia del amonio para ocupar los sitios fijos en la arcillas montmorilloníticas presentes en el suelo estudiado, debido a que incluso en condiciones de saturación de potasio, de existir la presencia de amonio éste será fijado.

Tabla 10 Fijación de NH₄⁺, cuando el K⁺ fue añadido 2 días previo a la adición de NH₄⁺. Incubación de 96 horas.

K ⁺ añadido mEq/100 g de suelo	NH ₄ ⁺ añadido mEq/100 g de suelo	NH ₄ ⁺ Fijado mEq/100 g de suelo
0	2	1,08 ± 0,03
2	2	0,46 ± 0,05
5	2	0,28 ± 0,02
10	2	0,17 ± 0,01
20	2	0,24 ± 0,07

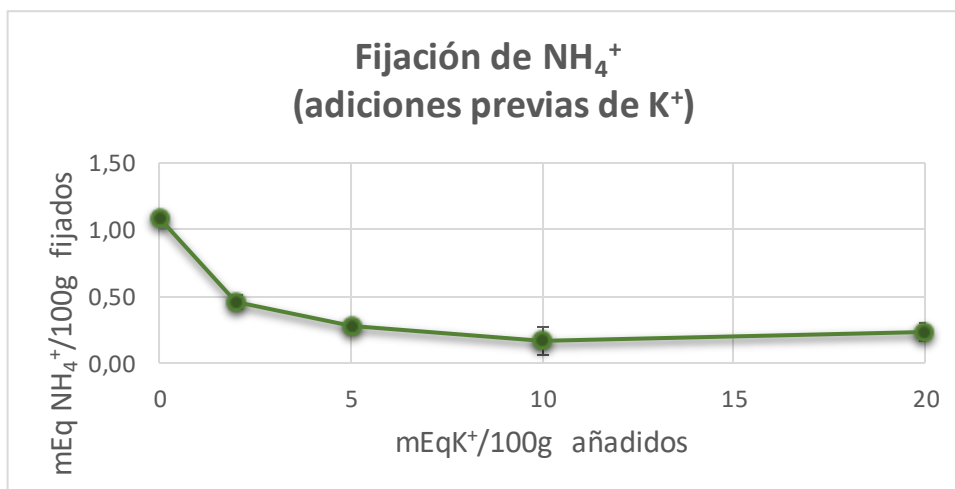


Figura 36. Efecto de la adición previa de K⁺ en la fijación de NH₄⁺. Fueron añadidos 2mEq NH₄⁺/100g suelo dos días después de la adición de K⁺.

Fijación de amonio con adiciones simultaneas de potasio

Otra vez se evidencia que el tiempo de adición resulta ser un factor determinante en la fijación y competencia entre el amonio y el potasio. En este caso la tendencia fue la misma encontrada en las 3 incubaciones previas, demostrando nuevamente la competencia que existe entre ambos iones en ocupar los sitios fijos en las arcillas 2:1 (Figura 37). Si bien la fijación mínima de amonio fue similar a la obtenida con adiciones previas de potasio y partiendo de una fijación máxima también similar, los valores intermedios en este caso fueron mayores que en el otro (Tabla 11), por lo que si se toma un mismo punto intermedio de ambas curvas, como puede ser 2mEq de potasio añadidos la fijación de amonio cuando la adición del mismo fue simultanea resultó ser mucho mayor a la obtenida con adiciones previas ($0,68 \pm 0,02$ y $0,46 \pm 0,05$ mEqNH₄⁺ fijados/100g respectivamente).

Tabla 11. Fijación de NH_4^+ , cuando el NH_4^+ y K^+ fueron añadidos simultáneamente (incubación de 48 horas).

Simultanea		
K^+ añadido mEq/100 g de suelo	NH_4^+ añadido mEq/100 g de suelo	NH_4^+ Fijado mEq/100 g de suelo
0	2	$0,98 \pm 0,04$
2	2	$0,68 \pm 0,02$
5	2	$0,33 \pm 0,07$
10	2	$0,18 \pm 0,08$
20	2	$0,16 \pm 0,10$

Esto puede ser apreciado de manera simple, al observar la disminución de la pendiente en las adiciones simultáneas con respecto a las previas (Figura 38). Esto es debido a que en los dos días previos a la adición única de 2mEq de amonio/100g suelo, el potasio añadido no tuvo ion contra el cual competir, pudiendo este al igual que en el caso análogo de la fijación de potasio, ocupar una gran cantidad de sitios fijos presentes en las arcillas dejando una menor posibilidad de ocupación para el amonio añadido posteriormente, en cambio, al ser añadidos de manera simultánea fue generada una máxima competencia en la cual se ha determinado que el amonio presenta una ventaja o mayor afinidad a ocupar los sitios fijos en la montmorillonita presente en el suelo estudiado.

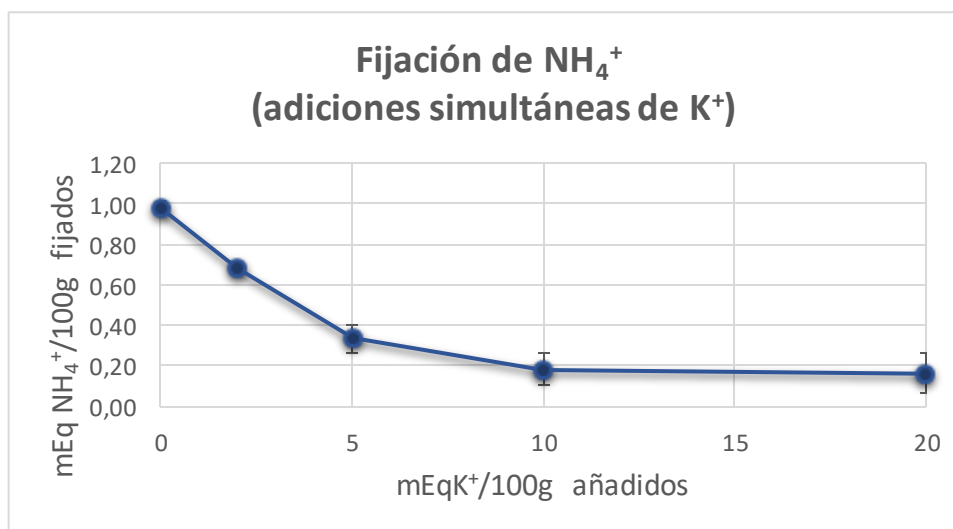


Figura 37. Efecto del K^+ en la fijación de NH_4^+ en adiciones simultáneas.

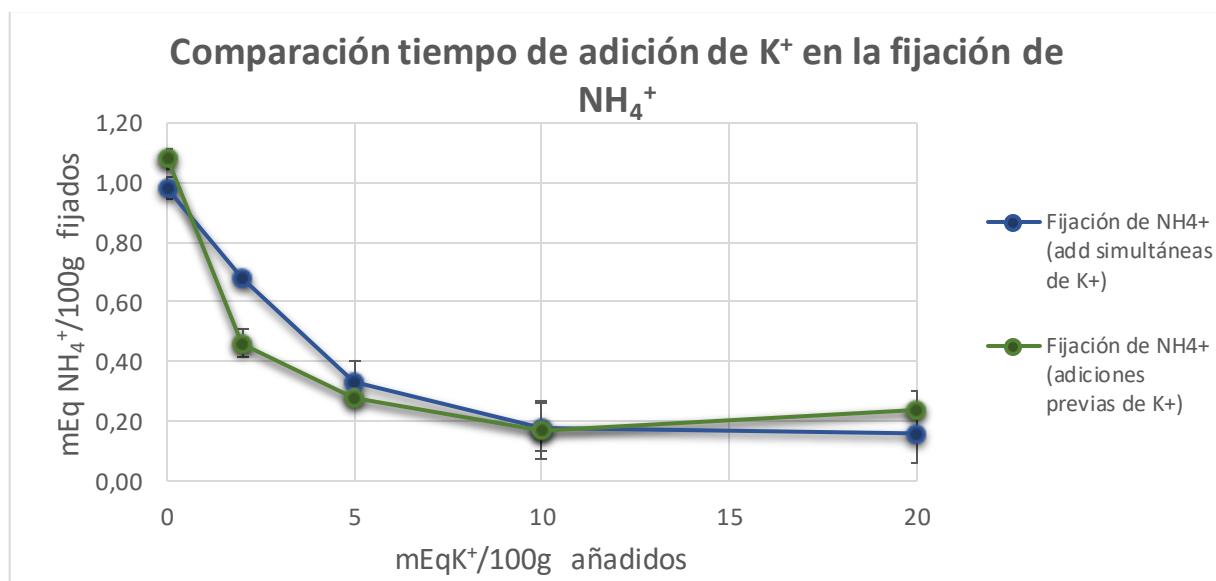


Figura 38. Comparación del tiempo de adición de K⁺ en la fijación de NH₄⁺.

Comparación general de las 4 gráficas generadas a partir de las diferentes incubaciones

A grandes rasgos las cuatro curvas generadas a partir de los experimentos de incubación presentaron una tendencia similar de pendiente negativa obteniendo en todos los casos su máximo a 0mEq de adición del ion contrario y tornándose constante o invariable en relación al alcance de la capacidad mínima de fijación para cada uno de los mismos. Se puede observar que en ambos casos la adición simultánea genera una mayor suavidad en la pendiente de la curva o una caída más moderada (Figura 39). Hinman (1965) reporta que la fijación de amonio disminuye proporcionalmente a la cantidad de potasio añadida, lo cual no solo es corroborado en la presente investigación con estas gráficas sino extrapolado a la fijación de potasio.

Claramente se puede observar la supremacía generada por la fijación de amonio en relación de la de potasio, tanto en adiciones simultáneas como previas (Figura 39). Esto demuestra la preferencia del suelo estudiado y más concretamente la montmorillonita presente en la fijación de iones de amonio sobre potasio de existir la presencia de ambos.

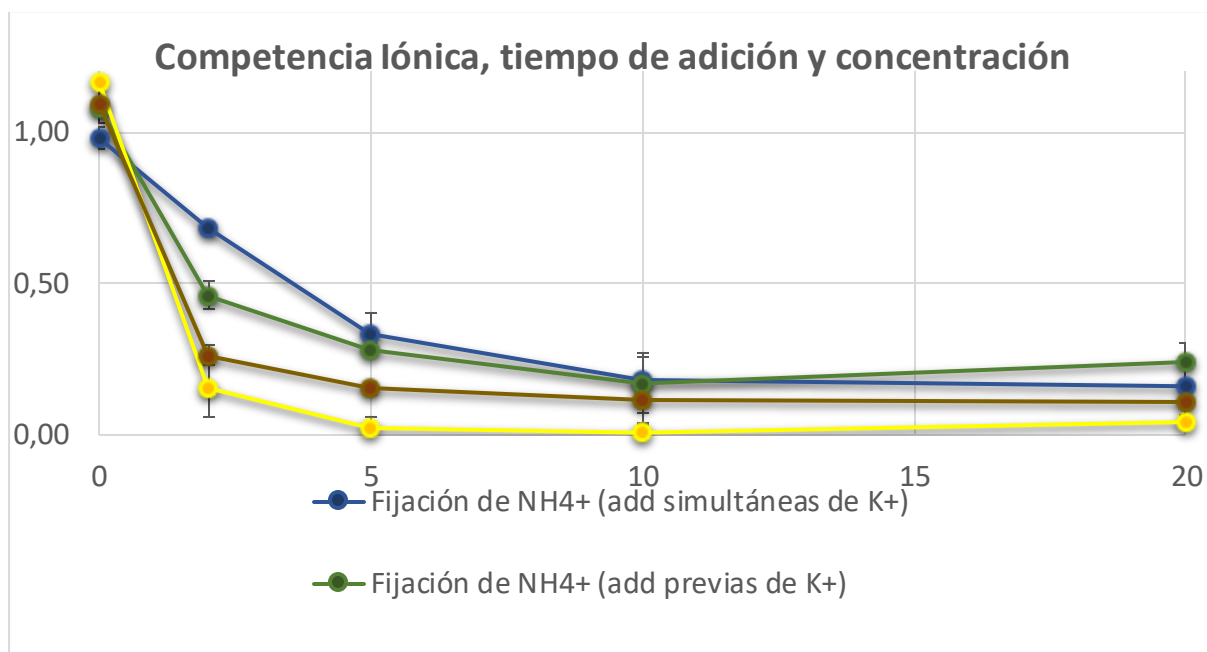


Figura 39. Comparación de los 4 experimentos de competencia de fijación entre el K⁺ y NH₄⁺.

Se puede decir que en ambos casos el tiempo de adición influyó en la fijación de la misma manera pero en diferente proporción, es decir, resultó ser más evidente y significativo para el caso del amonio, el cual al añadirse al mismo tiempo que el potasio y ser más competitivo, logró ocupar de manera más eficiente los sitios fijos a bajas concentraciones de potasio añadidas previamente. Así mismo se puede observar que inclusive en el mejor de los casos para el potasio (adiciones simultáneas) y el peor para el amonio (adiciones previas) la fijación de amonio fue mayor que la de potasio.

7.4 Capacidad de Fijación de potasio y amonio recientemente añadido del suelo.

La capacidad de fijación fue determinada bajo las mismas condiciones que el análisis de la competencia. La capacidad de fijación de potasio se determinó sin amonio en el ambiente con el cual competir, y viceversa, asegurándose de esta manera la disponibilidad de los sitios fijos en las arcillas 2:1 para ser ocupados por los mismos.

En la tabla 12 se puede observar que a pesar de la preferencia en la fijación de amonio sobre la de potasio, la capacidad de fijación de ambos iones fue prácticamente la misma, es posible que esto se deba a que en las condiciones de determinación de ambos, al no haber el ion contrario con el cual competir y ser el mismo suelo, habrán los mismos sitios disponibles para ser ocupados por estos en

cada uno de los casos, generando así que la misma cantidad de potasio y amonio sea necesaria para ocupar los mismos, debido a que al ser la misma concentración de estos, entonces igual cantidad de átomos podrán ser fijados.

Tabla 12. Capacidad de Fijación de potasio y amonio recientemente añadido en el espesor II.

Espesor	Capacidad de Fijación de Potasio mEq K ⁺ /100g suelo	Capacidad de Fijación de Amonio mEq NH ₄ ⁺ /100g suelo
II (1,5-2m)	1,13 ± 0,06	1,04 ± 0,06
%Fijado	56,5 ± 3	52 ± 3

En ambos casos, más de la mitad del ion añadido en forma de sal fue fijado, quedando estos nutrientes protegidos sirviendo como potencial de reserva. Shaimukhametov y Petrofanov, (2008) estudiaron en un experimento similar la capacidad de fijación de potasio de unos suelos en Canadá, añadiendo de 0,1 a 0,5 mEq de potasio/100g de suelo, determinando que la fijación de este mismo rondaba entre los 20 y 60%, dependiendo del suelo estudiado y la cantidad de potasio añadida. Por lo cual las mayores adiciones de potasio efectuados en el presente trabajo (2mEq/100g) para un porcentaje de fijación similar indicarían una alta capacidad fijadora de potasio recientemente añadido en suelo estudiado, lo cual se podría deber a las condiciones de formación del suelo (trópico) y la mineralogía presente en el mismo.

Por otro lado, la capacidad de fijación de amonio determinada en los experimentos aquí reportados, en relación a la presentada por Ajazi et al (2013) indicaron una menor capacidad de fijación de amonio. Esto se debe principalmente a los tipos de arcillas 2:1 presentes en los suelos estudiados y la concentración de estas en el mismo, lo que indica que no todas las arcillas 2:1 presentan la misma fijación y relación de potasio y amonio. Sin embargo el perfil I determinado por ellos, a pesar de tener una mayor capacidad de fijación que el estudiado en este trabajo (1,4 y 1,04 mEq de NH₄⁺/100g de suelo respectivamente), la tendencia generada por la competencia con potasio fue muy similar, pudiendo relacionar esto a la presencia de arcillas 2:1 del mismo grupo (Esmectita) encontrado en ambos, indicando esta tendencia como característica de ese grupo de arcillas.

Por otro lado, los resultados de Nommik (1957) en relación a la capacidad de fijación de amonio bajo las mismas condiciones concordaron con los de Ajazi et al (2013) ($1,39 \text{ mEqNH}_4^+$) abarcando un 69,5% de amonio añadido en formas de 2 mEq fijados. Sin embargo el suelo estudiado en la presente investigación presenta una capacidad de fijación de amonio recientemente añadido la cual entra en el promedio determinado por Axley y Legg (1960), el cual resultó ser de $2,23\text{-}0,93 \text{ mEqNH}_4^+ / 100 \text{ g}$ de suelo fijados.

7.5 Amonio y potasio intercambiable original en el suelo

Los resultados obtenidos para cada ion en su forma intercambiable original del suelo se aprecian en la tabla 13. El suelo estudiado presentó bajas cantidades de amonio intercambiable comparando estas con las encontradas por Blasco y Cornfield (1967) para unos suelos tropicales de Valle de Cauca, Colombia con igualmente presencia de arcillas montmorilloníticas. Este menor valor puede deberse a la profundidad del espesor de suelo estudiado, debido a que bien es sabido que la principal fuente de nitrógeno en el suelo es producto de la fijación biológica realizada por los microorganismos, tomando así el nitrógeno de la atmosfera y pudiendo transformarlo por posteriores procesos a amonio, por lo cual a mayores profundidades en el suelo era de esperarse una menor cantidad de amonio y por consiguiente una menor cantidad de amonio intercambiable.

Tabla 13. Cantidad de amonio y potasio intercambiable en el espesor II del suelo estudiado.

Espesor	NH_4^+ Intercambiable ($\text{mEq NH}_4^+ / 100 \text{ g}$ suelo)	K^+ Intercambiable ($\text{mEq K}^+ / 100 \text{ g}$ suelo)
II	$0,53 \pm 0,1$	$0,075 \pm 0,008$

Por otro lado el potasio intercambiable encontrado en el suelo, al ser comparado con los reportados por una colección de suelos de referencia existente en el Departamento de Suelos del Decanato de Agronomía de la Universidad Centroccidental “Lisandro Alvarado” (UCLA) en el estado Lara, se encuentra un poco inferior a las reportadas para la mayoría de los suelos ($0,1 \text{ mEqK}^+ / 100 \text{ g}$) a una profundidad de entre 70-120 cm (Guedez y Perez de Roberti, 1996), sin embargo esa pequeña diferencia encontrada en el suelo estudiado puede deberse a que el espesor analizado presentaba una mayor profundidad (1,5-2m). El potasio intercambiable al igual que el amonio disminuye en el perfil del suelo conforme aumenta la profundidad, así es que la menor cantidad de potasio intercambiable

en el suelo estudiado en comparación a las reportadas por Guedez y Pérez de Roberti (1996), puede corresponderse a la poca evolución presentada por el mismo, entendiendo que la principal fuente de este elemento en el suelo vendrá dada producto de la meteorización de los minerales presentes en el mismo.

7.6 Implicaciones agronómicas

Ambos iones resultan ser nutrientes indispensables para el crecimiento vegetal, por lo que se puede apreciar la importancia de este tipo de investigaciones y su complemento con la prácticas agrícolas. En el presente trabajo se determinó que tanto el potasio como el amonio en sus formas intercambiables y disponibles para las plantas en el suelo resultaron ser una menor fuente de estos nutrientes, que la potencialmente generada a partir de la capacidad de fijación de ambos iones mediante un adecuado uso de fertilizantes o sales recientemente añadidas (Tabla 14). Es sabido que los iones fijados recientemente a diferencia de los nativos se encuentran 100% disponibles para ser tomados por las plantas, pudiendo generar así un aumento en la producción vegetal y una optimización de las actividades agrícolas.

Tabla 14. Comparación de potenciales fuentes de nutrientes.

Fuentes	K ⁺ (mEq/100g suelo)	NH ₄ ⁺ (mEq/100g suelo)
Capacidad de fijación (Artificial)	1,13 ± 0,06	1,04 ± 0,06
Intercambiable (Original)	0,075 ± 0,008	0,53 ± 0,1

8. CONCLUSIONES

- El suelo estudiado presentó una textura arcillosa en ambos espesores evidenciando la incipiente evolución del mismo, representada en una homogenización textural a lo largo de este.
- En ambos espesores del suelo se determinó la presencia de arcillas 2:1, siendo estas la nontronita (espesor I) y montmorillonita (espesor II) respectivamente. Esta diferencia puede deberse a la semejanza de las difracciones de ambas generadas por sus similares estructuras, siendo difícilmente diferenciables por la DRX.
- Tanto el ion potasio como el ion amonio fueron fijados con éxito en el suelo, siendo esto una evidencia de la mayor presencia de arcillas 2:1 del grupo de la esmectita con respecto a la caolinita en el mismo.
- Las pruebas de incubación demostraron una preferencia en la fijación de amonio sobre la de potasio al ser añadidos ambos artificialmente.
- Para todos los casos estudiados la adición de una sal y la concentración de la misma, condicionó la fijación de la otra hasta alcanzar la capacidad mínima de fijación provocando un comportamiento constante en la curva.
- El tiempo de adición resultó ser una variable importante a la hora de estudiar la fijación. En ambos casos, las adiciones simultáneas favorecieron a la fijación de estos iones sobre las adiciones dos días posteriores a la sal no determinada.
- La capacidad de fijación máxima de potasio y amonio recientemente añadidos para las condiciones estudiadas fueron prácticamente las mismas ($1,13 \pm 0,06$ y $1,04 \pm 0,06$ mEq/100 g suelo respectivamente) abarcando un $56,5 \pm 3$ y $52 \pm 3\%$ de potasio y amonio añadido fijados.
- Debido a la profundidad del espesor estudiado y la incipiente evolución del suelo, el potasio y amonio intercambiables resultaron ser bajos ($0,075 \pm 0,008$ y $0,53 \pm 0,1$ mEq/100 g suelo respectivamente).
- La capacidad de fijación de ambos iones sugirieron ser una potencial fuente y protección de nutrientes con respecto a las cantidades encontradas en formas intercambiables originalmente en el suelo estudiado.

- Estudios de este tipo resultan ser útiles para una adecuada fertilización de los suelos generando una óptima producción agrícola a partir de las necesidades demandas por el mismo.

9. RECOMENDACIONES

- Complementar la difracción de rayos X con otra técnica como la microscopía electrónica de barrido de manera de tener un estudio mineralógico del suelo más completo y una caracterización más certera.
- En los experimentos de incubación a partir de adiciones mayores de 5mEq/100g de suelo se consiguió el equilibrio tornándose invariable, por lo cual sería mejor que las respectivas adiciones crecientes fueran más cercanas y de menor concentración como (0, 1, 2, 5 y 8 mEq/100g suelo).
- Determinar tanto el amonio como el potasio en su forma nativa y relacionarlo así con la capacidad de fijación de cada uno y las condiciones de formación de suelo.
- Realizar el estudio de la competencia sin esterilizaciones previas, determinando la fracción de amonio inmovilizado producto de la actividad microbiana.
- Llevar los resultados obtenidos a la práctica mediante una optimización del uso de fertilizantes en experimentos de invernadero con plantas de rápido crecimiento.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abasiyan, S. M., Towfighi, H. (2018). Kinetics of competitive Fixation of Potassium and Ammonium Ions by Silt Component of Soils from Different Agro Climatic Regions, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(6), 675-688
- Ajazi, A., Miho, L., Bani, A., y Maçi, A. (2013). Effect of potassium on fixation of ammonium by clay minerals in different soil layers. En: *Albanian journal of agricultural sciences*. (4). 675-681.
- Axley, J. H and Legg, J. O (1960). Ammonium fixation in soils and the influence of potassium on nitrogen availability from nitrate and ammonium sources. In: *Soil Science*. 90(3). 151-156.

- Barreto, O. J. (2010) *Caracterización geológica de la cantera Mume ubicada en el municipio Cristóbal Rojas de Los Valles del Tuy, estado Miranda*. (Tesis de pregrado). Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad Central de Venezuela.
- Beauchamp, E. G., Drury, C. F (1991). Ammonium fixation, release, nitrification and immobilization in high and low fixing soils. In: American Society of Agronomy. 55(1). 125-129.
- Besoain, E. (1985). *Mineralogía de arcillas de suelos*. San José, Costa Rica. Ed IICA. 429-443
- Blasco, M. L y Cornfield, A. H. (1967). Effect of soil moisture content during incubation on the nitrogen-mineralizing characteristics of the soils of Columbia (South America). In: *Geoderma*. 1. 19-25.
- Bot, A. y Benites, J. (2005). *The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil sustained food production*. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bouyoucos, G. J (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal abstract*. 54(5). 464-465.
- Chen, C.C., F.T. Turner, y Dixon, J. B. (1989). Ammonium fixation by high-charge smectite in selected Texas Gulf Coast soils. *Soil Science Society of America Journal*, 53(4), 1035-1040
- Chesworth, W. (Ed.). (2007). *Encyclopedia of soil science*. Guelph, Canada: Edited by University of Guelph
- Comerma, J. y Paredes, R (1978). Principales limitaciones y potencial de las tierras en Venezuela. En: *Agronomía tropical*. 28(2). 71-85.
- Conti, M. E. (2004). *Dinámica de la Liberación y Fijación de Potasio en el Suelo*. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. 14 p
- Dana, J. D., Hurlbut, C (1960). *Manual de Mineralogía*. 2º Edición. Barcelona, España. Editorial Reverté, S. A.
- de Melo, W. J., de Melo, G. M., de Melo, V. P. (2018). Nitrogen dynamic in agricultural soils amended with sewage sludge. En *Soil management and climate change* (pp. 189-205). Sao Paulo, Brasil: Editado por Elsevier Inc
- Echarri, L (1998). *Ciencias de la tierra y del medio ambiente*. Editorial Teide. Universidad de Navarra, España.
- Fassbender, H. (1980). *Química de Suelos*. San José, Costa Rica. Editorial IICA
- Feigenbaum, S. A., Hadas, M. S., y Molina, J. A. (1994). Clay-fixed labeled ammonium as a source of available nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 58(3), 980-985

- García, L. A., Quinke, A. (2012). El Potasio (K) en la Producción de Cultivos de Invierno. *Serie Actividad de Difusion*, (677), 9-14
- Glasener, K.M., Waggoner, M.G., Mackown, C.T., y Volk, R.J. (2002). Contributions of shoot and roots nitrogen-15 labeled legume nitrogen source to a sequence of three cereal crop. *Soil Science Society of America Journal*, 66(2), 523-530.
- Grande, S. 1995. *Caracterización geoquímica de las metalavas del Miembro Los Naranjos, Formación Tucutunemo, Aragua central y su interpretación tectónica*. Trabajo de ascenso a la categoría de asistente, Universidad Central de Venezuela, inédito, p 32.
- Grim, R. E. (1953). *Clay mineralogy*. Nueva York, Estados Unidos de América. Editorial McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Grim, R. E. (1962). *Applied Clay Mineralogy*. The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. Washington DC.
- Guedez, J y Pérez de Roberti, R. (1996). Colección de suelos de referencia: Principales suelos de uso agrícola del estado Lara. En: *Bioagro*. 8(6). 77-89.
- Guo, P. C., Bogring, J., Scherer, H. W. (1983) *Verhalten von Dünger-NH₄ in Böden unterschiedlicher tonmineralischer Zusammensetzung im Inkubationsversuch*, (146), 752-757
- Hernández, M. A. (2006). *Estudio geológico y reconocimiento de arcillas expansivas en suelos de una zona al sur de Maracay, Estado Aragua*. (Tesis de pregrado). Ingeniería Geológica, Universidad Central de Venezuela
- Hinman, W. C., (1965). *Ammonium fixation ration to exchangeable K and organic matter in two Saskatchewan soils*. Saskatchewan, Canada. Canada Departament of Agriculture.
- INTAGRI. (2017). Fijación de Potasio en el Suelo. Serie Suelos. *Artículos Técnicos de INTAGRI*. Núm. 31. 3 p. Recuperado de <https://www.intagri.com/articulos/suelos/fijacion-de-potasio-en-el-suelo>.
- Jackson, M. L (1976). *Análisis Químico de suelos*. Editorial Omega. Barcelona, España.
- Kudryakov, V. N (1981). Mobility of fixed ammonium in soil. In: *Ecological Bulletins*. (33).
- Lelong, F., Tardy, Y., Grandin, G (1976). *Pedogenesis, Chemical weathering and processes of formation of some supergene ore deposits*. Elsevier scientific publishing company. New York.
- Liu, Y. L., Zhang, B., Li, C. L., Hu, F., y Velde, B. (2008). Longterm fertilization influences on clay mineral composition and ammonium adsorption in rice paddy soils. *Soil Science Society of America Journal*, 72(6), 1580-1590.

- López, C y Guevara, E (2012). *Determinación y evaluación de las arcillas expansivas y dispersivas en tres localidades al norte de Venezuela, estados Anzoátegui, Falcón y Miranda*. (Tesis de pregrado). Ingeniería Geológica. Universidad Central de Venezuela.
- López-Hernández, D., e Infante, C. (2017). *Fijación de amonio en el perfil de un molisol cultivado con caña de azúcar*. Artículo entregado para publicación.
- Loughran, F.C (1969). Chemical weathering of the silicate minerals. American Elsevier. New York.
- Markov, S. A. (2012). Nitrogen Cycle. En: Spradley, J. Elliott, D.K., Dutch, S.I., Boorstein, M. (Eds.), *Earth Science. Water & Atmosphere, Ipswich*, pp. 347–350
- Marschner, H. (1995). Mineral Nutrition of higher plants. En: *Academic press Inc.* 15(4). 337-347.
- McDonald, L. M., Evangelou, V. P., Chappell, M. A. (2005). *Cation Exchange*. Virginia, Estados Unidos. Editorial Elsevier Ltd
- McKean. S. J. (1993) *Manual de análisis de suelos y tejido vegetal*. Centro internacional de agricultura vegetal CIAT,.pp 63 y 64
- McLaren, R. G y Cameron, K. C (1996). Soil Science sustainable production and environmental protection. *Melbourne. Oxford University press*, 2(4), 286-293.
- Mengel, K., Hutsch B., Kane, Y (2006). Nitrogen Fertilizer application rates on cereal crops according to available mineral and organic soil nitrogen. In: *European journal of Agronomy*. (24). 343-348.
- Mohammed, I. C. H. (1979). Fixed ammonium in Lybian soils and its availability to barley seedlings. In: *Plant Soil*. 53. 185-196.
- Moore, D. M and Reynolds, R. C (1989). *X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. 2 edition. Oxford University Press. Oxford, England.
- Nommik, H. (1957). Fixation and defixation of ammonium in soils. *Acta Agriculturae Scandinavica*, (7), 395-436
- Nommik, H. (1965). Ammonium fixation and other reactions involving a nonenzymatic immobilization of mineral nitrogen in soil. In: Bartholomew, W. V., Clark, F. E.(Ed). *Soil Nitrogen Agronomy*, (10), 198-258
- Nommik, H., Vahtras, K. (1982) Retention and fixation of ammonium and ammonia in soils. In: Stevenson, F. J., (Ed.) *Nitrogen in agricultural soils. Agronomy*, (22), 123–171.
- Nortcliff, S. (1984). *Down to earth, an introduction to soils*. Leicester, England: Printed by the Boyle Litho, Leicester

- Osborne, G.L. (1976). The significance of intercalary ammonium in representative surface and subsoils from southern New South Wales. *Australian journal of soil research*. 14(3). 381-388
- Pansu, M., Gautheyrou, J. (2006). *Handbook of Soil Analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods*. Paris, Francia. Editorial Springer.
- Picard, X., Pimentel, N (1968). Geología de la Cuenca de Santa Lucía-Ocumare del tuy. *Boletín de Geología*. (19).
- Porta, J., López, M. y Roquero, C. (1994). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid, España. Editorial Mundi-Prensa
- Pozas, J. M., Galán, E. y Vivaldi, J. L (1971). Il giacimento di Caolino di Jove Lugo- Spagna. *A.I.P.E.A- 1 Congresso Nazionale*. 89-107.
- Prieto, N. y López-Hernández, D. (1984). Estudios Físicos y Químicos de suelos de la región del estero de Camaguan (Edo. Guárico). *Boletín Sociedad Venezolana de Ciencias Naturales*, vol (142), 216-225
- Railsback's, L. B. (2006). *Some fundamentals of mineralogy and Geochemistry*. Athens, Georgia: Departamento de Geología, Universidad de Georgia.
- Rey, J. C (2015). Limitaciones y potencialidades de los suelos de Venezuela. Información y documentación Agrícola. 61-66.
- Román, P., Martínez, M. M. (2013). *Manual de compostaje del agricultor*. Santiago de Chile, Chile: Editado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
- Scherer, H. W., Feils, E., y Beuters, P. (2014). Ammonium fixation and release by clay minerals as influenced by potassium. *Plant Soil Environment*, 60(7), 325-331.
- Scherer, H. W., Mengel, K (1986). Importance of soil type on the release of nonexchangeable ammonium and availability of fertilizer NH_4^+ and fertilizer NO_3^- . In: *Fertilizer research*. 8(3). 249-258.
- Schmidt, E. I. (1982). Nitrification in soil. En: *Soil Science Society of America Journal*, 7(22) Páginas
- Shaimukhametov, M. Sh y Petrofanov, V. L (2008). Effect of long-term fertilization on the K-fixing capacity of soils. In: *Agricultural Chemistry and soil fertility*. 41(4). 441-451.
- Simonson, R. W. (1959). Outline of a generalized theory of soil genesis. *Soil Science Society of America journal*. 23(2), 152-156.
- Sparks, D.L y Huang, P.M. (1985). Physical chemistry of soil potassium. In: R.D. Munson (ed.) *Potassium in Agriculture*, pp. 201-276. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.

- Stevenson, F. (1994). Native fixed ammonium and chemical reactions of organic matter with ammonia and nitrate. In: *Humic Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*, (2), 96–112.
- Tarbuck, E. J. y Lutgens, F. K. (2005). Meteorización y suelo. En *Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física*. (pp. 175-199). Nueva York, Estados Unidos de América: Pearson Education.
- Universidad de Granada, (2004). *Introducción a la edafología*. Disponible (on-line) en: www.edafologia.ugr.es.
- Velde, B. y Meunier, A. (2008). *The origin of clay minerals in soils and weathered rocks*. Paris, Francia: Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Vitousek, P. M., Menge, D. N. L., Reed, S. C, y Cleveland, C. C. (2013). Biological nitrogen fixation: rates, patterns and ecological controls in terrestrial ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological sciences*, 368(1621), 1-9
- Wang, L. and Øien, A. (1986). Determination of Kjendahl nitrogen and exchangeable ammonium in soil by the indophenol method. *Acta Agriculturae Scandinavica*. 36(1). 60-70.
- Williams, L.B., y Ferrel, R. E. (1991). Ammonium substitution in illite during maturation of organic matter. *Clays and Clay Minerals*, 39(4), 400-408.
- Winogradsky, S (1889). Physiological studies on the sulfur bacteria. Milestones in Microbiology.
- Zahran, H. H. (1999). Rhizobium-legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in an arid climate. In: *Microbial. Mol. Biol.* 63(4), 968–989
- Zhan, L., Xiaokun, L., Jianwei, L., Zhiwen, L., Tao, R., y Cong, R. (2014). Potassium Fixation and Release Characteristics of Several Normal and K-Exhausted Soils in the Middle and Lower Reaches of the Yangtse River, China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(22), 2921-293.

11. ANEXOS

11.1 Fórmulas utilizadas para evaluar la reproducibilidad de los resultados obtenidos

11.1.1 Media Aritmética

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Tomado del Skoog, (2010).

11.1.2 Desviación Estándar

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Tomado del Skoog, (2010).

11.1.3 Coeficiente de Variación

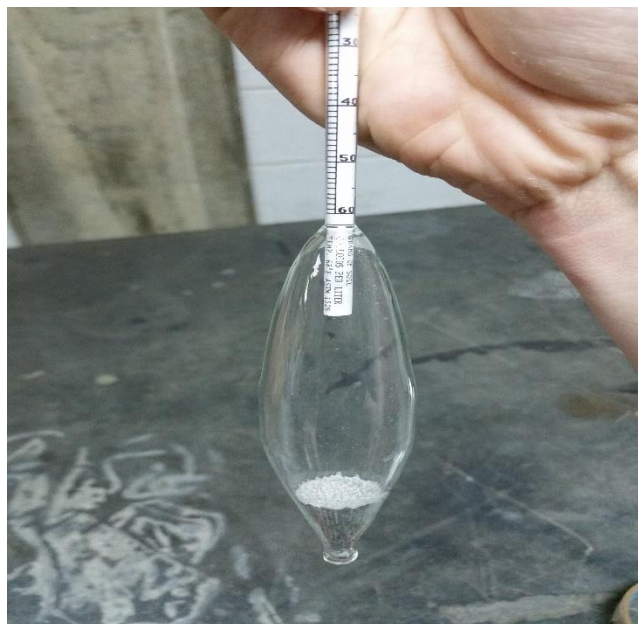
Donde:

$$CV = \frac{S_x}{\bar{X}} \cdot 100 \quad S_x = \text{Desviación Estándar}$$

X = Media aritmética

Tomado del Skoog, (2010).

11.2 Hidrómetro Modelo Bouyoucos H-152 utilizado para la determinación textural.



11.3 Condiciones de medición de la DRX.

Nombre de la data	m-1
Identificación de muestra	TEG SCREMIN
Comentario	Exportado por X'Pert SW Generado por Laboratorio en proyecto Proj
Mediciones Fecha/Hora	18/07/2018 11:04:00 a.m.
Raw Data Origen	PHILIPS-binario (scan) (.RD)
Eje de escaneo	Gonio
Posición Inicial [$^{\circ}$ 2Th.]	5,0100
Posición Final [$^{\circ}$ 2Th.]	74,9900
Step Size [$^{\circ}$ 2Th.]	0,0200
Tiempo de paso de escaneo [s]	0,5000
Tipo de escaneo	Continuo

Offset [°2Th.]	0,0000
Tipo de Divergence Slit	Fixed
Tamaño de Divergence Slit [°]	1,0000
Longitud de la muestra [mm]	10,00
Receiving Slit Size [mm]	0,1000
Temperatura de Medición [°C]	0,00
Material del Ánodo	Cu
K-Alpha1 [Å]	1,54060
K-Alpha2 [Å]	1,54443
K-Beta [Å]	1,39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0,50000
Parámetros del Generador	10 mA, 10 kV
Tipo de Difractometro	PW3710
Número del Difractometro	1
Radio del Goniometro [mm]	173,00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	91,00
Monocromador de haz incidente	No
Spinning	No

11.4 Propiedades de composición del patrón (Montmorillonita de Wyoming).

Visible	Código de Referencia	Score	Nombre	Desplazamiento [°2Th.]	Factor de escala	Formula Química
*	00-043-0688	58	Beidelita-	0,000	0,612	Na _{0.3} Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀

		12A			$(\text{O H})_2 \times 2$ $\text{H}_2 \text{O}$
*	00-029-1498	52 Montmorillo nita-15A	0,000	0,389	$\text{Na}_{0.3} (\text{Al}, \text{Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{O H})_2 \times 4 \text{H}_2 \text{O}$
*	01-083-2465	29 Cuarzo, syn	0,000	0,243	Si O_2
*	01-072-1214	25 Calcita, syn	0,000	0,293	Ca C O_3
*	00-012-0204	49 Montmorillo nita	0,000	0,634	$\text{Na}_x (\text{Al}, \text{Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{O H})_2 \times \text{H}_2 \text{O}$

11.5 Autoclave Mod 415. FANEM. Utilizado para las esterilizaciones



11.6 Muestras (Espesor I y II). Muestras en bolsas plásticas tomadas en campo



11.7 Espectrómetro de Absorción atómica a la llama Mod PekinElmer AAnalyst300.



11.8 Condiciones del Espectrómetro de absorción atómica para la medición de potasio.

Parámetro	Descripción
Corriente de Lámpara	5mA
Combustible	Propano
Soporte	Aire
Llama	Oxidante (Aire-Acetileno)
Longitud de Onda	766,5 nm
Pase de Banda espectral	0,1 nm

11.9 Fijación de Potasio adiciones previas de amonio. Hoja de Cálculo

Muestra	Peso (g)	ppm 5/10	ppm	ppm sin el b	mg K+ Añadido	mg K+ En el filt	mg K+ origin	mg K+ Fijado	mEq Fijado	Prom mEqK	Desv mEq K fijado
H2O 1	10,00		2,93	2,81	7,83		0,28				
H2O 2	10,01		3,10	2,98			0,30				
H2O 3	10,00		2,71	2,59			0,26			0 mEq K+	0 mEq K+
0 mEq NH4 1	10,02	1,82	36,40	36,28		3,63	0,28	4,48	1,14	1,16	0,02
0 mEq NH4 2	10,11	1,73	34,60	34,48		3,45		4,66	1,18		
0 mEq NH4 3	10,03	1,76	35,24	35,12		3,51		4,59	1,17	2mEq K+	2mEq K+
2 mEq NH4 1	10,00	3,84	76,78	76,66		7,67		0,44	0,11	0,15	0,09
2 mEq NH4 2	10,01	3,56	71,18	71,06		7,11		1,00	0,26		
2 mEq NH4 3	10,01	3,89	77,70	77,58		7,76		0,35	0,09	5mEq K+	5mEq K+
5 mEq NH4 1	10,06	4,04	80,88	80,76		8,08		0,03	0,01	0,023	0,035
5 mEq NH4 2	10,02	3,93	78,66	78,54		7,85		0,25	0,06		
5 mEq NH4 3	10,02	4,06	81,20	81,08		8,11		0,00	0,00	10mEq K+	10mEq K+
10 mEq NH4	10,01	4,06	81,20	81,08		8,11		0,00	0,00	0,01	0,027
10 mEq NH4	10,01	4,09	81,80	81,68		8,17		-0,06	-0,02		
10 mEq NH4	10,01	3,99	79,72	79,60		7,96		0,14	0,04	20 mEq K+	20 mEq K+
20 mEq NH4	10,01	3,95	78,90	78,78		7,88		0,23	0,06	0,045	0,01
20 mEq NH4	10,01	3,97	79,46	79,34		7,93		0,17	0,04		
20 mEq NH4	10,02	3,99	79,82	79,70		7,97		0,13	0,03		
Blanco			0,12								

11.9 Fijación de Amonio con adiciones previas de potasio. Hoja de Cálculo

Muestra	Peso	T	Absorb	ppm	mg NH4+ Aña	mg NH4+ Filt	mg NH4+ Orig	mg NH4+ Fija	mEqNH4+	Prom mEqNH4	Desv mEq NH4
H2O 1	5,01	0,88	0,06	4,02	1,80		0,40				
H2O 2	5,01	0,88	0,06	3,96			0,40				
H2O 3	5,02	0,86	0,06	4,34			0,43			0 mEq K+	0 mEq K+
0 mEq K 1	5,00	0,62	0,21	12,20		1,22	0,41	0,99	1,10	1,08	0,03
0 mEq K 2	5,00	0,62	0,21	12,20		1,22		0,99	1,10		
0 mEq K 3	5,02	0,60	0,22	12,70		1,27		0,94	1,04	2mEq K+	2mEq K+
2 mEq K 1	5,03	0,48	0,32	17,91		1,79		0,42	0,46	0,46	0,05
2 mEq K 2	5,00	0,49	0,31	17,58		1,76		0,46	0,50		
2 mEq K 3	5,02	0,47	0,33	18,40		1,84		0,37	0,41	5mEq K+	5mEq K+
5 mEq K 1	5,00	0,45	0,35	19,46		1,95		0,27	0,30	0,28	0,02
5 mEq K 3	5,01	0,45	0,35	19,72		1,97		0,24	0,27	10mEq K+	10mEq K+
10 mEq K 1	5,00	0,43	0,36	20,41		2,04		0,17	0,19	0,17	0,10
10 mEq K 2	5,04	0,41	0,39	21,56		2,16		0,06	0,06		
10 mEq K 3	5,03	0,44	0,35	19,82		1,98		0,23	0,25	20 mEq K+	20 mEq K+
20 mEq K 1	5,00	0,45	0,34	19,30		1,93		0,28	0,31	0,24	0,07
20 mEq K 2	5,01	0,44	0,36	20,19		2,02		0,19	0,21		
20 mEq K 3	5,02	0,43	0,37	20,46		2,05		0,17	0,18		

11.10 Fijación de potasio con adiciones simultaneas de amonio

Muestra	Peso (g)	ppm 5/10	ppm	ppm sin el b	mg K+ Añad	mg K+ En el fil	mg K+ orig	mg K+ Fijado	mEq Fijado	Prom mEqK	Desv mEq K
H2O 1	10,00		3,14	2,81	7,81		0,28				
H2O 2	10,00		3,85	3,53			0,35				
H2O 3	10,02		3,13	2,80			0,28			0 mEq K+	0 mEq K+
0 mEq NH4 1	10,01	1,83	36,50	36,17		3,62	0,30	4,50	1,15	1,09	0,06
0 mEq NH4 2	10,04	1,93	38,50	38,17		3,82		4,30	1,10		
0 mEq NH4 3	10,01	2,06	41,14	40,81		4,08		4,04	1,03	2mEq K+	2mEq K+
2 mEq NH4 1	10,01	3,58	71,54	71,21		7,12		1,00	0,25	0,26	0,03
2 mEq NH4 2	10,04	3,62	72,38	72,05		7,21		0,91	0,23		
2 mEq NH4 3	10,01	3,49	69,86	69,53		6,95		1,16	0,30	5mEq K+	5mEq K+
5 mEq NH4 1	10,01	3,81	76,22	75,89		7,59		0,53	0,13	0,152	0,02
5 mEq NH4 2	10,00	3,73	74,60	74,27		7,43		0,69	0,18		
5 mEq NH4 3	10,05	3,79	75,86	75,53		7,55		0,56	0,14	10mEq K+	10mEq K+
10 mEq NH4	10,02	3,94	78,84	78,51		7,85		0,27	0,07	0,12	0,08
10 mEq NH4	10,02	3,93	78,56	78,23		7,82		0,29	0,08		
10 mEq NH4	10,00	3,67	73,40	73,07		7,31		0,81	0,21	20 mEq K+	20 mEq K+
20 mEq NH4	10,00	3,90	78,08	77,75		7,78		0,34	0,09	0,11	0,07
20 mEq NH4	10,03	3,98	79,56	79,23		7,92		0,19	0,05		
20 mEq NH4	10,00	3,71	74,16	73,83		7,38		0,73	0,19		
Blanco			0,327								

11.11 Fijación de amonio con adiciones de potasio simultaneas

Muestra	Peso	T	Absorba	ppm	mg NH4+ Añad	mg NH4+ Fil	mg NH4+ Orig	mg NH4+ Fijad	mEqNH4+	Prom mEqNH4	Desv mEq NH4
H2O 1	5,01	0,75	0,12	6,05	1,81		0,60				
H2O 2	5,02	0,76	0,12	5,51			0,55				
H2O 3	5,01	0,69	0,16	8,56			0,86			0 mEq K+	0 mEq K+
0 mEq K 1	5,00	0,54	0,27	15,79		1,58	0,67	0,91	1,00	0,98	0,04
0 mEq K 2	5,01	0,53	0,28	16,22		1,62		0,86	0,95		
2 mEq K 4	5,00	0,48	0,32	18,82		1,88		0,60	0,67	2mEq K+	2mEq K+
2 mEq K 1										0,68	0,02
2 mEq K 2	5,00	0,49	0,31	18,52		1,85		0,63	0,70		
2 mEq K 3	5,04	0,49	0,31	18,70		1,87		0,62	0,68	5mEq K+	5mEq K+
5 mEq K 1	5,01									0,33	0,07
5 mEq K 2	5,01	0,43	0,37	22,26		2,23		0,26	0,29		
5 mEq K 3	5,02	0,44	0,35	21,40		2,14		0,35	0,38	10mEq K+	10mEq K+
10 mEq K 1	5,02	0,42	0,38	22,95		2,29		0,19	0,21	0,18	0,08
10 mEq K 2	5,01	0,41	0,39	24,01		2,40		0,08	0,09		
10 mEq K 3	5,00	0,42	0,37	22,67		2,27		0,22	0,24	20 mEq K+	20 mEq K+
20 mEq K 1	5,03	0,40	0,40	24,30		2,43		0,06	0,06	0,16	0,10
20 mEq K 2	5,01	0,43	0,37	22,54		2,25		0,23	0,26		
20 mEq K 3	5,02	0,41	0,38	23,37		2,34		0,15	0,16		