



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOCHAR EN SUELOS AGRÍCOLAS BASADO EN LA MIGRACIÓN DE NUTRIENTES**

**Nevis Alejandra Ruiz Márquez**

Universidad Nacional de Colombia

Minas, Departamento de procesos y energía

Medellín, Colombia

16/05/2022



# **EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOCHAR EN SUELOS AGRÍCOLAS BASADO EN LA MIGRACIÓN DE NUTRIENTES**

**Nevis Alejandra Ruiz Márquez**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Química**

Director:

PhD. Farid Chejne Janna

Codirectora:

PhD. Adriana M. Quinchía Figueroa

Asesor:

PhD. Whady F, Flórez

Línea de Investigación:

Modelación, Optimización y Simulación de Procesos Físicoquímicos

Grupo de Investigación:

TAYEA - SITE

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de procesos y energía

Medellín, Colombia

2022



*A mis padres, hermanas y Simón.*

*Mira profundamente en la naturaleza y  
entonces comprenderás todo mejor.*

*Albert Einstein*



## Declaración de obra original


Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Nevis Ruiz 

Nevis Alejandra Ruiz Márquez

Fecha 16/05/2022

## **Agradecimientos**

Adriana M. Quinchía Figueroa por el apoyo en la formulación y realización de pruebas en suelos, por compartir su conocimiento y por su colaboración incondicional en el desarrollo del trabajo.

Farid Chejne Jana por compartir su conocimiento y fomentar la construcción de un modelo matemático que involucre diferentes fenómenos físicos y de transporte.

Whady F. Flórez, por su apoyo en modelamiento matemático.

A la agenda regional del G8 por fomentar el espacio de cooperación entre la universidad Nacional de Colombia sede Medellín, la universidad EIA, la universidad Pontificia Bolivariana, SOBIOTECH, Ruta N y la Gobernación de Antioquia por medio del proyecto con número interno CF12020010 quienes aportaron recursos para la realización del trabajo.

Alliance for Biomass and Sustainability Research –ABISURE-Universidad Nacional de Colombia, código Hermes 53024 por su apoyo en la realización de este estudio.



## Resumen

### **Evaluación del efecto de la aplicación de biochar en suelos agrícolas basado en la migración de nutrientes**

El suelo es un ecosistema complejo que involucra fenómenos químicos, físicos y biológicos que interactúan e influyen entre otros fenómenos en la disponibilidad de nutrientes. Este trabajo evaluó con un modelo matemático, el efecto de aplicación de biochar en suelos. Se involucraron fenómenos de transporte acoplados a un modelo de equilibrio químico, ofreciendo un panorama de la interacción de nutrientes en el suelo, involucrando fases del suelo, efecto de las raíces, reacciones de oxidorreducción, equilibrio, transporte, liberación de nutrientes, efecto del biochar, lixiviación y saturación del suelo; todo lo anterior resuelto por diferencias finitas. Se encontró un ajuste entre el modelo y los resultados reportados en la literatura. El modelo de transporte es acoplado por el método de Godunov a Phreeqc que resuelve el equilibrio químico, el cual fue comparado de forma experimental encontrando que se acopla a la dinámica del suelo después del día 16 con un porcentaje de diferencia de 0.48% para K, 3% para  $\text{NO}^3$ , 0.02% para  $\text{NH}^{4+}$  y 7.2% para P.

Se identificó con la aplicación del biochar, un incremento en el pH de una unidad para suelos arenosos, aumento en la retención de humedad entre 24-29% en todos los suelos y un aumento de la CIC del 4% en suelos orgánicos. Además, se encontró en todos los casos un incremento de más del 2% en el contenido de P,  $\text{NO}^3$ , K, Ca y Mg, por lo que su aplicación en suelos es una alternativa promisoría para el aprovechamiento de residuos agroindustriales y mejoramiento de suelos.

**Palabras clave:** *fenómenos de transporte, interacciones químicas, pirólisis, simulación, mejoramiento de suelos.*

## Abstract

### Evaluation of the effect of the application of biochar in agricultural soils based on the migration of nutrients

The soil is a complex ecosystem that involves chemical, physical, and biological phenomena that interact and influence, among other phenomena, the availability of nutrients. This work evaluated with a mathematical model, the effect of applying biochar in soils. Transport phenomena coupled to a chemical equilibrium model were involved, offering a panorama of the interaction of nutrients in the soil, involving soil phases, root effect, redox reactions, equilibrium, transport, nutrient release, biochar effect, leaching and soil saturation; all the above resolved by finite differences. An adjustment was found between the model and the results reported in the literature. The transport model is coupled by the Godunov method to Phreeqc that resolves the chemical equilibrium, which was compared experimentally, finding that it was coupled to the soil dynamics after day 16 with a difference percentage of 0.48% for K, 3% for  $\text{NO}_3^-$ , 0.02% for  $\text{NH}_4^+$  and 7.2% for P.

With the application of biochar, an increase in the pH of one unit was identified for sandy soils, an increase in moisture retention between 24-29% in all soils and an increase in the CEC of 4% in organic soils. In addition, an increase of more than 2% in the content of P,  $\text{NO}_3^-$ , K, Ca and Mg was found in all cases, so its application in soils is a promising alternative for the use of agro-industrial residues and improvement of soils.

**Keywords:** *transport phenomena, chemical interactions, pyrolysis, simulation, soil improvement.*

# Contenido

<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XV</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas.....</b>	<b>XVI</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Estado del arte.....</b>	<b>5</b>
1.1 El biochar .....	5
1.1.1 Biomasa .....	6
1.1.2 Pirólisis de biomasa.....	7
1.1.3 Aplicación de biochar en suelos.....	8
1.2 El suelo .....	11
1.2.1 Variables del suelo .....	12
1.2.2 Intercambio de nutrientes en el suelo .....	13
1.2.3 Tipos de suelo .....	15
1.2.4 Hidrología del suelo .....	15
1.3 Fenómenos en el suelo .....	18
1.4 Nutrientes y su dinámica en el suelo .....	20
1.4.1 Nitrógeno .....	20
1.4.2 Potasio .....	25
1.4.3 Calcio .....	28
1.4.4 Magnesio .....	30
1.4.5 Fósforo .....	33
1.4.6 Azufre .....	35
<b>2. Caracterización del biochar de cuesco de palma y su aplicación en suelos.....</b>	<b>39</b>
2.1 Análisis microscopía electrónica de barrido (SEM).....	39
2.2 Análisis Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR).....	41
2.2.1 Pruebas BET .....	48
2.2.2 Pruebas de capacidad de intercambio catiónico-CIC.....	49
2.2.3 Pruebas de PH .....	50
2.2.4 Pruebas de retención de humedad .....	52
2.2.5 Prueba de permanencia de nutrientes en el suelo con aplicación de biochar	55
<b>3. Modelo matemático y simulaciones.....</b>	<b>65</b>
3.1 Fases y elementos del modelo .....	67
3.1.1 Definición de las fases y elementos .....	67
3.1.2 Definición de fases .....	69
3.2 Esquema general del modelo .....	70
3.3 Ecuación para la saturación del suelo .....	72

3.3.1 Ecuación para la solución del suelo.....	72
3.3.2 Condición de frontera .....	76
3.4 Ecuación para la concentración de nutrientes.....	78
3.4.1 Ecuación para la fase sólida.....	78
3.4.2 Ecuación para la raíz.....	81
3.4.3 Ecuación y términos de transporte para oxígeno .....	81
3.4.4 Términos de transporte para el hidrógeno .....	83
3.4.5 Ecuación para el biochar .....	84
3.4.6 Ecuación para lixiviado.....	84
3.4.7 Ecuación para el flujo de nutrientes completa .....	85
3.5 Sinopsis del modelo de transporte .....	86
3.6 Definición de términos para el modelo de transporte .....	88
3.7 Modelo de equilibrio químico del suelo .....	92
3.7.1 Método de Godunov .....	92
3.7.2 PHREEQC .....	93
3.7.3 Componentes y reacciones para integrar .....	93
3.8 Verificación del modelo químico planteado .....	97
3.9 Verificación del modelo integrado de transporte y equilibrio químico sin aplicación de biochar.....	100
3.9.1 Respuesta de saturación del suelo.....	100
3.9.2 Respuesta de nutrientes.....	101
3.10 Acople de Modelo de transporte y modelo químico acoplados.....	106
3.10.1 Evaluación de términos fuente .....	107
<b>4. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>113</b>
4.1 Conclusiones .....	113
4.2 Recomendaciones .....	114
<b>5. Referencias .....</b>	<b>115</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1-1:</b> Ciclo biogeoquímico del nitrógeno.....	21
<b>Figura 1-2:</b> Ciclo del potasio en el suelo.....	26
<b>Figura 1-3:</b> Ciclo del calcio en el suelo .....	28
<b>Figura 1-4:</b> Ciclo del magnesio en el suelo .....	31
<b>Figura 1-5:</b> Ciclo del Fósforo en el suelo .....	34
<b>Figura 1-6:</b> Ciclo del Azufre en el suelo .....	36
<b>Figura 2-1</b> Imágenes SEM de biochar a diferentes temperaturas. ....	39
<b>Figura 2-2.</b> Imágenes de FTIR del biochar a diferentes temperaturas y tiempos de residencia.....	42
<b>Figura 2-3.</b> Imágenes FTIR para biochar obtenido a 350°C durante diferentes tiempos de residencia.....	43
<b>Figura 2-4.</b> Imágenes FTIR biochar de 550°C a tiempos de residencia .....	44
<b>Figura 2-5.</b> Imágenes FTIR biochar de 700°C a tiempos de residencia .....	46
<b>Figura 2-6.</b> Aparición de grupos funcionales.....	46
<b>Figura 2-7.</b> Distribución de microporosidad.....	48
<b>Figura 2-8.</b> Resultados de variación en pH con aplicación de biochar. ....	51
<b>Figura 2-9.</b> Esquema pruebas de permeabilidad .....	53
<b>Figura 2-10.</b> Resultados pruebas de permeabilidad con aplicación de biochar en diferentes dosis .....	53
<b>Figura 2-11.</b> Montaje pruebas en suelo con aplicación de biochar.....	55
<b>Figura 2-12:</b> Resultados pruebas de lixiviado para suelo arenoso con aplicación de biochar. ....	60
<b>Figura 2-13:</b> Resultados pruebas lixiviación de suelo orgánico con aplicación de biochar. ....	62
<b>Figura 3-1:</b> Esquema de componentes y su interacción en el suelo .....	66
<b>Figura 3-2:</b> Esquema de componentes y su interacción en el suelo .....	70
<b>Figura 3-3:</b> Esquema general del modelo, con fases y componentes.....	71
<b>Figura 3-4.</b> Esquema interacción de un coloide .....	78
<b>Figura 3-5.</b> Esquema general del modelo .....	87
<b>Figura 3-5</b> Esquema para discretización.....	91
<b>Figura 3-6.</b> Montaje experimental .....	98
<b>Figura 3-7.</b> Gráficas de nutrientes en función del tiempo. ....	100
<b>Figura 3-8.</b> Gráficas de nitrato en función del tiempo.....	102
<b>Figura 3-9.</b> Graficas de fósforo en función del tiempo.....	103
<b>Figura 3-10.</b> Gráficas de potasio en función del tiempo. ....	105

<b>Figura 3-11.</b> Gráficas de nutrientes en función del tiempo para términos fuente. ....	107
▪ <b>Figura 3-12.</b> Comparación entre modelo con biochar y sin biochar. ....	109
▪ <b>Figura 3-13.</b> Comparación entre modelo con biochar y resultados experimentales	111

## Lista de tablas

<b>Tabla 1-1:</b> Tipos de interacción iónica de nutrientes en plantas adaptada de (Sánchez 2007).....	14
<b>Tabla 1-2:</b> Características de diferente tipos de suelo adaptada de (Rucks et al. 2004 y (Casanova 1991) ).....	15
<b>Tabla 1-3:</b> Coeficiente de escorrentía adaptado de (Juncosa 2018).....	17
<b>Tabla 1-4</b> Datos experimentales Infiltración en diferentes tipos de suelo (adaptado(Weber 2014)).....	18
<b>Tabla 1-5:</b> Microorganismos y la fijación de nitrógeno. Adaptado de (Osorio 2014b). ....	25
<b>Tabla 2-1:</b> Resultados pruebas de CIC. Elaboración propia.....	49
<b>Tabla 3-1:</b> Modelos encontrados. Elaboración propia .....	67
<b>Tabla 3-2:</b> Definición de términos de la ecuación .....	74
<b>Tabla 3-3:</b> Datos experimentales Infiltración en diferentes tipos de suelo (Adaptado de (Weber 2014)) .....	76
<b>Tabla 3-4:</b> Definición de términos de la ecuación .....	85
<b>Tabla 3-5:</b> Coeficiente de difusión (Custos 2020).....	88
<b>Tabla 3-6:</b> Constantes potencial Buffer (Custos 2020) .....	88
<b>Tabla 3-7:</b> Velocidad máxima y constante de Michaelis Mentel (Custos 2020).....	89
<b>Tabla 3-8:</b> Valores para apetencia de nutrientes por parte de la planta (Custos, Moyne, and Sterckeman 2020) .....	89
<b>Tabla 3-9:</b> Velocidad máxima y constante de Michaelis Mentel para microorganismos que procesan hidrógeno adaptado de (Constant et al. 2010). ....	90
<b>Tabla 3-10:</b> componentes de la fase sólida agregados en Phreeqc. ....	94
<b>Tabla 3-11:</b> componentes de la fase gaseosa agregados en Phreeqc. ....	95
<b>Tabla 3-12:</b> componentes con reacciones de oxidorreducción agregados en Phreeqc. ....	95
<b>Tabla 3-13:</b> componentes agregados al módulo de equilibrio en Phreeqc.....	96
<b>Tabla 3-14:</b> Ácidos exudados por la raíz, adaptado de (RUBIO 2011) .....	96
<b>Tabla 3-15:</b> componentes agregados al módulo de equilibrio en Phreeqc.....	99

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$A$	Área	$m^2$	$\iint dx dy$
$A_{BET}$	Area interna del sólido	$\frac{m^2}{g}$	ver DIN ISO 9277
$A_g$	Área transversal de la fase gaseosa	$m^2$	Ec. 3.2
$A_s$	Área transversal de la carga a granel	$m^2$	Ec. 3.6
$a$	Coeficiente	1	Tabla 3-1
$S$	Saturación del suelo		
$\phi_i$	Contenido de agua en el suelo		
$\Phi$	Porosidad del suelo		
$D_{eff}(S)$	Difusividad efectiva en función de la saturación del suelo	$\left[\frac{cm^2}{dia}\right]$	(Roose and Fowler 2004)
$K_{eff}(S)$	Conductividad efectiva en función de la saturación del suelo.	$\left[\frac{cm}{dia}\right]$	(Roose and Fowler 2004)
$F_w(S, z, t)$	Termino fuente, termino de absorción de agua que ingresa a la raíz por unidad de volumen del suelo por Ganuchten 1980	$\left[\frac{1}{s}\right]$	(Roose and Fowler 2004) y (Genuchten V M 1980)

### Subíndices

Subíndice	Término
bm	Materia orgánica
DR	Dubinin-Radushkevich



**Subíndice    Término**

---

E	Experimental
---	--------------

**Superíndices****Superíndice    Término**

---

n	Exponente, potencia
---	---------------------

**Abreviaturas****Abreviatura    Término**

---

CIC	Capacidad de intercambio catiónico
-----	------------------------------------

<i>FTIR</i>	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier
-------------	---

<i>SEM</i>	Microscopía electrónica de barrido
------------	------------------------------------



## Introducción

Colombia es un país con gran variedad de cultivos y producción agroindustrial por lo que la economía depende en gran medida del sector primario donde se destaca la producción de café, arroz, aceites, banano, flores y cacao, los cuales representan el 10% del PIB (ANDI 2017), teniendo esto en cuenta se ha considerado la producción de aceite de palma como un proceso productivo de interés debido a que aumentó en 10 mil toneladas mensuales en el año 2019 con respecto a la producción de 2018, de este proceso productivo se tienen alrededor de 300 mil toneladas al año de cuesco de palma como residuo, el cual no se ha incluido en una cadena de valor, por lo que no se garantiza una disposición adecuada del mismo (Valencia and Avella 2019) y (Gomez 2019), con lo cual se pone de manifiesto la necesidad de plantear una para el aprovechamiento de éstos residuos agroindustriales con el propósito de darles un valor agregado y generar beneficio para los palmicultores.

El cuesco de palma puede ser transformado por diferentes procesos termoquímicos para la obtención de productos como el biochar, lo cual presenta una oportunidad para impulsar la economía circular de regiones agroindustriales. En este sentido la aplicación de un biochar que pueda adaptarse a las necesidades de los cultivos y a los requerimientos del suelo por lo que el aprovechamiento de este residuo se perfila como un proyecto de alto impacto en regiones productoras de cultivos extensivos en el país, para esto se debe determinar el proceso de integración de nutrientes al suelo teniendo en cuenta las condiciones del material a incorporar (biochar) así como las interacciones entre el suelo, el biochar y la raíz de las plantas.

El biochar se caracteriza por su alta porosidad, cantidad considerable de grupos funcionales, capacidad de adsorción y retención, entre otras. Este material se ha proyectado en múltiples usos ambientales, uno de ellos es el mejoramiento de las características físicas y químicas del suelo, además, de la adsorción de metales pesados. Con base en estudios experimentales se puede afirmar que el biochar contribuye de forma

positiva en la mejora de la fertilidad del suelo; sin embargo, es difícil predecir el impacto sobre la migración y disponibilidad de nutrientes y el efecto de éste en las plantas.

En la actualidad las enmiendas o fertilizaciones convencionales utilizados en la producción agroindustrial se basan en parámetros y formulaciones que en ocasiones pueden sobreestimar o subestimar diferentes variables que dan una respuesta insuficiente a las necesidades del cultivo. Por lo tanto, ofrecer un mejorador de suelos que permita mantener por más tiempo los nutrientes en el suelo y que tenga, además, un modelo que permita predecir la respuesta de su aplicación ofrecerá al productor una mayor seguridad a la hora de adquirir el producto. El efecto esperado es que pueda suplir las necesidades específicas del suelo y la especie que se desea cultivar por medio de la predicción de mejoras en diferentes parámetros del suelo, a partir del estudio y modelado del efecto de la aplicación de biochar sobre la movilidad de nutrientes y su disponibilidad para las plantas, beneficiando a productores agroindustriales, que podrían determinar la cantidad y tipo de biochar necesario para obtener mejoras en sus cultivos basados en las necesidades de la especie que cultivan y el tipo de suelo.

El modelamiento de la dinámica nutricional en el suelo es un tema poco tratado en la actualidad, debido a que en el suelo se involucran diferentes fenómenos, que se deben tener en cuenta a la hora de plantear un modelo que busque predecir la dinámica de nutrientes, en este hay presencia de fracción mineral, materia orgánica, microorganismos, la raíz de las plantas, los fenómenos de infiltración, las reacciones químicas, la fase líquida, el aire, entre otros; específicamente cuando se habla de la disponibilidad de nutrientes para las plantas, esta depende de la interacción de los diferentes elementos y los fenómenos que se dan entre estos como los fenómenos convectivos, difusivos y las reacciones químicas, la integración de los elementos del suelo y las interacciones del mismo presentan un panorama complejo a la hora de plantear los modelos, por lo que generalmente solo se enfocan en uno de los fenómenos o elementos.

Otro de los puntos que presenta un reto a la hora de modelar la dinámica del suelo es que las características del suelo son variables, por lo que cada tipo de suelo presenta condiciones únicas, por lo tanto se requiere incluir variables que permitan modificar las características del suelo, como: la porosidad, la capacidad de infiltración, tortuosidad, cantidad de fracción mineral y composición inicial, otro de las variables principales a la hora de realizar un modelo sobre la dinámica de los nutrientes es el tipo de cultivo al que

se puede aplicar, por lo tanto adicionar términos específicos a los requerimientos de la planta o el cultivo como es el caso de la impedancia, permitirían un modelo versátil que pueda ser aplicado a diferentes suelos y cultivos.

En Colombia no se han encontrado modelos relacionados con el fenómeno de movimiento de nutrientes considerando la aplicación de materiales como el biochar y las características físicas, químicas y biológicas del suelo, así como sus interacciones. En cuanto a otros países se encontraron a la fecha de elaboración de este trabajo, 17 publicaciones que se enfocan en infiltración, intercambio iónico o migración de nutrientes para el suelo; sin embargo, se enfocan en fenómenos específicos y no involucran un panorama completo de la dinámica del suelo, adicional a esto, no cuentan con un término o modelo que permita identificar el efecto del biochar como sumidero, fuente de nutrientes o como sólido intercambiable que pueda incidir en la dinámica del suelo.

Hasta el momento no se ha evidenciado un mecanismo que permita predecir la dinámica del biochar en el suelo y el efecto sobre la movilidad y disponibilidad de nutrientes en el suelo, involucrando fenómenos de transporte, químicos y microbiológicos por lo que este trabajo busca:

- Evaluar el efecto de la aplicación de biochar generado a partir de la pirólisis lenta del cuesco de palma en el suministro de nutrientes en suelos destinados para actividades agrícolas.
  - Comprender características, propiedades, procesos físicos y químicos relacionados con el intercambio de nutrientes en el suelo debido a la aplicación de biochar.
  - Proponer un modelo predictivo de la dinámica de los nutrientes en suelos agrícolas sometidos a la aplicación de biochar.
  - Evaluar experimentalmente la dinámica de los nutrientes del suelo y cambios en las características de éste con la aplicación de biochar, a través de una prueba a escala de laboratorio.



# 1.Estado del arte

La aplicación del biochar en suelos es una alternativa promisoría para el aprovechamiento de residuos agroindustriales y la remediación de suelos, el cual ha sido estudiado de forma experimental y ha presentado mejora en características físicas y químicas del suelo.

## 1.1 El biochar

El biochar proviene del proceso de la pirólisis de biomasa; el volumen de poros puede variar entre 0.013-0.27 cm<sup>3</sup>/g dependiendo de la temperatura del proceso, además, de tener un contenido considerable de grupos funcionales con cargas reactivas, principalmente carboxílicos y fenólicos. Es importante mencionar que la composición y reactividad del biochar obtenido en un proceso puede variar dependiendo de las condiciones de operación que se utilicen, principalmente se ve afectado por las temperaturas de combustión, el tiempo de residencia del material en combustión, el gas empleado en la cámara de combustión y el tipo de pirólisis que puede ser lenta o rápida (Manya 2012), (Novak and Johnson 2019).

Otro de los parámetros esenciales para determinar las características del biochar es la materia prima utilizada en el proceso de pirólisis, ya que ésta determina también los grupos funcionales y la forma como van a interactuar durante la combustión para alcanzar la composición final del biochar. El biochar se caracteriza por tener un área superficial que varía en función de la temperatura de pirólisis, por ejemplo, se tiene un área superficial de microporos de 685 m<sup>2</sup>/g para biochar producido a 700°C y de 83.1 m<sup>2</sup>/g para biochar producido a 250°C, por otro lado, presenta alto contenido de carbono fijo del 90% de la biomasa inicial, también se identifica contenido de nitrógeno, oxígeno, algunas sales, componentes inorgánicos como calcio, magnesio, potasio, fósforo, cobre, manganeso, zinc, entre otros, posee además una estructura porosa propicia para la generación de carbón activado (Manya 2012), (Novak and Johnson 2019).

El biochar se puede clasificar como un tipo de carbón, con propiedades específicas que permiten que se aplique en suelos y procesos ambientales, su aplicación en suelo puede generar cambios en las propiedades físicas y químicas de los mismos; Lo que puede causar un incremento en la capacidad del suelo para retener nutrientes y agua, lo que en suelos pobres representa una mejora en las condiciones de productividad (Manya 2012).

El biochar contiene cationes poli funcionales que presentan condiciones que interactúan con componentes del suelo, por medio de adsorción química o interacción física; Por otro lado, su estructura porosa mejora la retención del agua en el suelo cuando se produce a alta temperatura, ya que a baja temperatura puede presentar condición hidrofóbica en la superficie limitando la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (Yaman 2004), (Deem and Crow 2017).

Es importante mencionar que estas características dependen principalmente del proceso de transformación utilizado para obtener el biochar, velocidad del proceso, temperatura, materia prima, entre otras. Todas estas condiciones determinan la porosidad, los diferentes grupos funcionales, los protones, la reactividad específica de las especies, el pH y la fuerza de los iones entre otras (Alam and Alessi 2019).

### **1.1.1 Biomasa**

La biomasa es un material orgánico vegetal, está compuesta principalmente por lignina, hemicelulosa y celulosa. La hemicelulosa es una estructura amorfa formada por la unión de diferentes moléculas de azúcar ; por otro lado, la celulosa se caracteriza por tener una estructura mayoritariamente cristalina, conformada por cadenas lineales de  $\beta$  glucosa ordenadas; finalmente, la lignina no presenta una estructura definida, pero se caracteriza por tener grupos fenólicos y alcoholes, además, dependiendo del material de origen se pueden presentar algunos ácidos grasos, grupos fenólicos, iones entre otros (Anal and Alguacil 2013).

La biomasa representa productos provenientes de procesos fotosintéticos con la capacidad de ser transformados en combustible, por lo que representa un material bioenergético; una de las fuentes de biomasa son los residuos obtenidos a partir de los procesos agroindustriales, los cuales contienen una fracción biodegradable de residuos y desechos orgánicos; a la hora de seleccionar un tipo de biomasa para realizar procesos



---

de pirólisis es importante considerar su composición inicial y su cantidad de humedad, pues estos son parámetros importantes a la hora de elegir los procesos de transformación adecuados entre los que se encuentran la transformación termoquímica y bioquímica (Anal and Alguacil 2013), los productos principales que se pueden obtener a partir de procesos de transformación de biomasa son biodiesel, etanol, hidrocarburos, gas de síntesis, biogás, entre otros, los cuales pueden ser procesados para obtener biocombustibles, bioelectricidad y biocalfacción, dentro de los procesos termoquímicos de transformación de biomasa se pueden encontrar combustión, pirólisis, gasificación y licuefacción principalmente (EPEC 2019).

### **1.1.2 Pirólisis de biomasa**

La pirólisis es un proceso de degradación o descomposición de componentes orgánicos contenidos en biomasa a alta temperatura y sin presencia de oxígeno, utilizada en la actualidad como método para la producción de energía renovable, es decir, es un método para la producción de biocombustibles y gas de síntesis. Se caracteriza por ser un proceso irreversible, que dependiendo de las condiciones de operación da como productos principales aceite, gases volátiles y biochar como residuo sólido con alto contenido de carbón (Yaman 2004). Dependiendo de las condiciones de temperatura, velocidad de calentamiento, presión y tiempo de residencia del proceso de pirólisis se generan cambios en la composición y calidad de los productos (Yaman 2004), (Manya 2012) y (Bridgwater, Meier, and Radlein 1999).

Por lo general la pirólisis de biomasa se realiza a temperaturas que varían entre 350°C y 650°C, la cual se elige dependiendo del producto que se desee obtener, entre los que se encuentran bio-aceites, biogás o biochar y se establecen el tiempo de residencia y las tasas de calentamiento y enfriamiento como factores que van a determinar las características de los productos, la estructura y composición de los productos que se desean obtener (Anal and Alguacil 2013).

En el caso particular de la obtención del biochar, es decir para favorecer la producción de sólido se utiliza generalmente pirólisis lenta, la cual se realiza a temperaturas alrededor de 500°C, con una tasa de calentamiento y tiempo de residencia que puede variar entre horas o días, en este caso el rendimiento del material sólido obtenido varía entre 30% y 40%. En

cuanto a la composición química que tendrá el biochar es importante tener en cuenta el efecto de la temperatura sobre la composición de la biomasa.

Cuando se cuenta con temperaturas por encima de 400°C, se tiene descomposición térmica de la celulosa, inicia de pérdida de polímeros en el cual va pasando por compuestos como: oligosacáridos, monosacáridos, anhidro sacáridos y furanos; para el caso de la hemicelulosa, ésta es descompuesta en un rango de temperatura entre 200°C y 350°C, en el proceso de descomposición se tienen compuestos como xileno, anhídrido, catión xilosa y dianhidro-xiloprinosa, sin embargo, la descomposición de la hemicelulosa puede variar dependiendo de la composición inicial; finalmente en el caso de la lignina se tiene descomposición inicial entre 200°C y 400°C sin embargo, los grupos metoxi aromáticos aumentan su reactividad cerca de los 450°C, en este caso inicialmente se descomponen los grupos aromáticos produciendo guayacoles y siringoles, los cuales con un aumento mayor de la temperatura se transforman en catecoles, pirogales y crisoles (Yaman 2004). Por lo tanto, parámetros como materia prima, temperatura de pirólisis y tasa de calentamiento son esenciales a la hora de establecer las características del biochar obtenido.

### **1.1.3 Aplicación de biochar en suelos**

La aplicación de biochar como enmienda para suelos ha sido una práctica en ascenso en los últimos 20 años, se ha encontrado que puede incrementar el pH del suelo el cual puede pasar de una condición de acidez a un pH por encima de 6 unidades; puede mejorar la retención de nutrientes y aumentar la capacidad de intercambio catiónico, variaciones que están presumiblemente asociadas al biochar obtenido a mayores temperaturas debido a un incremento en el área superficial y en las cargas presentes en la superficie del char. También se ha reportado una mejora en la retención de agua y en la promoción de la captura de carbono y nitrógeno en el suelo, además de reducir la densidad aparente debido al incremento en la porosidad de la fracción sólida del suelo ; puede ayudar en reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, contaminantes y metales pesados, gracias a su CIC y puede promover la conservación ambiental del recurso suelo (Rebolledo, López, and Moreno 2016).

---

En cuanto a los elementos químicos presentes en el biochar, se pueden presentar variaciones en la relación Carbono/ Nitrógeno, sin embargo, no se ha encontrado un efecto en la disponibilidad del N o de otros elementos nutrientes para plantas y especies vivas dentro del suelo. Es importante referir, por otro lado, que el fósforo puede permanecer en el biochar después de ser añadido por lo que puede estar disponible para ser liberado a la solución del suelo y transferirse a la planta después de un proceso de solubilización (Rebolledo, López, and Moreno 2016).

La capacidad de intercambio iónico en el biochar puede aumentar a medida que aumenta su área superficial, la temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia, este aumento se debe principalmente a que el biochar cuenta con grupos carboxílicos situados en grupos aromáticos, que generan puntos de intercambio en la superficie por unidad de carbono. Se debe tener en cuenta que la capacidad de intercambio iónica puede disminuir con la reducción del pH, en la literatura se reporta que si el propósito del biochar es el aumento en la capacidad de intercambio iónica se recomienda una producción a una temperatura entre 450°C – 550°C (Rebolledo, López, and Moreno 2016).

Con relación a las características físicas del suelo, se identificó en la revisión bibliográfica que el biochar afecta la permeabilidad, mejora la retención de agua especialmente en suelos de textura gruesa cuya permeabilidad es alta, lo que puede contribuir en la disminución de la escorrentía, lo que se ve reflejado en una disminución de los costos de riego, además de un aumento de la aireación del suelo facilitando tareas de laboreo, encalado, incorporación de fertilizantes entre otras (Rebolledo, López, and Moreno 2016). En cuanto a la relación con la biota del suelo, el biochar presenta alta resistencia a la descomposición microbiana y biológica por lo que se ha identificado un efecto recalcitrante, sin embargo, esta característica promueve su uso como sumidero de CO<sub>2</sub> aportando a los efectos del cambio climático, además gracias a su alta porosidad podría proporcionar espacio para crecimiento de microorganismos.

Es importante tener en cuenta que actualmente no se ha identificado ningún efecto que beneficie o afecte la diversidad de las especies del suelo, por lo que se debe considerar a la hora de aplicar biochar en suelo las posibles respuestas de la comunidad microbiana. Una inadecuada aplicación puede modificar la disponibilidad de los elementos que constituyen el suelo lo que se traduce en cambios en ciclos de carbono y nitrógeno del suelo (Deem et al. 2017), (Rebolledo, López, and Moreno 2016).

Hay poca información relacionada con mejoras en suelo debido a la aplicación de biochar a largo plazo, sin embargo en diferentes investigaciones se ha reportado una mejora en la capacidad de adsorción y retención de cationes, también se ha determinado que en algunos casos los nutrientes pueden unirse al suelo y estar disponibles para ser absorbidos las plantas (Manya 2012), (Hailegnaw et al. 2019).

Es importante mencionar que estas características dependen principalmente del proceso de transformación utilizado para obtener el biochar, velocidad del proceso, temperatura, materia prima, entre otras. Todas estas condiciones determinan la porosidad, los diferentes grupos funcionales, la reactividad, la concentración de metales, los protones, la reactividad específica de las especies, el pH, la fuerza de los iones, entre otras (Alam and Alessi 2019).

Algunos de los estudios relacionados con el uso de biochar en suelos, mencionan procesos de lixiviación de nutrientes en suelo, además evidencian mejoras en ciclos como el del nitrógeno, lo que da como resultado un mejor rendimiento de los nutrientes en el suelo con respecto al crecimiento de la planta resultados encontrados por medio de estudios cualitativos, por lo que se evidencia la falencia de un modelo que permita una descripción cuantitativa del mecanismo para demostrar el efecto del biochar en el suelo y el crecimiento de la planta (Sohi et al. 2009).

Otro de los estudios relacionados con el uso de biochar en suelos, ha identificado que el uso de biochar en suelos reduce la acidificación del suelo, además permite tratar problemas relacionados con la deficiencia de nutrientes en suelos; se han reportado mejoras en el pH y en la retención de agua y nutrientes lo que representa un incremento en la capacidad productiva del suelo para diferentes cultivos, el efecto que tiene el biochar en el suelo depende del periodo de incubación y la dinámica del suelo, por lo que es posible pensar en un modelo que permita conocer las propiedades del biochar y su estabilidad. Dentro de los efectos de agregar biochar en suelos es la mejora de las propiedades físicas y químicas, lo que se refleja en el crecimiento de los cultivos que tienen aplicación de biochar con los que no comparados con mismos periodos de tiempo (Dai et al. 2017; Leng et al. 2019; Yaman 2004).

Uno de los procesos más relevantes que ocurre con el biochar y el suelo es la adsorción de iones amonio, los cuales se pierden por el proceso de lixiviación, generando eutrofización de aguas subterráneas y superficiales, en el caso de la aplicación de biochar,

---

se puede aumentar la retención de nitrógeno en el suelo para así aumentar el balance global de nitrógeno en procesos agrícolas. Dentro de los parámetros relevantes en este proceso se debe tener en cuenta el área superficial, mineralogía, tipo de arcilla en el suelo, capacidad de intercambio de materia orgánica, textura, condiciones ambientales, porcentaje de liberación de amonio por mineralización de materia orgánica, procesos de estabilización de nutrientes, estructura física del suelo, capacidad de retención de agua y nutrientes, pH entre otras (Sohi et al. 2009).

Otro de los parámetros a tener en cuenta es la proporción en la dosificación del biochar y el requerimiento del cultivo, pues Agengnehu encontró que en lo referente al efecto invernadero, un control con un fertilizante común, una mezcla de biochar y fertilizante, con muestras que tenían solo aplicación de biochar, evidenciaron una mejora en el rendimiento del cultivo que varió entre 10 y 29%, se reporta también el aumento en la planta y la clorofila de la hoja, en cuanto a las propiedades del suelo se presenta un aumento significativo en la retención de agua, otro de los aspectos significativos es el aumento las liberaciones de nitrógeno y fósforo, cabe resaltar que el artículo no presenta un modelo matemático que describa el fenómeno, este se basa en medición de parámetros y evaluación experimental (Agegnehu et al. 2016).

## **1.2 El suelo**

El suelo es la capa de la tierra que se encuentra en la parte superior y se forma a partir de la meteorización de la roca. El suelo está compuesto por diferentes capas, esto se define como perfil del suelo, el cual se caracteriza principalmente por presentar en cada capa, los procesos que han dado origen a la descomposición del material rocoso del cual proviene, sin embargo, debido a diferentes fenómenos su composición puede cambiar; el perfil del suelo presenta por lo general capas de diversos materiales minerales (arenas, limos, arcillas y acumulaciones orgánicas), cada uno de los cuales presenta características físicas y químicas propias que influyen de forma significativa en el crecimiento de las plantas u organismos vivos, debido a la variedad de nutrientes y las características de retención de agua de cada capa de suelo. En la actualidad la disminución de la fertilidad es un problema a nivel global, que se puede atribuir al manejo inadecuado de los suelos por parte del hombre y al efecto colateral del cambio climático que causa condiciones variantes que

erosionan y afectan la estabilidad del suelo así mismo se ven afectadas las características físicas y químicas del suelo (Rebolledo, López, and Moreno 2016).

### 1.2.1 Variables del suelo

Con el propósito de garantizar que el suelo tenga características adecuadas para el crecimiento de las plantas existen diferentes parámetros y variables que tienen en cuenta condiciones físicas y químicas del suelo, las cuales en conjunto determinan la productividad y fertilidad del suelo.

- **Porosidad:** es un parámetro esencial en la dinámica del suelo ya que determina el crecimiento radicular además de la cantidad de agua y aire contenida en el suelo, es determinado por la textura y estructura que posee el suelo, se conoce como el espacio de suelo que está libre de sólidos, el suelo está constituido por macroporos, encargados de la aireación que se da en el suelo debido a que no retienen agua a causa de la fuerza de gravedad, en estos están principalmente las raíces, también tiene micro poros en los cuales se da el proceso de retención de agua (Rucks et al. 2004).
- **Densidad aparente:** está definida como la relación entre el peso del suelo seco a alta temperatura y el volumen del mismo suelo antes de ser secado, es un parámetro que refleja propiedades del suelo como la porosidad, la aireación y la infiltración o drenaje del mismo (Rucks et al. 2004).
- **Capacidad de campo:** es una propiedad del suelo que representa el punto en el cual el suelo inicia el proceso de migración de nutrientes, sucede cuando el suelo termina el drenado por efecto de la gravedad y queda saturado, en este punto el potencial hídrico del suelo se aproxima al valor de cero (Azcón-Bieto and Talón 2003).
- **Saturación:** el grado de saturación con agua que presenta el suelo se describe como la relación entre el volumen de agua ( $V_w$ ) con respecto al volumen total ( $V_t$ ) de suelo, es un parámetro utilizado para determinar la cantidad de agua que es retenida, esta varía para cada tipo de suelo y se expresa por medio de la siguiente ecuación.

$$S\% = \frac{V_W}{V_T} * 100 \quad (1.1)$$

- **pH:** es un factor importante a la hora de determinar la solubilidad de los nutrientes del suelo al igual que la composición química, debido a que todas las especies tienen requerimientos nutricionales diferentes; el pH ideal es aquel en el cual la especie que se analiza sea beneficiada sin embargo se estima que el valor ideal se encuentra entre 5.5 y 6.5 unidades, un valor de pH bajo indica que hay una acidez en el suelo debida en algunos casos por la presencia de aluminio, pudiendo reducir la movilidad de nutrientes y favorecer la migración de metales pesados en el suelo por lo que se hace necesaria una enmienda para restablecer las condiciones de productividad adecuadas del suelo (Rucks et al. 2004)
- **Capacidad de intercambio catiónico:** es la propiedad del suelo que determina los procesos de adsorción, intercambio y liberación de cationes que se dan entre la solución del suelo y la raíz; la capacidad de intercambio catiónico es resultado de la composición del suelo principalmente la cantidad y característica que tenga de arcilla y humus, además del pH del suelo (Sánchez 2007).

## 1.2.2 Intercambio de nutrientes en el suelo

El paso de nutrientes del suelo a la raíz se da por medio de un proceso de intercambio iónico, este consiste en el flujo de elementos del suelo, que están próximos al crecimiento radicular de la planta. Dentro de este proceso se presentan varios movimientos el primero es el flujo másico en el cual, el elemento que va a ingresar a la planta está en solución y la cantidad del elemento que se va a transportar se puede escribir como (Sánchez 2007):

$$Q = M * V \quad (1.2)$$

En este caso M es la concentración del elemento en la solución y V es el volumen de agua que absorbe la planta. Otro de los procesos identificados es la difusión, por medio del cual se obedece la ley de Fick (Sánchez 2007), es decir el elemento se mueve en medio acuoso para nivelar la concentración, este proceso se puede expresar como se muestra en la siguiente ecuación:

$$F = D * \frac{dc}{dx} \quad (1.3)$$

Esta ecuación representa la velocidad de difusión del elemento (F), en función del gradiente de concentración (dC/dx), donde D es el coeficiente de difusión, el cual se puede encontrar reportado en la literatura para algunos de los macronutrientes, estos datos se presentan a continuación (Sánchez 2007):

$$NO_3^- = -0.3 * 1.3 * 10^{-5} \left[ \frac{mol}{cm^3} \right]$$

$$NH_4^+ = -1.4 * 10^{-6} \left[ \frac{mol}{cm^3} \right]$$

$$H_2PO_4^- = -10^{-7} - 10^{-14} \left[ \frac{mol}{cm^3} \right]$$

$$K^+ = -10^{-8} - 10^{-12} \left[ \frac{mol}{cm^3} \right]$$

En la Tabla 1-1 se puede identificar el tipo de interacción de diferentes nutrientes y elementos necesarios para el crecimiento de la planta, la identificación de estas interacciones es importante y permite definir los transportadores y la inhibición de los diferentes nutrientes que van a entrar a la planta.

**Tabla 1-1:** Tipos de interacción iónica de nutrientes en plantas adaptada de (Sánchez 2007)

Interacción	Elementos	Elementos
Competitiva	MnO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Competitiva	Zn <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup>
Competitiva	Fe <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>
Competitiva	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>
No competitiva	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
No competitiva	Zn <sup>2+</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
Competitiva	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Competitiva	Cl <sup>-</sup>	Br

Una vez los nutrientes entran por la raíz, deben pasar desde la epidermis de la raíz hasta el floema y xilema, este movimiento de fluido se da por medio de un proceso apoplástico es decir por las paredes o simplástico por el citosol de las célula, en ambos procesos ocurre intercambio por medio de iones en forma orgánica (Sánchez 2007).



### 1.2.3 Tipos de suelo

El suelo está compuesto por diferentes capas, esto se define como perfil del suelo, en el suelo se pueden encontrar arenas, limos, arcillas y materia orgánica cada uno de estos elementos aporta en las características del suelo, en conjunto el contenido de arcilla y materia orgánica aporta a la permeabilidad y retención de humedad, mientras que los tamaños de partícula grandes que aporta la arena permiten tener mayor aireación.

En la Tabla 1-2 se presenta la composición general para diferentes tipos de suelo, en la cual se evidencian las variaciones según sus características.

**Tabla 1-2:** Características de diferente tipos de suelo adaptada de (Rucks et al. 2004 y (Casanova 1991) )

Tipo de suelo	Descripción	CIC (meq/100g)	diámetro de partícula (um)
Arenoso	Suelo con baja retención de humedad por lo que tiene una baja capacidad de agua aprovechable, baja cantidad de nutrientes y área superficial.	0 - 1	50-2000
Arcilloso	Se caracterizan por una alta área superficial que promueve la retención de humedad y nutrientes	60-100	<2
Limo	Tiene características medias en cuanto a la permeabilidad, cantidad de nutrientes, porosidad y compactación.	20-40	2-50
Orgánico	Presenta características adecuadas para labranza y crecimiento de cultivos, en ocasiones puede ser mezclado con arenas o arcillas para mejorar características específicas dependiendo del cultivo	100-300	-

### 1.2.4 Hidrología del suelo

El suelo presenta diferentes procesos, en los cuales el agua actúa como medio de transporte de nutrientes del suelo a la planta, inicialmente es importante realizar un balance hídrico, que permita identificar realmente la cantidad de agua capilar que está disponible

para la planta. En términos generales un balance para el agua y el suelo se presenta en la siguiente ecuación (Allen et al. 2006):

$$P = ETV + ES + I \quad (1.4)$$

Donde:  $P$  Precipitación,  $ETV$  Evapo-transpiración de agua,  $ES$  Escorrentía de agua y  $I$  Cantidad de agua que se infiltra dentro del suelo.

### **Evapo- transpiración**

Representa la cantidad de agua que sale del suelo a causa del aumento de la temperatura y el efecto de la radiación solar, se encontró reportado en la literatura que es posible describir este fenómeno por medio del modelo de Evapo transpiración de Hargreaves, que está en función de la radiación solar y la temperatura de la zona a estudiar, el modelo se presenta por medio de la siguiente ecuación (Allen et al. 2006):

$$R_s = R_o * KT * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (1.5)$$

$$ET_o = 0.0135 * (T_{med} + 17.78) * R_s \quad (1.6)$$

Donde:  $ET_o$  Evapotranspiración potencial mm/día,  $T_{med}$  Temperatura media diaria °C,  $R_o$  Radiación solar extraterrestre en MJ/m<sup>2</sup>/día,  $R_s$  Radiación solar en mm/día,  $T_{max}$  Temperatura diaria máxima °C,  $T_{min}$  Temperatura diaria mínima °C,  $KT = 0.19$  Coeficiente zona costera y  $KT = 0.162$  Coeficiente zona interior.

### **Escorrentía**

Para la escorrentía, la cual es el flujo de agua superficial que se da en la superficie del suelo, es decir es la cantidad de agua que no se infiltra, esta se plantea como función del tipo de suelo, la pendiente o inclinación del suelo, entre otros factores que incluyen cambios meteorológicos, geográficos, hidrogeológicos y biológicos.

Para la escorrentía se propone el modelo de Prevent presentado a continuación (Juncosa 2018)

$$C = \frac{\Delta P_n}{\Delta P} \quad (1.7)$$

Donde:  $C$  Coeficiente de escorrentía,  $\Delta P_n$  Escorrentía superficial en mm/día y  $\Delta P$  Precipitación en mm/día.

Prevent 1986 propone la Tabla 1-3 en la cual se determina el coeficiente dependiendo de la pendiente y el tipo de suelo (Juncosa 2018).

**Tabla 1-3.** Coeficiente de escorrentía adaptado de (Juncosa 2018)

Uso del suelo	Pendiente (%)	Coeficiente de escorrentía dependiendo de la textura del suelo		
		Arenoso-Limoso	Limoso	Arcilloso
Bosque	0-5	0.10	0.30	0.40
	5-10	0.25	0.35	0.50
	10-30	0.30	0.40	0.60
	>30	0.32	0.42	0.63
Pastizal	0-5	0.15	0.35	0.45
	5-10	0.30	0.40	0.55
	10-30	0.35	0.45	0.65
	>30	0.37	0.47	0.68
Cultivo agrícola	0-5	0.30	0.50	0.60
	5-10	0.40	0.66	0.70
	10-30	0.50	0.70	0.80
	>30	0.53	0.74	0.84

### ***Infiltración***

El volumen de agua que se infiltra al suelo atraviesa la superficie y ocupa parcial o totalmente los poros del suelo, la cantidad de agua que se infiltra al suelo se puede expresar con el modelo de Horton quien expresa que el contenido de humedad en el suelo depende de la humedad inicial, la saturación, contenido de agua por unidad de medio, entre otros. En la Tabla 1-4 se presentan los valores de la función de infiltración para diferentes tipos de suelo, estos valores son datos experimentales que permiten analizar la capacidad de infiltración de función del tiempo, considerando particularmente cada tipo de suelo (Weber 2014).

$$F = f_c + (f_o - f_c) * e^{-Kt} \quad (1.8)$$

Donde:  $F$  Capacidad de infiltración en un tiempo  $t$  (mm/h),  $f_c$  Capacidad de infiltración para un tiempo, donde el suelo está saturado (mm/h),  $f_o$  Capacidad de infiltración inicial (mm/h),  $K$  Constante en función de las condiciones del suelo ( $\text{min}^{-1}$ ) (permeabilidad) y  $t$  Tiempo transcurrido en (min).

**Tabla 1-4** Datos experimentales Infiltración en diferentes tipos de suelo (adaptado(Weber 2014))

Tipo de suelo	$f_o$ (mm/h)	$f_c$ (mm/h)	$K$ (mm/h)
Desnudo	280	6-220	1.6
Agrícola estándar con materia orgánica	900	20-290	0.8
Arcilloso	325	2-20	1.8
Arenoso fino desnudo	210	2-25	2
Arcilloso con materia orgánica	670	10-30	1.4

Por otro lado una variación para esta ecuación, es el uso de la ley de Darcy en medios verticales para el cálculo de la conductividad hidráulica en función de la permeabilidad del tipo de suelo y el perfil del suelo como se muestra a continuación (Sanchez 2018).

$$K = k * \frac{g}{v} \quad (1.9)$$

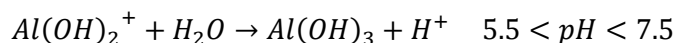
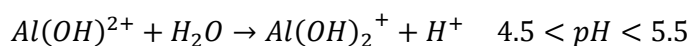
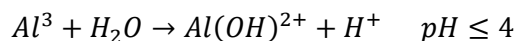
Donde:  $K$  Permeabilidad o conductividad hidráulica,  $k$  Permeabilidad del medio poroso,  $g$  Gravedad y  $v$  Viscosidad cinemática del fluido.

### 1.3 Fenómenos en el suelo

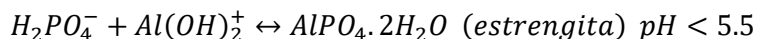
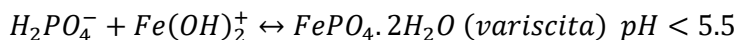
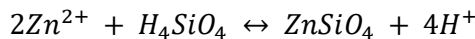
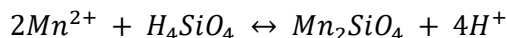
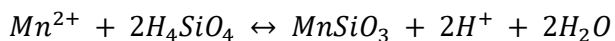
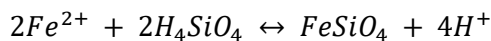
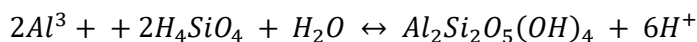
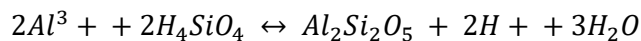
El suelo al ser un ecosistema complejo incluye diferentes reacciones químicas que se pueden dar a partir de la interacción de nutrientes, precipitaciones, iones e incluso el efecto de microorganismos en suelo, los cuales se mencionan a continuación:

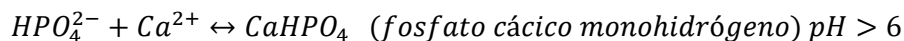
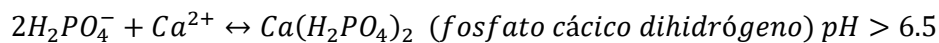
- **Materia orgánica:** en el suelo hay presencia significativa de materia orgánica la cual se caracteriza por estar cargada con grupos carboxílicos y fenólicos, los cuales tienen a liberar  $H^+$  cuando se dan procesos de descomposición o mineralización por efecto de diferentes microorganismos presentes en el suelo (Rucks et al. 2004).

- **Aluminio intercambiable:** el pH del suelo depende en gran medida de la cantidad de aluminio presente, el aluminio intercambiable reacciona con el agua y libera H<sup>+</sup> a la solución del suelo, para esto se tienen las siguientes reacciones de hidrólisis (Rucks et al. 2004).

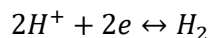
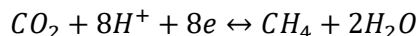
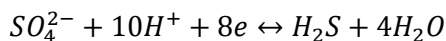
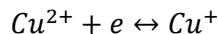
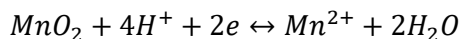
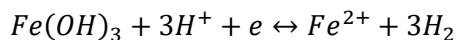
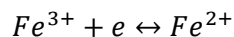
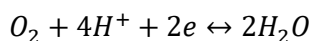


- **Reacciones por dilución:** se pueden clasificar como las reacciones más simples, pero que tienen un efecto importante en la cantidad de protones de hidrógeno (H<sup>+</sup>) que se encuentran en el suelo, y por ende en el pH de este. Esta reacción se da teniendo en cuenta la parte del suelo que está preparada para intercambio iónico y la presencia de agua, la cual da como resultados reacciones de disociación o hidrólisis donde hay involucrados ácidos y bases (Norberto E. HEIN 1986), (Osorio 2018).
- **Reacciones con CO<sub>2</sub>:** las raíces y los microorganismos por ser seres vivos mantienen procesos de respiración por lo tanto se produce dentro del suelo CO<sub>2</sub> el cual con presencia de agua y algunos cationes del suelo reacciona promoviendo la acidificación de los suelos (Norberto E. HEIN 1986), con el CO<sub>2</sub> se pueden presentar reacciones de meteorización de minerales y fijación del mismo.
- **Precipitación:** Es una reacción que ocurre principalmente con Al, Fe, Mn entre otros, con estos componentes se da la formación de productos no tóxicos para las plantas, los cuales se precipitan disminuyendo así la fitotoxicidad del suelo (Osorio 2018).





- **Actividad microbiana:** la actividad microbiana que tiene efecto sobre la disponibilidad de nutrientes del suelo es la que tiene lugar en la rizósfera, en la cual hongos levaduras, bacterias y actinomicetos pueden utilizar elementos del suelo dentro de su proceso metabólicos, tiene efecto principal en la disponibilidad de oxígeno e hidrógeno (Osorio 2014b).
- **Reacciones de óxido reducción:** en los suelos el pH, la cantidad de oxígeno, la cantidad de materia orgánica y la disponibilidad de agua, tienen relación con las reacciones de óxido reducción las cuales influyen en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, estas se presentan a continuación (Rucks et al. 2004).



## 1.4 Nutrientes y su dinámica en el suelo

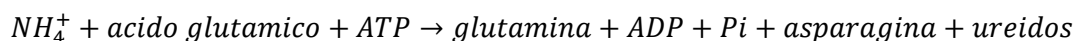
Para analizar con más detalle los fenómenos y las reacciones químicas asociadas a la dinámica del suelo, es necesario analizar por separado cada uno de los nutrientes o componentes principales.

### 1.4.1 Nitrógeno

El nitrógeno es uno de los nutrientes esenciales para los organismos presentes en el suelo y que dependen de la dinámica del suelo; este elemento hace parte primordial de la nutrición de las plantas ya que está presente como componente principal de ácidos nucleicos, aminoácidos, constituyente de las proteínas, participa en reacciones químicas y

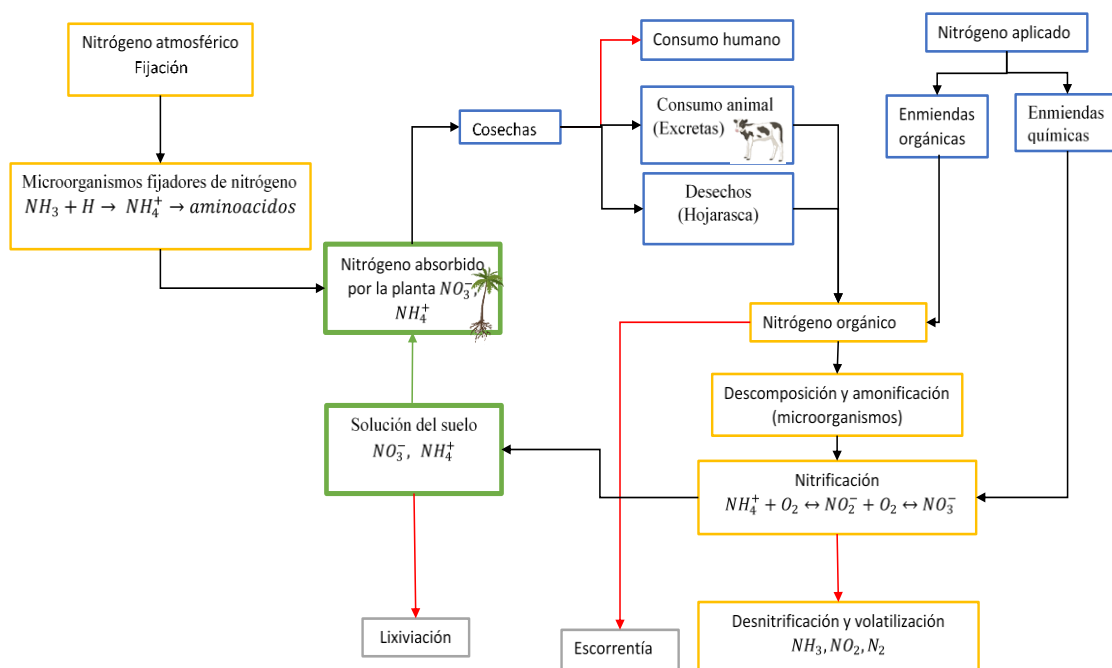
bioquímica encargadas de la generación de adenosín trifosfato (ATP) y hace parte de la clorofila por lo tanto juega un papel importante en el proceso de fotosíntesis. El N es absorbido por plantas cuando se presenta como:  $NO_3^-$  y  $NH_4^+$ , e interactúa en el suelo de diferentes formas, por lo tanto, se dan reacciones químicas y biológicas en el suelo que intervienen en la disponibilidad del mismo para las plantas, en la Figura 1-1 se muestra el ciclo biogeoquímico del nitrógeno (Osorio 2018).

La planta asimila el nitrógeno por medio de las siguientes dos reacciones, en las que se presentan encima como glutamina sintetasa, nitrato reductasa y nitrito reductasa las reacciones se muestran a continuación:



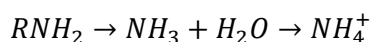
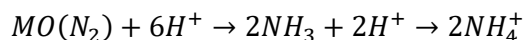
En la figura 1-1, se describen los procesos y las reacciones químicas relacionadas con el ciclo biogeoquímico del nitrógeno:

**Figura 1-1:** Ciclo biogeoquímico del nitrógeno.



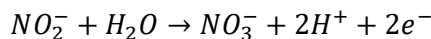
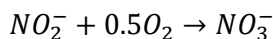
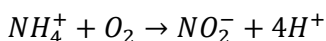
Nombre de la fuente: Elaboración propia

- **Descomposición y amonificación:** En este proceso el nitrógeno proveniente de residuos orgánicos, está presente en el suelo en forma de compuestos complejos como aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos y nucleótidos los cuales se descomponen o degradan por medio de microorganismos presentes en el suelo, finalmente el nitrógeno queda presente en el suelo como amoníaco o ion amonio, en este proceso se tiene participación de hongos y bacterias, además de enzimas como la desaminasa (Osorio 2014b), (Iñon 2017).

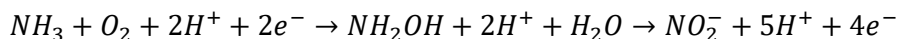


- **Nitrificación:** hace parte del proceso de mineralización de nitrógeno, en este caso hay liberación de nitrito ( $NO_2^-$ ) partiendo del amonio por medio de dos etapas de oxidación bacteriana en estado aerobio, este proceso se describe por medio de las siguientes ecuaciones y con presencia de diferentes especies bacterianas, durante este proceso hay generación de energía la cual es utilizada por las bacterias, en la actualidad no existe un organismo quimiolitótrofo que pueda realizar el proceso de oxidación completo de amonio a nitrato es por esto que la nitrificación se da por etapas y es realizada por diferentes bacterias que usan como fuente de carbono el  $CO_2$  (Osorio 2014b), (Iñon 2017).

*Nitrobacter*



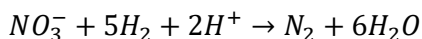
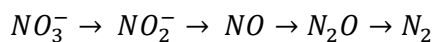
*Nitrosomonas*



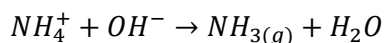
- **Desnitrificación:** representa la pérdida de nitrógeno en forma gaseosa, se da principalmente en suelos saturados ya que es un proceso anaeróbico, se da como resultado de la acción de bacterias anaeróbicas por medio de reacciones de reducción, en las cuales intervienen bacterias como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Thiobacillus denitrificans*; El proceso se da por acción de enzimas como nitrato



reductasa, nitrito reductasa, óxido nítrico reductasa y óxido nitroso reductasa respectivamente (Osorio 2014b).

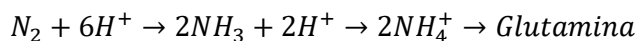


- **Volatilización:** en este proceso se presenta pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco ( $NH_3$ ), se da principalmente en suelos que tienen PH > 6.5 o con residuos de cal superficial, en algunos casos se pueden presentar pérdidas severas que representan el 90% del nitrógeno en el suelo (Osorio 2014b).

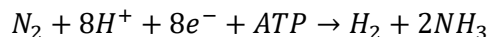
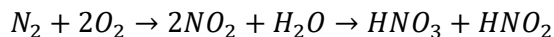
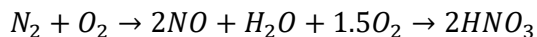


- **Escorrentía:** Proceso en el cual se presenta pérdida de nitrógeno superficial debido a fuerzas físicas, en este proceso no se da infiltración y el agua fluye por efecto de la gravedad en la superficie del suelo, en la literatura se reporta que la cantidad de nitrógeno perdida por escorrentía superficial varía dependiendo de la cobertura vegetal del suelo y la cantidad de roca fosfórica que pueda tener la superficie, el rango de pérdidas por nitrógeno a causa de la escorrentía esta entre 2-5 Mg/(ha año) (Duilio, Adriana, and Marisol 2005; Juncosa 2018).
- **Fijación:** es el proceso por medio del cual el nitrógeno gaseoso  $N_2$  se convierte en amonio  $NH_4^+$ , es un proceso relevante en este ciclo ya que por medio de este se puede obtener nitrógeno de la atmosfera, algunas de las bacterias involucradas son las *Rhizobium* que se localizan en los nódulos de las raíces, estas realizan la fijación por medio de procesos metabólicos, este amonio fijado puede ser utilizado por la planta o por microorganismos cercanos que estén arriba en la cadena alimenticia, es utilizado para la síntesis de proteínas u otros compuestos orgánicos. Existen otros fenómenos naturales o condiciones que pueden promover la fijación de nitrógeno por un medio diferente al biológico como lo son la fijación por relámpagos, flujo de lava, fertilizantes nitrogenados sintéticos, cultivo de legumbres y combustión de petroquímicos (Iñon 2017).

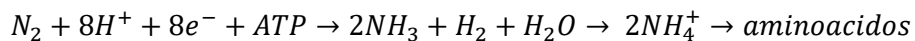
Por enzimas (*Nitrogenasa*)



Por cargas eléctricas y por bacterias (Osorio 2014b).



- **Lixiviación:** se da principalmente en regiones lluviosas, suelos arenosos con baja capacidad de intercambio iónico y suelos ácidos ricos en aluminio intercambiable, en este proceso se da principalmente pérdida de amonio que es menos retenido que otros cationes y el nitrato que se repele del sitio de intercambio por lo que tienden a estar en solución, el nitrógeno que se pierde por proceso de lixiviación varía con cada tipo de suelo pero se estiman que puede estar entre 40-80 kg N por hectárea por año (15-30% del nitrógeno aplicado) (Osorio 2014b).
- **Fijación Biológica:** proceso realizado por los microorganismos fijadores de nitrógeno, puede ser simbiótica en esta se forman nódulos en las raíces, en estos se albergan las bacterias las cuales realizan el proceso de fijación a partir de carbono entregado por la planta entre los microorganismos de esta categoría se encuentran *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Acetobacter* y *Nostoc* por otro lado el proceso no simbiótico o asociativa se da cuando las bacterias están en la rizósfera, rizo plano y no hay formación de nódulos en este caso la fuente de carbono es del suelo en este grupo se encuentran *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Frankia* y *Anabaena*. En términos generales se puede expresar ambos procesos por medio de la siguiente reacción química (Osorio 2014b).



En la Tabla 1-5 se presentan un reporte de la literatura donde están algunos sistemas biológicos y la cantidad de nitrógeno fijado por hectárea.

**Tabla 1-5:** Microorganismos y la fijación de nitrógeno. Adaptado de (Osorio 2014b).

Sistema biológico	Nitrógeno fijado (kg/ (ha año))
<b>Microorganismos vida libre</b>	
<i>Cianobacteria</i>	25
<i>Azotobacter</i>	0.3
<i>Clostridium pasteurianum</i>	0.1-0.5
<b>Pastos – simbiosis asociativa</b>	
<i>Acetobacter diazotrophicus</i> (Caña de azúcar)	<90
<i>Paspalum notatum</i> – <i>Azotobacter</i>	<90
<b>Planta cianobacteria</b>	
<i>Gunnera</i>	12-21
<i>Azolla</i>	313
<b>Liquenes</b>	
<i>Hongo cianobacteria</i>	39-84
<b>Simbiosis no leguminosas</b>	
<i>Alnus-Frankia</i>	40-300
<i>Casuarina- Frankia</i>	58
<b>Simbiosis con leguminosas</b>	
<i>Soya-Bradyrhizobium</i>	57-94
<i>Alfalfa-Rhizobium</i>	128-600
<i>Caupi-Rhizobium</i>	84
<i>Trebol-Rhizobium</i>	104-160
<i>Lupino-Rhizobium</i>	150-169
<b>Fijación de nitrógeno de rizobios con algunas leguminosas</b>	
<i>Centrosema</i>	112
<i>Stylosanthes</i>	30-196
Lenteja	35-97
Caupi	73-240
Soya	17-124
Garbanzo	41-279

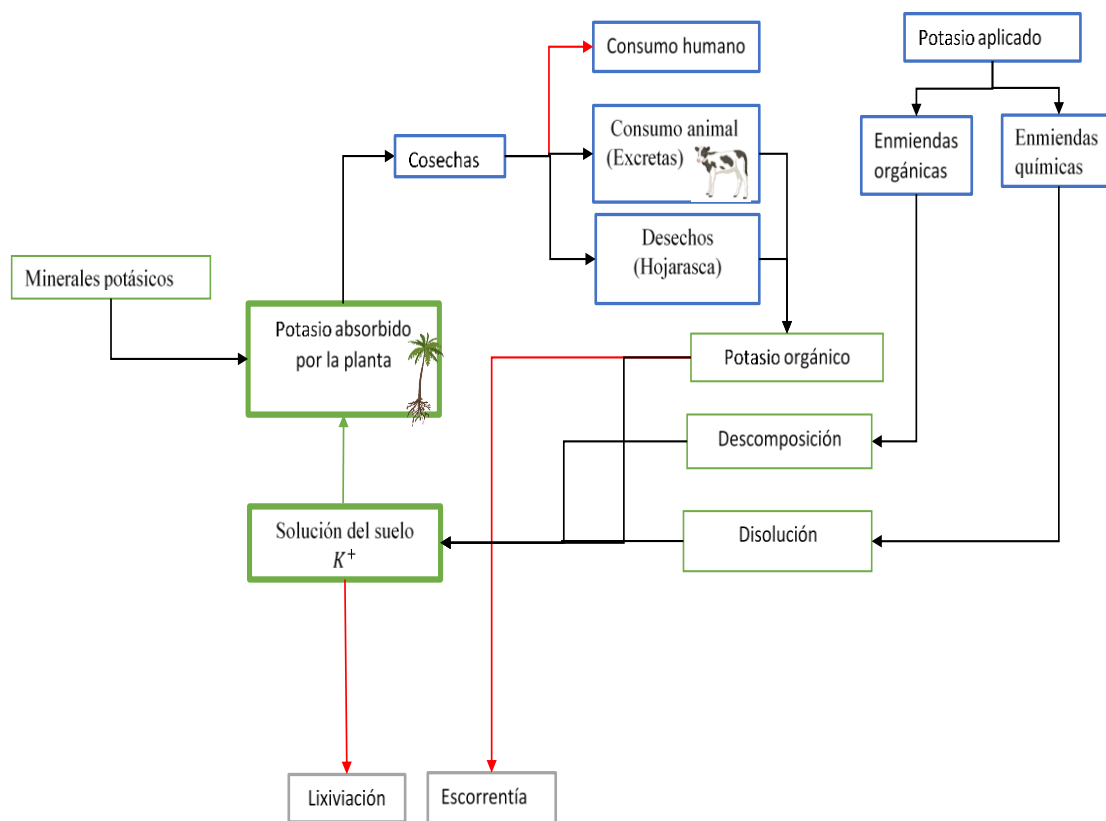
### 1.4.2 Potasio

El potasio es uno de los componentes principales de las plantas hace parte de los tejidos vegetales como  $K^+$ , representa un porcentaje en el contenido de las hojas que puede variar entre 2.5-5.0 % además tiene un papel dentro de las funciones de las plantas donde es activador de las enzimas que actúan durante el proceso de fotosíntesis y síntesis de proteínas, tiene relación con la regulación del potencial osmótico celular y está relacionado con la apertura y cierre de estomas los cuales controlan la transpiración de agua y captura

de dióxido de carbono, es decir, cuando hay luz el  $K^+$  y el  $H_2O$  ingresan a la célula de guarda en este momento se abre el estoma, cuando hay oscuridad sale el  $K^+$  y el  $H_2O$  de las células de guarda y el estoma se cierra (Osorio 2014a).

En el suelo el potasio representa un porcentaje que varía entre 0.4 – 3 %, está presente en diferentes fracciones del suelo como: minerales primarios (5000-25000 mg/kg) principalmente en feldspatos y micas, potasio fijado (mg/kg) este es un potasio no intercambiable, en superficies como arcillas, óxidos y humos (20-230 mg/kg) y en solución que es el que está disponible para las plantas (1-10 mg/L) representa aproximadamente el 0.03% del potasio en el suelo (Osorio 2014a). En cada una de las fracciones del suelo que tiene presencia el potasio ocurren diferentes reacciones químicas y bioquímicas, por medio de las cuales se puede determinar la Figura 1-2 se presenta el ciclo biogeoquímico del potasio.

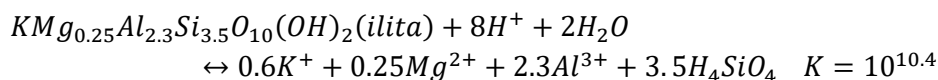
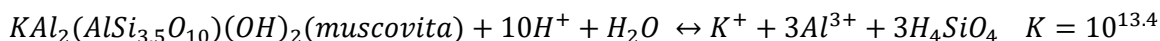
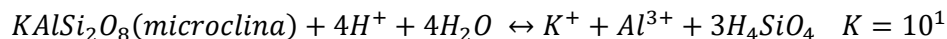
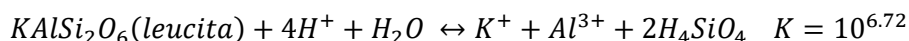
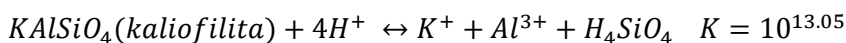
**Figura 1-2:**Ciclo del potasio en el suelo.



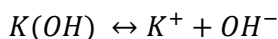
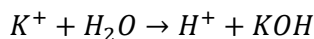
Nombre de la fuente: Elaboración propia

En la Figura 1-2 se presenta el ciclo del potasio, donde se evidencian los procesos en los que está involucrado el potasio en el suelo, el cual puede estar en forma orgánica e inorgánica, las líneas de color rojo indican procesos en los cuales se tiene salida de potasio que no puede ser aprovechada por las plantas, mientras que las líneas negras indican procesos que aumentan o aportan a la cantidad de potasio disponible para la planta por otro lado los cuadros de color azul indican procesos donde hay intervención humana, de color gris los procesos que ocurren debido a fuerzas físicas y finalmente de color verde los que ocurren de forma natural.

- **Minerales potásicos:** estos minerales tienen contenido de potasio, por lo general son micas y feldspatos los cuales por medio de un proceso de meteorización por dilución acida en estado biótico o abiótico logra aportar  $K^+$  a la solución del suelo, a continuación, se presentan las reacciones químicas por medio de las cuales se da este proceso en el suelo.



- **Descomposición:** la descomposición de materia orgánica con presencia de potasio se da gracias a los microorganismos solubilizadores de potasio, entre los cuales hay bacterias que promueven la disponibilidad de potasio para la planta, dentro de las bacterias reportadas como solubilizadoras de potasio están: *Bacillus Mucilaginosus*, *Arthrobacter*, *Edaphicus*, *Circulans*, entre otras; También hay hongos que pueden realizar este proceso en el cual se libera  $H^+$ , citrato, oxalato y malato como: *Aspergillus Terreus* Y *Niger* (Pumayalla 2018).
- **Dilución:** se da por un proceso de hidrolisis inicialmente y luego disociación básica que sigue la teoría de Arrhenius donde el hidróxido de potasio es una base fuerte la cual se disocia completamente en iones, el hidróxido de potasio se disocia dejando iones  $OH^-$  y  $K^+$  como se muestra a continuación:

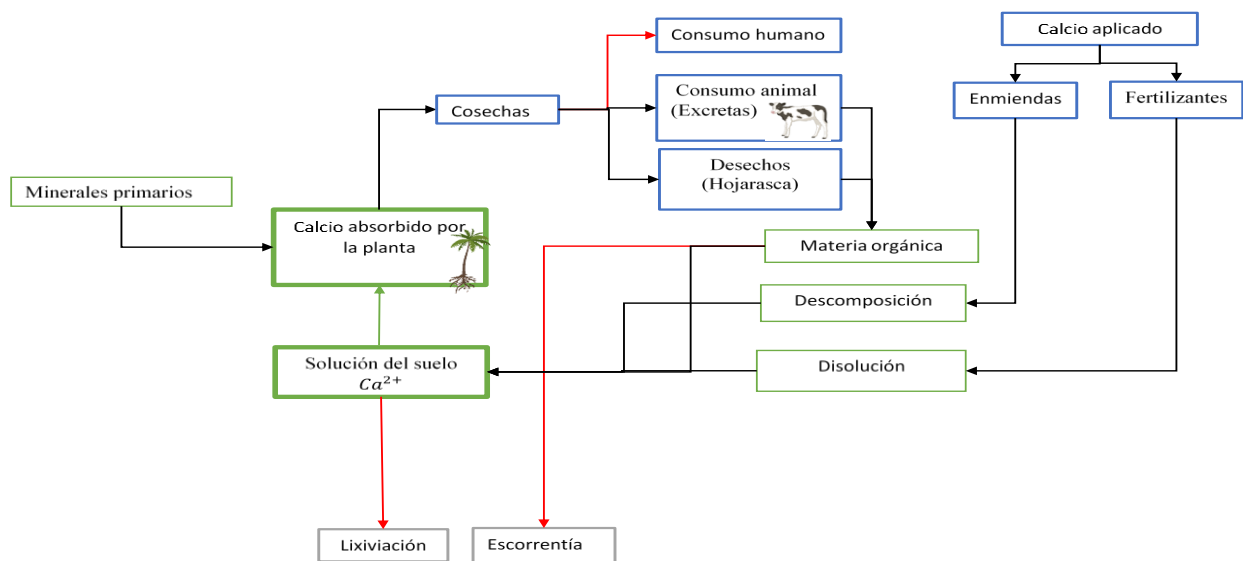


### 1.4.3 Calcio

El calcio es uno de los nutrientes esenciales requeridos por las plantas en el suelo, cuando está presente en altas cantidades se espera que el suelo este cerca de la neutralidad, este puede interactuar con aluminio y sodio disminuyendo la cantidad de  $Ca^{2+}$  disponible para las plantas; este hace parte de los tejidos vegetales en forma de  $Ca^{2+}$  y la cantidad presente en el contenido de las hojas puede variar entre 0.5 – 1 %, además, es esencial en las funciones de la planta ya que actúa como activador e inhibidor de enzimas, receptor de estímulos celulares y aporta firmeza y consistencia a los tejidos, se ha reportado en la literatura que la cantidad de calcio demandada por las plantas puede variar entre 100 – 250 kg/ha (Osorio 2014a) (Bohn, McNeal, and O’connor 1993).

La presencia de calcio en el suelo se puede dar de diferentes formas, esta varía con el tipo de suelo. Se estima que el calcio mineral se encuentra entre 5000-20000 mg/kg, el intercambiable presente en arcillas y humos esta entre 20-5000 mg/l y varía dependiendo de la región donde se encuentre y el calcio en solución que es el que puede ser aprovechado por la planta de forma inmediata esta entre 5- 300 mg/l que es aproximadamente el 0.03% del calcio en el suelo, estas fracciones y la forma como interactúan se pueden representar por medio de un ciclo biogeoquímico del calcio como el que se muestra en la Figura 1-3 (Osorio 2014a):

**Figura 1-3:** Ciclo del calcio en el suelo

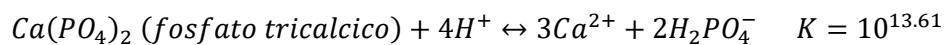
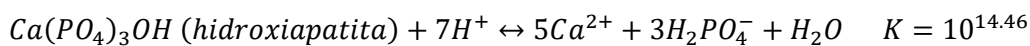
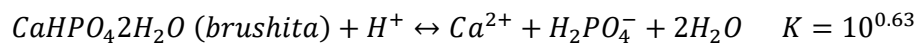
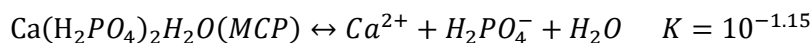
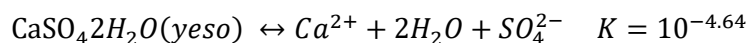
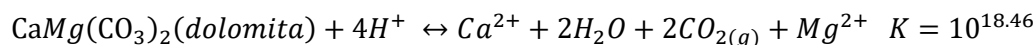
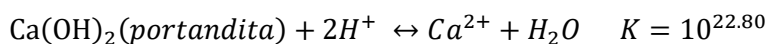
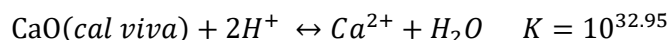
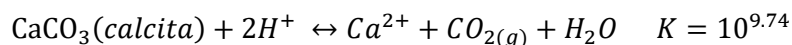
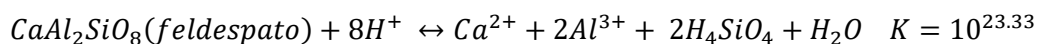
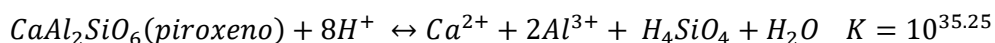
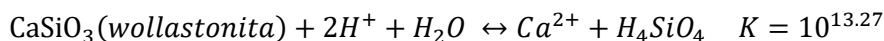


Nombre de la fuente: Elaboración propia

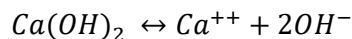
En la Figura 1-3 se encuentra el ciclo del calcio, en este se presentan los procesos en los que está involucrado el calcio en el suelo, el cual puede estar en forma orgánica e inorgánica, las líneas de color rojo indican procesos en los cuales se tiene salida de calcio que no puede ser aprovechada por las plantas, mientras que las líneas negras indican procesos que aumentan o aportan a la cantidad de calcio disponible para la planta por otro lado los cuadros de color azul indican procesos donde hay intervención humana, de color gris los procesos que ocurren debido a fuerzas físicas y finalmente de color verde los que ocurren como un fenómeno natural.

A continuación, se describen los procesos y las reacciones químicas relacionadas con el ciclo biogeoquímico del calcio:

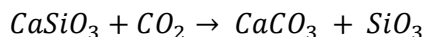
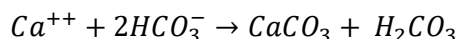
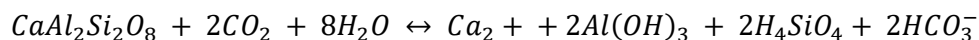
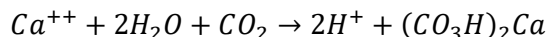
- **Meteorización:** es el proceso por medio del cual a partir de la dilución acida de minerales se obtiene calcio en forma de  $Ca^{2+}$  en la solución del suelo el cual puede ser aprovechado por las plantas, a continuación, se presentan las reacciones químicas relacionadas con este proceso.



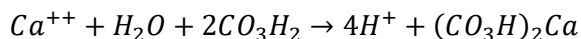
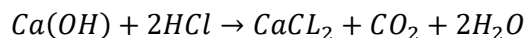
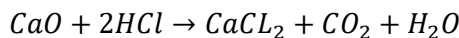
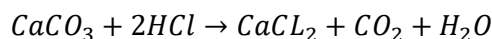
- **Dilución:** se da por un proceso de disociación básica que sigue la teoría de Arrhenius donde el hidróxido de calcio es una base fuerte la cual se disocia completamente en iones como se muestra a continuación:



- **Reacciones con CO<sub>2</sub>:** las raíces y los microorganismos por ser seres vivos incluyen procesos de respiración por lo tanto se produce dentro del suelo CO<sub>2</sub> el cual con presencia de agua y algunos cationes del suelo reacciona y da paso a la siguiente reacción la cual promueve la acidificación de los suelos (Norberto E. HEIN 1986), con el CO<sub>2</sub> se pueden presentar reacciones de meteorización de minerales y fijación del mismo:



- **Otros:** otras de las reacciones que pueden ocurrir por presencia de calcio, es la neutralización, la cual se define como la capacidad del suelo para controlar su acidez, a continuación se presentan las reacciones químicas involucradas en el proceso de neutralización en el suelo (Rucks et al. 2004):



#### 1.4.4 Magnesio

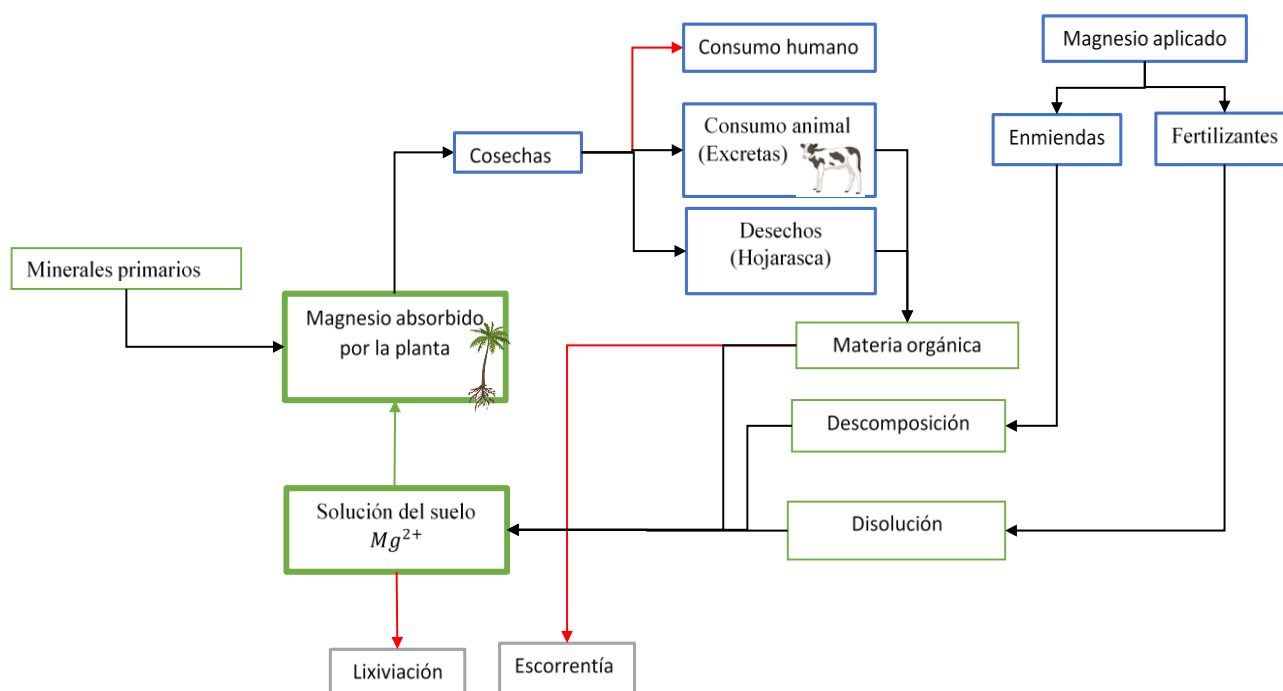
El magnesio se caracteriza por estar presente en el suelo en grandes cantidad, este es muy importante y por lo general está presente gracias a su abundancia dentro de los aluminosilicatos tanto primarios como secundarios, dentro de las funciones que tiene en



las plantas se destaca que hace parte de los tejidos vegetales como  $Mg^{2+}$  su presencia en las hojas puede variar entre 0.2 – 0.4 %, también hace parte esencial de las funciones de la planta, es uno de los constituyentes de la clorofila, permite activar el ATP y las enzimas, hace parte de los ribosomas. Este elemento está involucrado en procesos como la fotosíntesis, la respiración, la síntesis de proteínas la síntesis de DNA y RNA se reporta en la literatura que los requerimientos de  $Mg^{2+}$  por las plantas varía entre 10-25 kg/ha (Osorio 2014a)(Bohn, McNeal, and O'connor 1993).

La presencia de magnesio en el suelo se puede dar de diferentes formas, esta varía con el tipo de suelo estando en mejor proporción en suelos del trópico húmedo 0.1% y puede llegar hasta un 2% en suelos templados del trópico seco. El magnesio puede estar presente en minerales como olivino, serpentina, vermiculita, montmorillonita, también está presente en el suelo como magnesio intercambiable presente en arcillas, óxidos y humus; el magnesio en solución puede ser aprovechado por las plantas de forma inmediata y puede estar presente en cantidades que oscilan entre 5- 60 mg/l, en la Figura 1-4 se presenta el ciclo del magnesio en el suelo (Osorio 2014a).

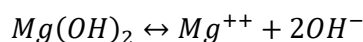
**Figura 1-4:** Ciclo del magnesio en el suelo



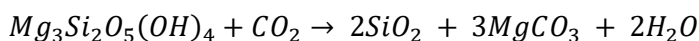
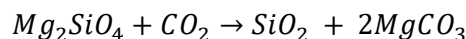
Nombre de la fuente: Elaboración propia

En la Figura 1-4 se presentan los procesos en los cuales hay presencia o interacción del magnesio en el suelo. Este puede estar en forma orgánica e inorgánica, las líneas de color rojo indican procesos en los cuales se tiene salida de magnesio que no puede ser aprovechada por las plantas, mientras que las líneas negras indican procesos que aumentan o aportan a la cantidad de magnesio disponible para la planta por otro lado los cuadros de color azul indican procesos donde hay intervención humana, de color gris los procesos que ocurren debido a fuerzas físicas y finalmente de color verde los que ocurren como un fenómeno natural.

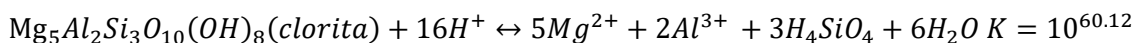
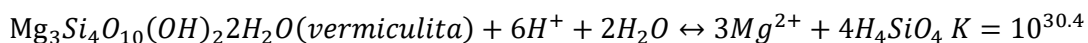
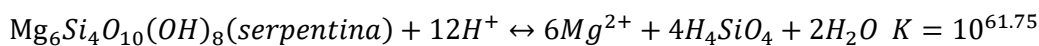
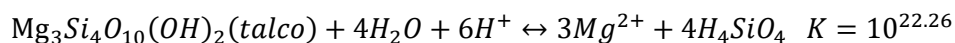
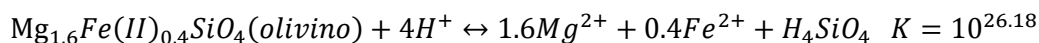
- **Dilución:** se da por un proceso de disociación de una base fuerte que sigue la teoría de Arrhenius donde el hidróxido de magnesio se disocia completamente en iones:

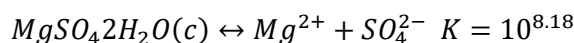
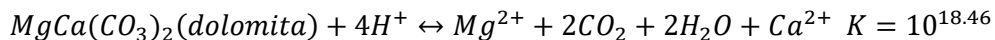
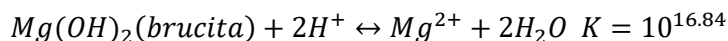
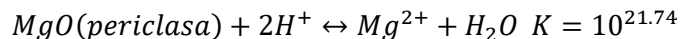
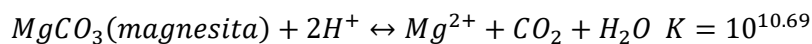
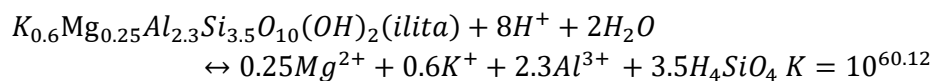


- **Reacciones con CO<sub>2</sub>:** las raíces y los microorganismos por ser seres vivos incluyen procesos de respiración por lo tanto se produce dentro del suelo CO<sub>2</sub> el cual con presencia de agua y algunos cationes del suelo reacciona y da paso a la siguiente reacción la cual promueve la acidificación de los suelos (Norberto E. HEIN 1986), con el CO<sub>2</sub> se pueden presentar reacciones de meteorización de minerales y fijación del mismo:

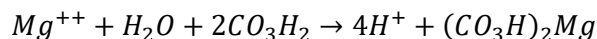
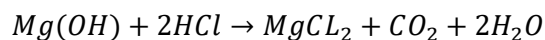


- **Meteorización:** es el proceso por medio del cual a partir de la dilución acida de minerales como feldespatos para obtener magnesio en forma de Mg<sup>2+</sup> en la solución del suelo el cual puede ser aprovechado por las plantas, a continuación, se presentan las reacciones químicas relacionadas con este proceso.





- **Otros:** otras de las reacciones que pueden ocurrir por presencia de magnesio, es la neutralización, es la capacidad del suelo para controlar la acidez del suelo, a continuación se presentan las reacciones químicas involucradas en el proceso de neutralización en el suelo (Rucks et al. 2004):



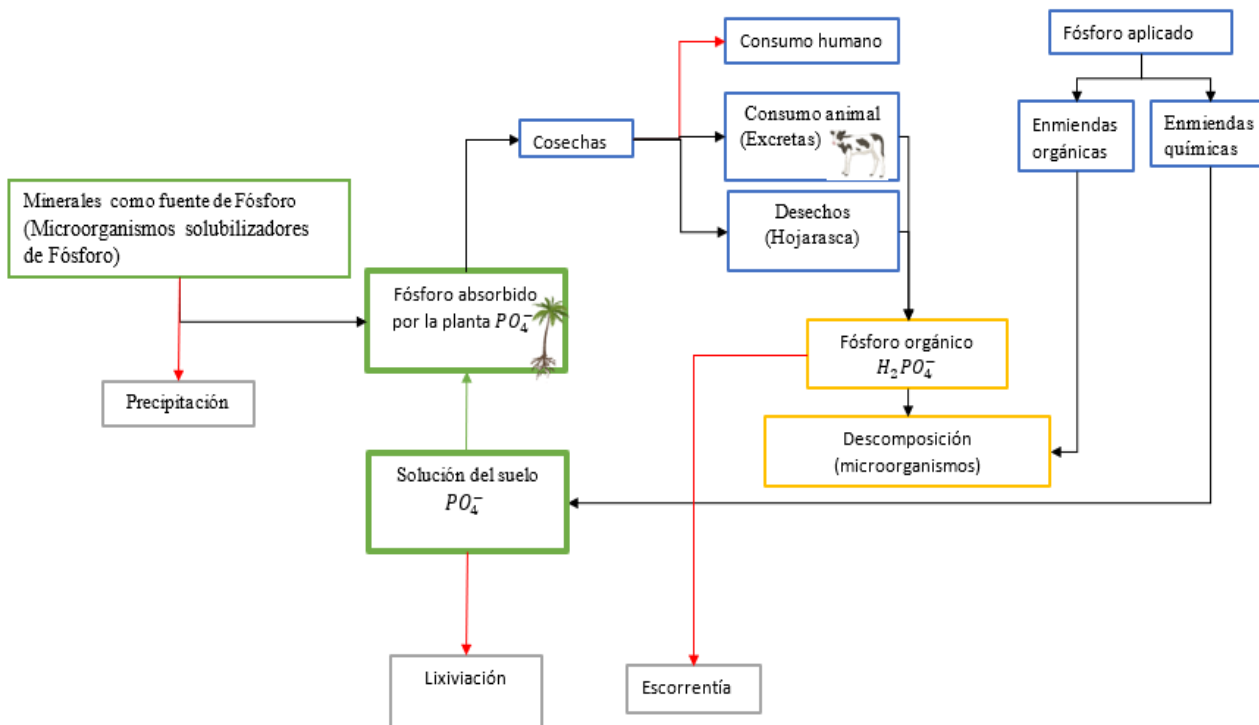
### 1.4.5 Fósforo

El fósforo hace parte de los requerimientos de la plantas es absorbido en su estado de oxidación más estable el fosfato  $H_2PO_4^-$  en suelos ácidos o  $HPO_4^-$  en suelos básicos, por lo general este está unido a aluminio, hierro o calcio y esto puede variar dependiendo del pH del suelo se estima que la concentración de este nutriente en el suelo puede estar entre 0.01 y 1 mg/l (Bohn, McNeal, and O'connor 1993). El fósforo es parte esencial de las plantas ya que se encuentra acumulado dentro del tejido vegetal variando en concentraciones 0.1 al 0.4 %, éste está involucrado dentro de las funciones que promueven el desarrollo de la planta y que hace parte de moléculas como ADP y ATP las cuales intervienen en procesos energéticos, hace parte de la membrana celular por medio de los fosfolípidos, hace parte de los nucleótidos y está presente en diferentes procesos metabólicos de la célula (Osorio 2014a).

La presencia de fósforo en el suelo se puede dar de diferentes formas, este puede estar presente en minerales, también se puede encontrar como fósforo intercambiable y en solución que es el que puede ser aprovechado por la planta de forma inmediata, en la Figura 1-5 se presenta el ciclo del fósforo en el suelo (Osorio 2014a).

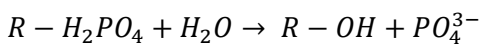
La Figura 1-5, presenta las diferentes interacciones del fósforo en el suelo, este puede estar en forma orgánica e inorgánica, las líneas de color rojo indican procesos en los cuales se tiene salida de fósforo que no puede ser aprovechada por las plantas, mientras que las líneas negras indican procesos que aumentan o aportan a la cantidad de fósforo disponible para la planta por otro lado los cuadros de color azul indican procesos donde hay intervención humana, de color gris los procesos que ocurren debido a fuerzas físicas y finalmente de color verde los que ocurren como un fenómeno natural.

**Figura 1-5:** Ciclo del Fósforo en el suelo

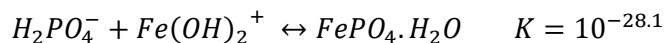
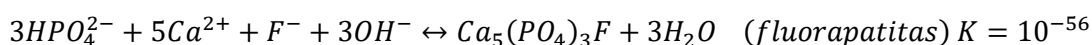
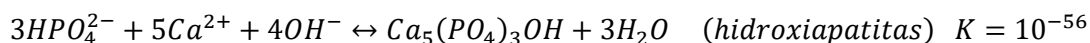
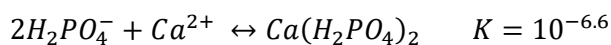


Nombre de la fuente: Elaboración propia

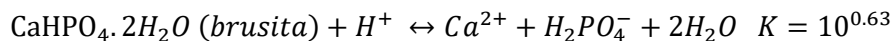
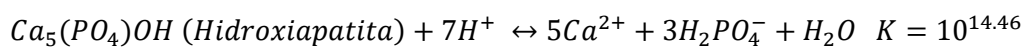
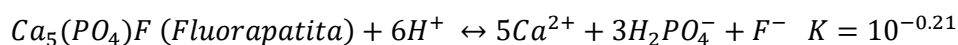
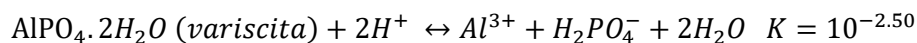
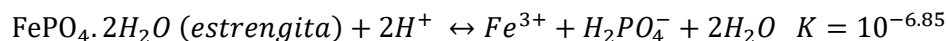
- Descomposición:** este proceso ocurre en el fósforo orgánico que está presente en el suelo en forma de fosfolípidos, ATP, ácidos nucleicos, entre otros, los cuales son degradados por acción de la enzima fosfatasa la cual rompe el enlace éster y libera el fosfato inorgánico a la solución del suelo (Osorio 2014a).



- **Fijación:** Se puede encontrar en el suelo el fosfato precipitado como fosfato de calcio, fosfato de aluminio y fosfato de hierro, esto varía dependiendo del pH del suelo y los nutrientes predominantes en el mismo, por ejemplo en suelos alcalinos hay más presencia de calcio y en suelos ácidos más presencia de aluminio (Osorio 2014a).



- **Meteorización:** es el proceso por medio del cual a partir de la dilución ácida de minerales como para obtener fósforo en forma de  $H_2PO_4^-$  en la solución del suelo el cual puede ser aprovechado por las plantas, a continuación se presentan las reacciones químicas relacionadas con este proceso (Osorio 2014a).



## 1.4.6 Azufre

Es tomado por la planta por medio de la raíz en forma de  $SO_4^{2-}$  y por medio de las hojas  $SO_2$  en estado gaseoso, es uno de los componentes esenciales de los tejidos vegetales, donde está presente en cadenas radicales ya sea como R-SH o R-S-S-R este es constituyente principal de aminoácidos esenciales como lo son la cisteína y la metionina en los que tiene aproximadamente el 90%, también hace parte de las vitaminas como la biotina, tiamina, coenzima A y ciclo de Krebs, además, hace parte de procesos como la

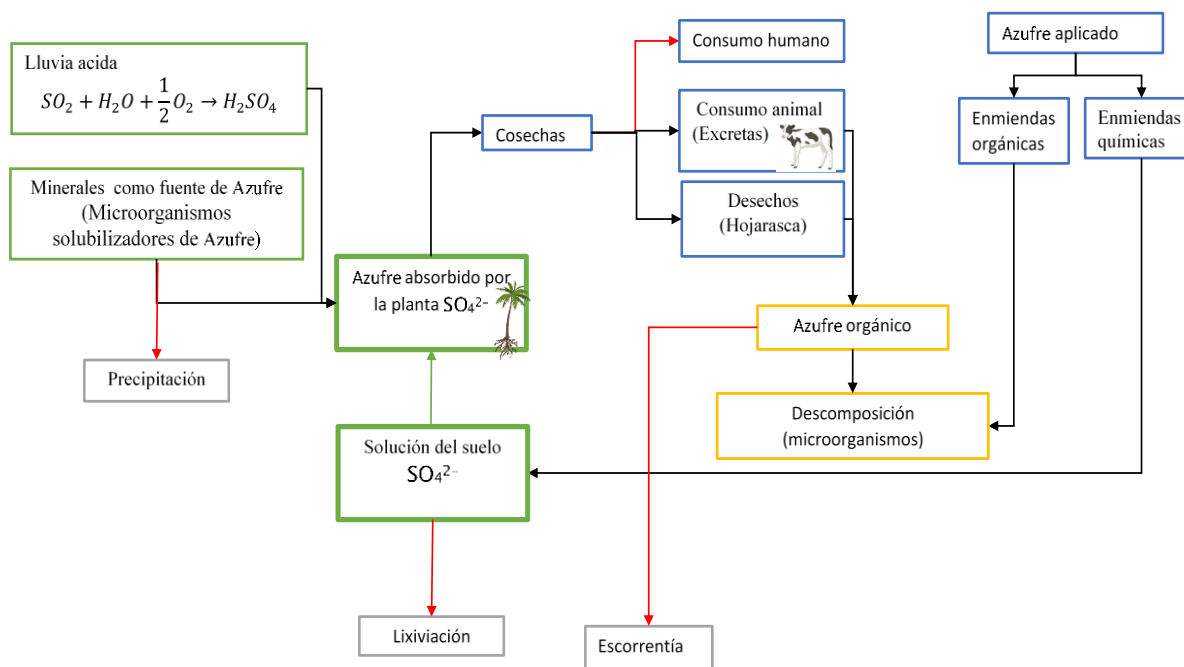
fotosíntesis, la fijación de N<sub>2</sub> y la síntesis de clorofila (Osorio 2014a), (Bohn, McNeal, and O'connor 1993).

Las plantas absorben el azufre en cantidades bajas, que pueden variar entre 20 y 40 kilogramos por hectárea, se estima que una concentración adecuada en las hojas varía entre 0.1 y 0.5%, la deficiencia de azufre se refleja por medio de clorosis, suelos ácidos, alta lixiviación, contenido alto de aluminio, pH mayor a 6 unidades y retraso en el desarrollo de las flores y frutos, es importante mencionar que si se desea el azufre como SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> se debe aplicar en el suelo S<sub>2</sub> (Osorio 2014a).

El azufre está presente en el suelo en diferentes formas, orgánico que representa aproximadamente el 90%, inorgánico aproximadamente el 10%, también está intercambiable y soluble pero esta proporción es de solo el 1 o 2 % (Osorio 2014a).

La presencia de azufre en el suelo se puede darse de diferentes formas, de un lado puede estar presente en minerales, o de otro puede encontrarse como azufre intercambiable y en solución que es el que puede ser aprovechado por la planta de forma inmediata, en la Figura 1-6 se presenta el ciclo del azufre en el suelo (Osorio 2014a):

**Figura 1-6:** Ciclo del Azufre en el suelo

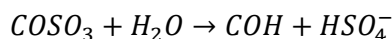


Nombre de la fuente: Elaboración propia

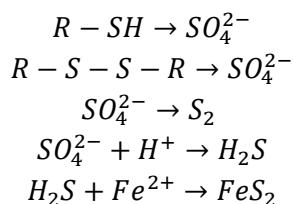
En la Figura 1-6 se presentan los procesos donde tiene efecto el azufre en el suelo, este puede estar en forma orgánica e inorgánica, las líneas de color rojo indican procesos en los cuales se tiene salida de azufre que no puede ser aprovechada por las plantas, mientras que las líneas negras indican procesos que aumentan o aportan a la cantidad de azufre disponible para la planta por otro lado los cuadros de color azul indican procesos donde hay intervención humana, de color gris los procesos que ocurren debido a fuerzas físicas y finalmente de color verde los que ocurren como un fenómeno natural.

Lluvia ácida: el sulfato puede llegar al suelo por medio de diferentes fuentes una de estas es la lluvia acida en la cual llega al suelo como  $H_2SO_4$ , a partir de minerales secundarios el azufre sufre un proceso de disolución, para minerales se da un proceso de oxidación aerobia biológica para llegar a la solución del suelo, además, el azufre aportado por materia orgánica se reduce o descompone para llegar a la solución del suelo (Osorio 2014a).

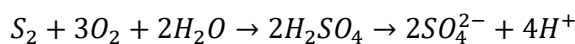
- **Descomposición:** La enzima sulfatasa es la encargada de remover el sulfato que está unido a la materia orgánica por medio de la siguiente reacción:



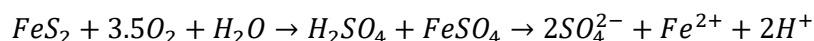
- **Oxidación:** se da solo con presencia de oxígeno y causa disminución en el PH del suelo, siempre y cuando esté presente la bacteria *Thiobacillus oxidans* o *Thiobacillus ferrooxidans*, este proceso puede ocurrir en ambientes anaeróbicos para reducirse y en algunas ocasiones cuando hay presencia de Hierro se pueden presentar también precipitaciones o en ambiente aerobio para formar parte de la solución del suelo, como se puede evidenciar en las siguientes ecuaciones (Osorio 2014a).



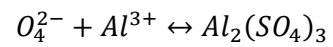
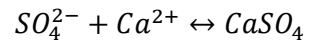
*Thiobacillus oxidans*



*Thiobacillus ferrooxidans*



- **Precipitación:** este proceso se puede dar debido a la interacción del azufre presente en el suelo con el calcio cuando el pH es mayor a 6.5 y el aluminio cuando el pH es menor a 5.5 (Osorio 2014a).





---

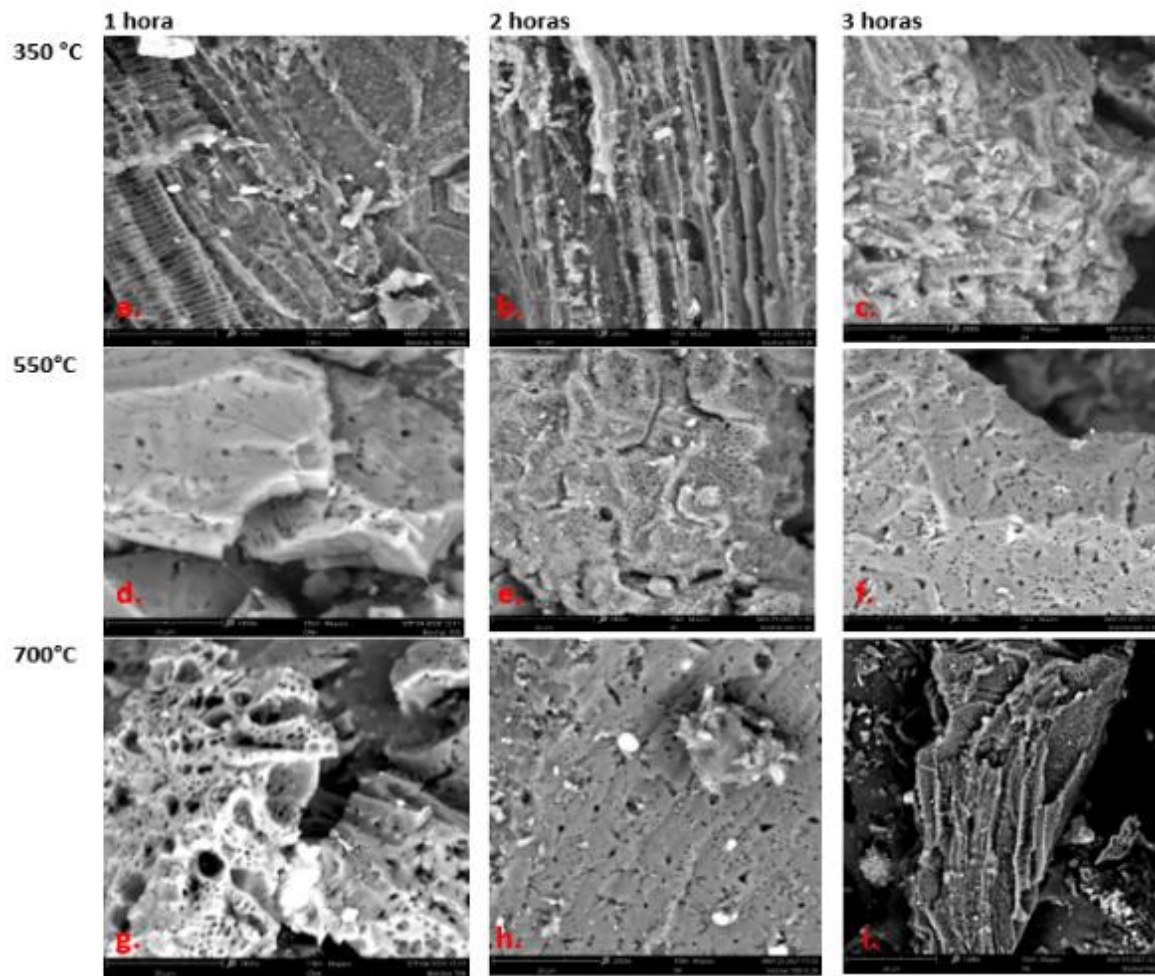
## **2. Caracterización del biochar de cuesco de palma y su aplicación en suelos**

Para realizar la caracterización y aplicación de biochar obtenido a partir de cuesco de palma, fue necesario iniciar con un pretratamiento de la biomasa, para esto se realizó un proceso de molienda y tamizado del cuesco para obtener partículas entre 0,1 y 2 mm de diámetro, el cuesco tamizado se llevó a procesos de pirólisis bajo diferentes condiciones de temperatura de 350°C, 550°C y 700°C, cada una de estas temperaturas fue evaluada a diferentes tiempos de residencia de 1, 2 y 3 horas, con el objetivo de determinar su rendimiento y establecer las propiedades del biochar que puedan aportar a las características del suelo. La síntesis de biochar a diferentes temperaturas permitió identificar que a medida que la temperatura aumenta el rendimiento disminuye, de esta manera, para la temperatura de 350°C hubo un rendimiento de 44%, para la temperatura de 550°C el rendimiento fue de 30% y para 700°C fue de 27%. Sin embargo, el rendimiento no es la única variable de interés, a la hora de decidir qué biochar se va a utilizar para su aplicación en suelos, por lo que es necesario realizar una caracterización detallada que permita identificar características de área superficial, la porosidad y los grupos funcionales superficiales, además de evaluar cambios en características del suelo con aplicación de biochar como es permeabilidad, pH, disponibilidad de nutrientes y capacidad de intercambio catiónico.

### **2.1 Análisis microscopía electrónica de barrido (SEM)**

La microscopía electrónica de barrido es un análisis que se puede realizar a diferentes materiales, consiste en la dispersión de un haz de electrones sobre la superficie del material que permite formar una imagen superficial que muestra con detalle su forma, textura, y la estructura general, en la Figura 2-1, se presenta las imágenes SEM obtenidas para biochar proveniente de pirólisis de cuesco de palma obtenido a 350°C, 550°C y 700°C; cada temperatura fue evaluada en tiempos de residencia de 1, 2 y 3 horas. Las imágenes presentadas tienen una escala de 30 micras con un aumento de 2100X obtenida a 15kv.

**Figura 2-1** Imágenes SEM de biochar a diferentes temperaturas.



Nombre de la fuente: Elaboración propia

De manera global la Figura 2-1 permite observar cambios superficiales del material con la formación de poros a medida que se aumenta la temperatura, La Figura 2.1 f, g y h se presentan las imágenes del biochar producido a 700°C, donde se visualiza una mayor superficie con poros definidos comparadas con las imágenes presentadas en las líneas superiores, donde están los resultados para el biochar de 350°C y 550°C. Estos resultados concuerdan por Castilla et al, en 2020 con la producción y caracterización de biochar procedente de coco a partir de pirolisis lenta, en la cual evalúan el aumento de temperatura con respecto a los cambios en la apariencia porosa del biochar a través de SEM , también se logra evidenciar una diferencia significativa para el biochar de 550°C en la Figura 2.1 d, e y f comparado con el obtenido a 350°C presentado en la Figura 2.1 a, b y c donde se evidencia un cambio superficial frente a la formación de estructuras carbonosas porosas

---

en función del tiempo de residencia durante la producción del mismo (Castilla-Caballero et al. 2020).

En el ítem a de la Figura 2-1 presenta el biochar obtenido en una pirólisis de 350°C y 1 hora, en esta se evidencia una estructura definida que puede hacer referencia a la lignina la cual a 350°C no ha iniciado el proceso de degradación, por lo que sería posible encontrar estas estructuras en el biochar obtenido, a diferencia de los resultados del material a temperaturas mayores (550°C y 700°C) donde no se logró identificar este tipo de estructura definida por medio de las imágenes obtenidas en el equipo.

Con los resultados obtenidos a partir del SEM, se puede observar un cambio superficial aparentemente mayor en el biochar obtenido por pirólisis de cuesco de palma a 700°C, en las figuras se puede evidenciar que el biochar de 550°C tiene una estructura más uniforme, sin embargo, en todos los casos a partir de 550°C es posible evidenciar estructuras plantas relacionadas con los enlaces doble enlace carbono, obtenidas por el proceso de pirólisis y la deshidratación de componentes, además de los poros debidos a la volatilización de elementos que hacen parte de la estructura inicial de la biomasa, los cuales salen con el proceso de pirolisis. Estos resultados deben ser contrastados por el método de Brunauer, Emmett y Teller (BET) que presenta resultados cuantitativos sobre el área superficial, el tamaño de poros y su distribución. Estos resultados permiten inferir el cambio del material lo que puede presumiblemente generar cambios en un suelo con la aplicación de dicho material.

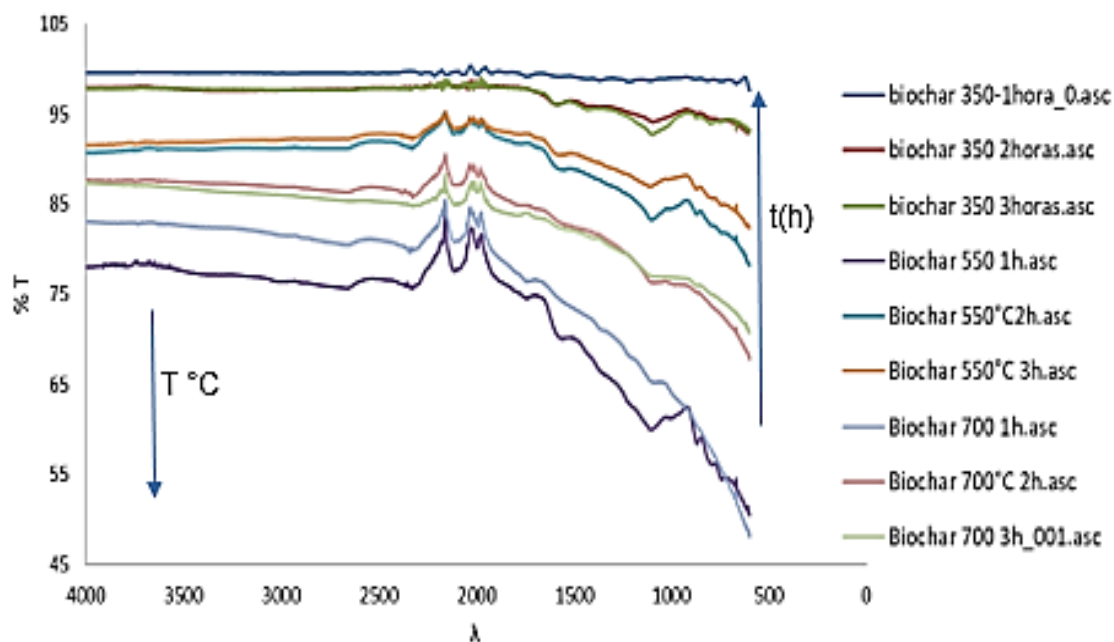
## **2.2 Análisis Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)**

Con el objetivo de determinar los cambios generados en los grupos funcionales del biochar obtenido a partir de la pirólisis lenta de cuesco de palma, se realizaron pruebas de FTIR al biochar producido a 350°C, 550°C y 700°C, y con tiempos de residencia en horno de 1, 2 y 3.

La Figura 2-2 presenta las gráficas obtenidas a partir del análisis de FTIR para cada biochar obtenido, en el eje vertical se tiene la transmitancia y en el eje horizontal se presenta la longitud de onda desde 500  $\text{cm}^{-1}$  hasta 4000  $\text{cm}^{-1}$ , en cada una de las líneas se pueden ver las vibraciones características de diferentes grupos funcionales, como son: alcoholes,

etonas, aminos, nitrilos, alquenos y ácidos carboxílicos, entre otros; estas vibraciones dependen del contenido de grupos funcionales presentes en el biochar.

**Figura 2-2.** Imágenes de FTIR del biochar a diferentes temperaturas y tiempos de residencia.



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Las muestras de biochar obtenidas en una atmósfera nitrogenada se analizaron utilizando FTIR para identificar los grupos funcionales en la superficie, todos los espectros FTIR se corrigieron con una línea de base tomada desde el equipo (Perkin Elmer), la Figura 2-2, presenta los resultados obtenidos del análisis de FTIR en los diferentes biochares, en esta se observan zonas de vibración específicas para todos los biochar analizados. La vibración de grupos funcionales, es decir los picos observados en la figura son similares para todos los biochares producidos a diferentes temperaturas y tiempos de residencia, estos grupos funcionales corresponden a alcoholes, fenoles, grupos cetónicos y carboxílicos. Las zonas identificadas son cuatro la primera entre  $3.000$  y  $2.750\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a las vibraciones de  $-\text{CH}_3$ ,  $-\text{CH}_2$ , y  $-\text{CH}$ , la segunda vibración es muy marcada entre los  $2100$  y  $2000\text{ cm}^{-1}$ , esta zona se caracteriza por tener vibración cuando hay presencia de grupos funcionales como isocianatos, alquinos, metilos, nitrilos e isométricos; la tercera zona de interés se presentó entre  $1.850$ - $900\text{ cm}^{-1}$  que corresponde a la vibración de grupos oxigenados como monóxido de carbono, hidroxilos en enlace único ( $1.350$ – $900\text{ cm}^{-1}$ ) y el

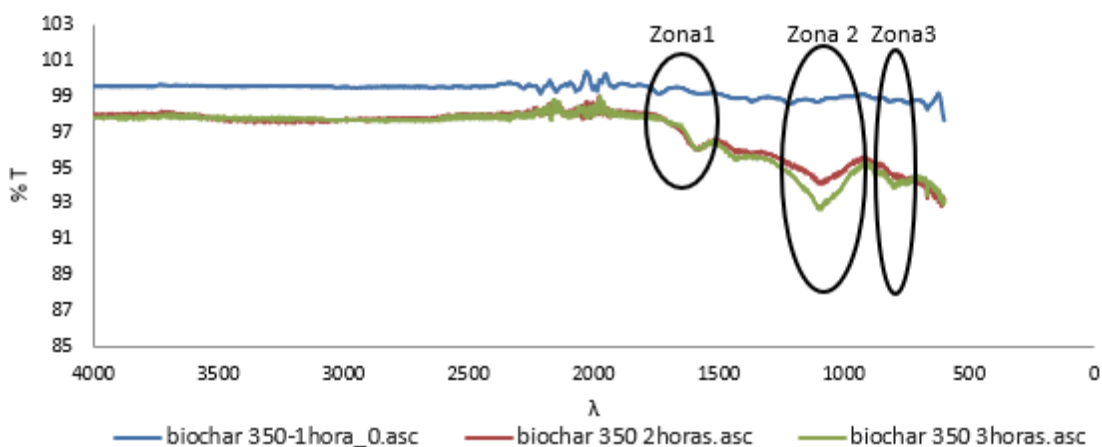
enlace y grupos ceto (C=O) ( $1.850\text{--}1.650\text{ cm}^{-1}$ ), finalmente la cuarta zona presenta una vibración característica de grupos aromáticos o sustituciones aromáticas se encuentra entre  $900\text{--}650\text{ cm}^{-1}$ . Comparado las señales obtenidas el biochar obtenido a  $550^\circ\text{C}$  con un tiempo de residencia de una hora en el reactor presentó una mayor respuesta de grupos funcionales ante la prueba de infrarrojo, lo que podría suponer una mayor concentración de los grupos anteriormente mencionados.

El análisis de FTIR para diferentes tiempos de residencia en temperatura de  $350^\circ\text{C}$ ,  $550^\circ\text{C}$  y  $700^\circ\text{C}$  se analiza a continuación:

- **Análisis de FTIR para biochar producido a  $350^\circ\text{C}$**

En la Figura 2-3 se presentan los resultados obtenidos mediante prueba de FTIR para el biochar obtenido a  $350^\circ\text{C}$ , con tiempos de residencia en horno de 1, 2 y 3 horas; esta prueba se realiza con el objetivo de identificar cambios en el material en función del tiempo de residencia.

**Figura 2-3.** Imágenes FTIR para biochar obtenido a  $350^\circ\text{C}$  durante diferentes tiempos de residencia



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Se pueden identificar en la figura 2-3 tres zonas de interés, la primera entre los  $1.946$  y los  $2.039\text{ cm}^{-1}$ , en ella se observan vibraciones pertenecientes a metileno y clorhidrato, este pico se evidencia de forma definida en el biochar producido a 1 hora, pero en los biochares obtenidos con 2 y 3 horas de residencia, los picos encontrados presentan menor intensidad en la señal, lo que podría explicarse por la pérdida de compuestos derivados de la celulosa y hemicelulosa que tienen su

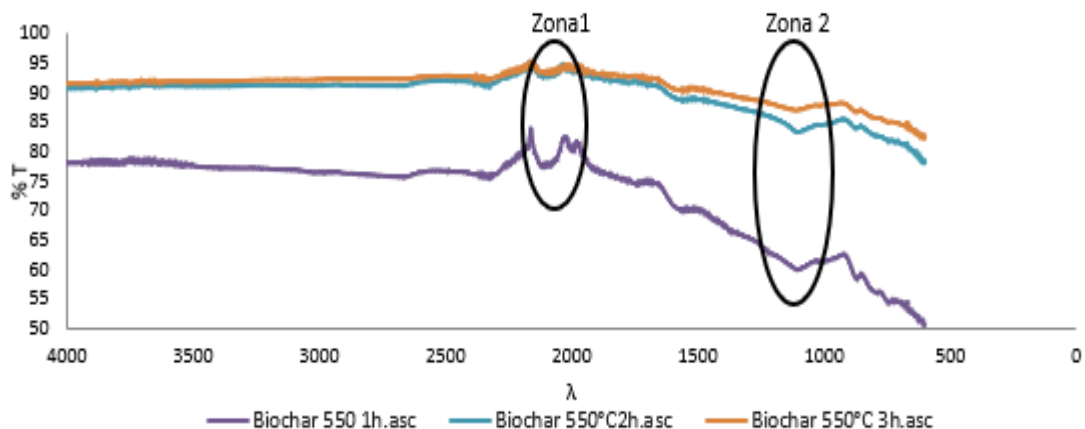
proceso de descomposición completa cerca de los 350°C en esta se tienen compuestos volátiles como hidrogeno, metano, monóxido, alquitrán, vapor de agua y dióxido de carbono, por lo que el biochar que queda posterior a esta pirólisis esta conformado por compuestos aromáticos tal como reporta Escalante et al en 2016, los componentes que van quedando en la superficie del biochar son de menor peso molecular, tienden a eliminarse luego de una hora de residencia. En la segunda zona comprendida entre 1600 aproximadamente  $\text{cm}^{-1}$ , se evidencia un aumento de grupos amino e isonitrilo a medida que aumenta el tiempo de residencia lo cual podría explicarse por la reagrupación de compuestos a oxialquilos, arilos y oxiarilos y componentes poli aromáticos, tal como lo reportan Escalante et al en 2016. En 1900  $\text{cm}^{-1}$  en donde encontró un aumento en la vibración directamente proporcional al tiempo de residencia, en este rango podemos encontrar alqueno mono sustituido, anhídridos y aminas, el mismo caso se presenta por debajo de los 1097  $\text{cm}^{-1}$ , donde se tienen principalmente alquenos sustituidos, acetilénicos y alquinos (Escalante et al. 2016).

- **Análisis de FTIR para biochar producido a 550°C**

En la este análisis pretende determinar el cambio en los grupos funcionales presentes en la superficie del biochar a partir de la transmitancia a diferentes longitudes de onda

**Figura 2-4** se presenta el resultado de FTIR para el biochar pirólizado a 550°C con tiempos de residencia de 1, 2 y 3 horas, este análisis pretende determinar el cambio en los grupos funcionales presentes en la superficie del biochar a partir de la transmitancia a diferentes longitudes de onda

**Figura 2-4.** Imágenes FTIR biochar de 550°C a tiempos de residencia



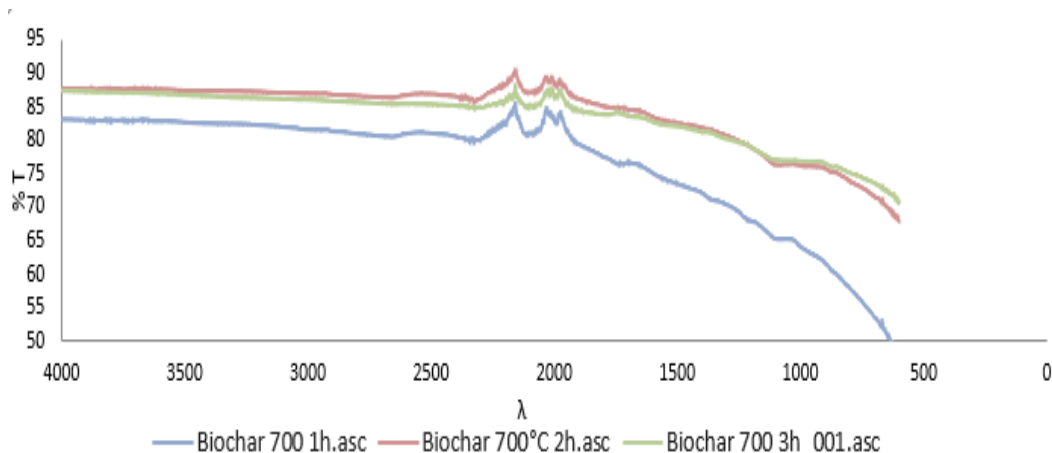
Nombre de la fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-4 se pueden identificar varias zonas de interés, la primera se tiene entre  $2.154-1.997 \text{ cm}^{-1}$ , vibración que se debe a la presencia de isocianatos, alquinos, nitrilos e isonitrilos, este pico se evidencia de forma definida en el biochar producido a 1 hora, pero para los de 2 y 3 horas este pierde su definición, el mismo caso se presenta para la zona entre  $902-823 \text{ cm}^{-1}$ , donde se tiene resonancia de alquenos y aminas, es decir grupos funcionales de alto interés se pierden con el aumento de la temperatura.

#### ▪ **Análisis de FTIR para biochar producido a 700°C**

Para realizar una comparación del tiempo de residencia para la pirólisis de cuesco de palma a 700°C, se presenta la Figura 2-5, en la cual se tiene la respuesta de FTIR para biochar de 700°C producido a 1,2 y 3 horas, se realiza esta grafica por separado por el fin de determinar la variación en los grupos funcionales para este biochar a diferentes tiempos.

**Figura 2-5.** Imágenes FTIR biochar de 700°C a tiempos de residencia



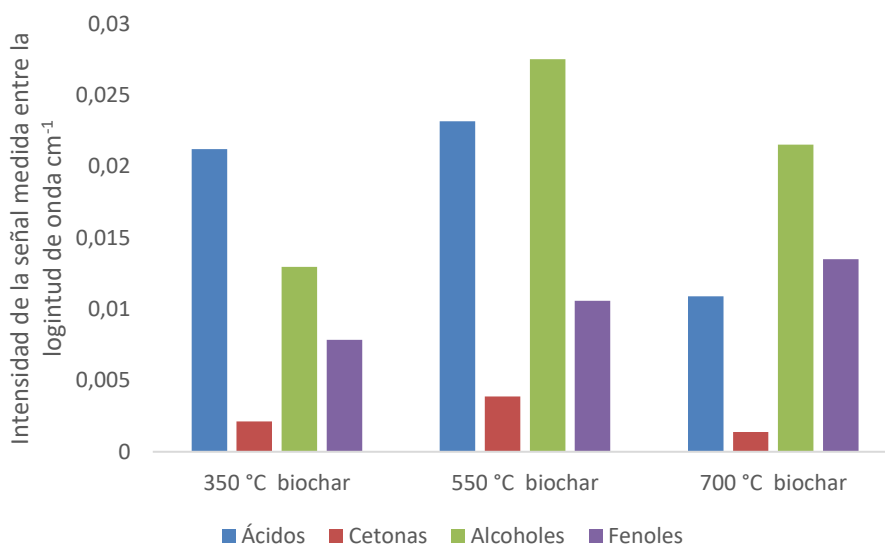
Nombre de la fuente: Elaboración propia

En el biochar pirólizado a 700°C, presentado en la Figura 2-5 no se evidencia una diferencia significativa en la vibración de los diferentes grupos funcionales presentes, sin embargo, se logra identificar una disminución en la intensidad de la señal a medida que aumenta el tiempo de residencia.

Teniendo en cuenta el análisis realizado para las diferentes temperaturas en función del tiempo de residencia presentado en las Figuras 2-3, 2-4 y 2-5, se encontró que hay una posible disminución en la intensidad de la señal de grupos funcionales con el aumento en el tiempo residencia, por lo tanto, se procede a realizar el análisis de biochar producido en una hora de tiempo de residencia. En la Figura 2-6, se realiza la comparación del biochar producido a 1 hora con variación en la temperatura de pirólisis de 350°C, 550°C y 700°C, este análisis se presenta con barras de intensidad para las cuatro zonas de interés encontradas y analizadas anteriormente, que corresponden específicamente a ácidos carboxílicos que se representan con una barra de color azul, grupos ceto o cetonas representadas con una barra de color rojo, alcoholes representados con la barra de color verde y finalmente se tiene una barra de color morado que presenta la intensidad de la señal para grupos fenólicos o aromáticos.

**Figura 2-6.** Aparición de grupos funcionales.





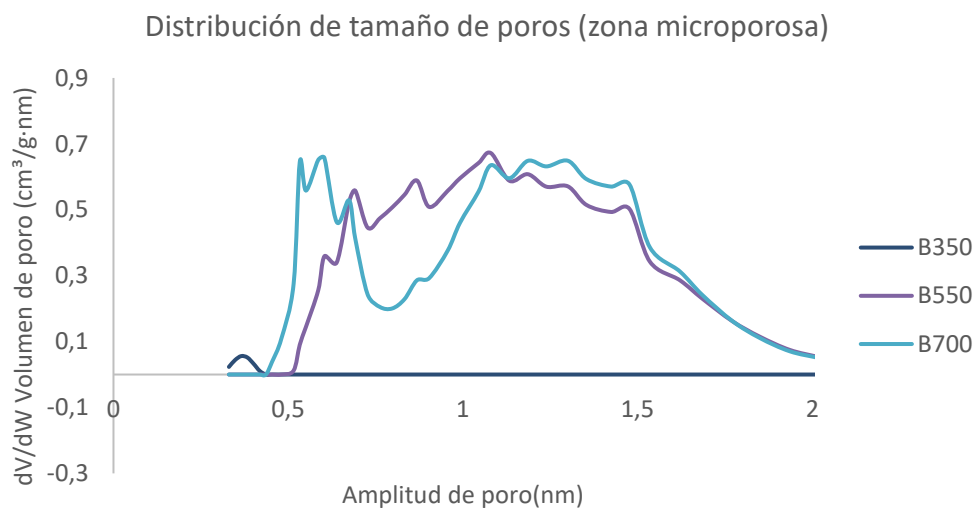
Nombre de la fuente: Elaboración propia

En la Figura 2-6 se puede observar que existe un aumento de las señales asociadas a grupos funcionales oxigenados, con el aumento de la temperatura, en el rango de 350 a 550°C, para los resultados de biochar obtenido a 700°C se evidencia una reducción en la intensidad de grupos ácidos carboxílicos, cetonas y alcoholes en comparación con el biochar obtenido a 550°C. La aparición de grupos ácidos, fenólicos, cetonas y alcoholes con temperaturas de pirólisis superiores a los 350°C corresponden a la formación de estructuras carbonáceas por reacciones de condensación de los productos de descomposición de las cadenas de celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa y hemicelulosa de la biomasa se descompone en cadenas de azúcares como la glucosa o la fructosa, debido al efecto de la temperatura, se deshidrata para formar fenoles a través de la formación de furfurales, estos fenoles se polimerizan para formar estructuras carbonáceas, los cambios en la intensidad de la señal de los grupos funcionales que se observa en la Figura 2-6, se presenta debido a los cambios de temperatura en el proceso de pirólisis. Tal como lo reportan Castilla et al en 2020, en análisis de FTIR para biochar obtenido a partir de coco encontrando vibración para materiales amorfos de estructura carbonosa, por otro lado Escalante et al en 2016 establece que el proceso de pirolisis con el aumento de la temperatura presenta cambios en la estructura química del biochar debida a la degradación térmica, volatilización de elementos y la formación estructuras por la remoción de átomos y moléculas a las diferentes temperaturas (Castilla-Caballero et al. 2020) y (Rebolledo, López, and Moreno 2016).

## 2.2.1 Pruebas BET

En cuanto a la distribución y tamaño de los poros, fue evaluada por medio de isothermas de adsorción de dióxido de carbono, en la Figura 2-7 se presenta la distribución de tamaño de microporos en la superficie del biochar producido a temperaturas de 350°C, 550°C y 700°C con 1 hora de residencia en horno; el volumen de poro es presentado en  $\text{cm}^3/\text{g}\cdot\text{nm}$  y la amplitud de poros en nm. En color azul oscuro se presenta el resultado para el biochar de 350°C, en color morado para 550°C y en color azul claro para 700°C.

**Figura 2-7.** Distribución de microporosidad



Nombre de la fuente: Elaboración propia

En esta prueba se observa un incremento en el volumen de poros con el aumento de la temperatura, iniciando con el biochar obtenido a 550°C que presenta un 60% de volumen de poros en tamaños entre 0,5 y 0,75 nm, caso similar a el biochar obtenido a 700°C con una hora de tiempo de residencia. En el caso del biochar obtenido a 350°C línea azul oscura solo se presenta un pequeño pico entre 0,4 y 0,5 nm, en esta etapa se tiene la degradación de celulosa y se presenta la formación de anillos aromáticos, sin embargo al tener aún estructuras de lignina, el área de microporos no es significativa, a medida que aumenta la temperatura y se llega a 550°C, se inicia la degradación de la lignina, además, se pueden dar reacciones de sinterización y liberación de componentes volátiles de alto peso molecular, lo que se traduce en un aumento en los espacios disponibles, es decir en la cantidad de microporos presentes en el biochar (Bouchelta et al. 2012).

En cuanto al biochar producido a 700°C, se evidencia de forma cuantitativa que tiene un mayor volumen de poros, se determinó que a medida que aumenta la temperatura hay un mayor número de poros, este resultado concuerda con el análisis realizado por espectroscopía electrónica de barrido (SEM) para el biochar obtenido con 1 hora de tiempo de residencia, donde se evidenció una mayor cantidad de poros con el aumento de la temperatura (Figura 2-1).

### 2.2.2 Pruebas de capacidad de intercambio catiónico-CIC

La capacidad de intercambio catiónico busca determinar las cargas negativas disponibles en el biochar para adsorber temporalmente cationes o retener algunos elementos de interés, esto se puede cuantificar determinando las bases intercambiables  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{NH}_4^+$  tomando como punto de partida el pH, el método utilizado para este proceso será el de capacidad de intercambio a pH 7 utilizando  $\text{NH}_4\text{OAc}$ .

Para el ensayo de CIC del biochar obtenido a temperaturas de 350°C, 550°C y 700°C con una hora de tiempo de residencia, posterior a esto, se seleccionó el biochar obtenido a 550°C durante una hora de residencia en horno y se realizó su aplicación en una dosificación de 8 ton/ha en suelos orgánico y arenoso con y sin fertilización en cada caso, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 2-1

**Tabla 2-1:** Resultados pruebas de CIC. Elaboración propia

Temperatura de obtención de biochar	CIC (meq/100g)
350 °C	1,40
550°C	2,37
700 °C	2,20
Aplicación en suelos	
Suelo orgánico	21,41
Suelo orgánico + Biochar	22,26
Suelo orgánico + Biochar + Fertilizante	23,82
Suelo arenoso	3.58
Suelo arenoso + Biochar	4.38
Suelo arenoso + Biochar + Fertilizante	4.47

Inicialmente se realizó el análisis para el biochar donde se pudo identificar que el obtenido a 550°C tiene mayor CIC con un valor de 2.37 con respecto a los resultados obtenidos

para los otros dos biochar, es decir, el biochar producido a 550°C con una hora de tiempo de residencia presenta una mayor cantidad de grupos funcionales (evidenciados en el FTIR) que presentan cargas iónicas disponibles para procesos de intercambio con la solución del suelo.

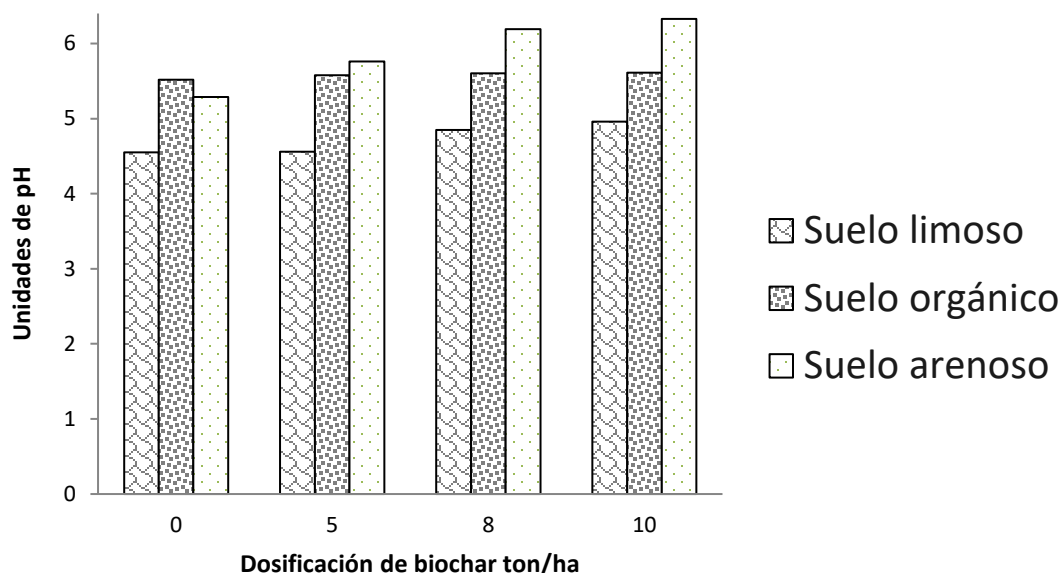
Una vez realizada la selección, se procedió a evaluar su aplicación tanto en suelos orgánicos como en suelos arenosos, estos resultados son presentados en la segunda parte de la Tabla 2-1, en donde se puede observar que la aplicación de biochar a una dosis de 8 ton/ha tanto en suelo arenoso como en suelo orgánico presenta un incremento en la CIC la cual se ve mejorada con la aplicación de fertilizante en ambos casos. Es importante mencionar que la diferencia entre la CIC del suelo orgánico y la CIC del suelo arenoso, se debe a la reactividad de la fracción sólida mineral del suelo y la procedencia de las micelas coloidales del suelo, en cuyo caso las micelas orgánicas pueden presentar una mayor actividad química como lo presenta Jaramillo, 2000 en sus estudios de la ciencia del suelo (Jaramillo 2000).

### **2.2.3 Pruebas de PH**

Se evaluó el cambio de pH por la aplicación de biochar en suelo arenoso, suelo limoso y suelo orgánico, para ello se aplicó el método potenciométrico, relación suelo-agua en 1:1, la cual consiste en tomar 1 gramo de agua destilada y 1 gramo de suelo, para tener una proporción 1:1 posteriormente se agita la mezcla durante 3 minutos, y se evalúa con el potenciómetro, previamente calibrado, introduciendo la muestra en el electrodo, luego se toma la lectura de pH cuando se estabiliza.

La Figura 2-8, presenta los cambios obtenidos en el pH, cuando se tiene aplicación de biochar obtenido a 550°C con una hora de tiempo de residencia en diferentes tipos de suelo, la aplicación del biochar se realizó con dosificaciones de 0, 5, 8 y 10 ton/ha en suelos de condición arenoso, limoso y orgánico, estas medidas se tomaron por triplicado, además, se realizó un análisis estadístico de varianza para determinar el nivel de confianza de la medición (detalle del análisis estadístico en anexo 3).

**Figura 2-8.** Resultados de variación en pH con aplicación de biochar.



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Los resultados de la Figura 2-8, evidencian un aumento en el pH de los suelos con la aplicación de biochar a diferentes dosificaciones, en el caso del suelo arenoso, se presenta un cambio significativo, donde se logra incrementar el pH en una unidad, esto puede ser consecuencia de la baja reactividad y capacidad buffer de este suelo, posteriormente se tiene el suelo limoso en el cual se presentó un aumento de 0.5 unidades de pH con la aplicación de biochar, este tipo de suelo al no tener presencia significativa de materia orgánica presenta baja capacidad buffer, por lo que también es posible evidenciar un cambio significativo con el aumento en las dosificaciones del biochar, finalmente en el suelo orgánico debido a la alta capacidad buffer el efecto del biochar en el pH presentó un incremento de 0.2 unidades mucho menor al logrado en los otros tipos de suelo, sin embargo de manera global se determinó que para los tres tipos de suelo trabajados la aplicación de biochar a partir de 8 ton/ha presenta un incremento del pH del suelo.

Los resultados se analizaron de forma estadística por medio de un análisis de varianza para el pH con el cual permite definir si existen diferencias estadísticamente significativas, se obtuvo un valor p de 0,0000 para el efecto del tipo de suelo, mientras que para las dosis de biochar el valor p fue de 0,2616, teniendo en cuenta que se eligió la suma de cuadrados tipo III como método de análisis donde un valor de p inferior a 0,05 representa que existe una diferencia estadísticamente significativa en el pH de las muestras comparadas, con un

nivel de confianza del 95%, es decir, fue posible determinar que el cambio en el pH por aplicación de biochar se debe principalmente al tipo de suelo en el que se aplica (detalle del análisis estadístico en anexo 3).

Este resultado es prometedor ya que la acidez del suelo es un tema de interés en la actualidad debido a que es un comun denominador en los suelos destinados a actividades agrícolas, lo que causa una disminución en la calidad del cultivo por lo que se deben aplicar tratamientos o enmiendas para regular el pH, actualmente la regulación en el pH del suelo se hace por medio de enmienda tradicional con procesos de encalado sin embargo, se puede presentar la aplicación del biochar como una alternativa promisoría para estos procesos.

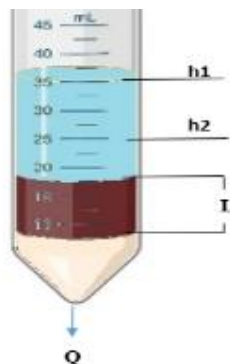
#### **2.2.4 Pruebas de retención de humedad**

La permeabilidad se define como la capacidad de un material para permitir que un fluido fluya a través de él sin afectar su estructura, esto depende de la porosidad del material, densidad de fluido y presión a la que está sometido, su cálculo se realiza teniendo en cuenta la ley de Darcy que describe el flujo en medios porosos, en este caso tomando como referencia la prueba de campo para el bombeo de pozos, la permeabilidad se determinó como:

$$k = \frac{Q*L}{\Delta h*A} \quad (2.1)$$

Donde Q es el caudal en la salida, A el área transversal de la muestra, h1 la altura superior del agua y h2 el punto donde caerá el agua, es decir delta de h es la presión de cabeza.

**Figura 2-9.** Esquema pruebas de permeabilidad

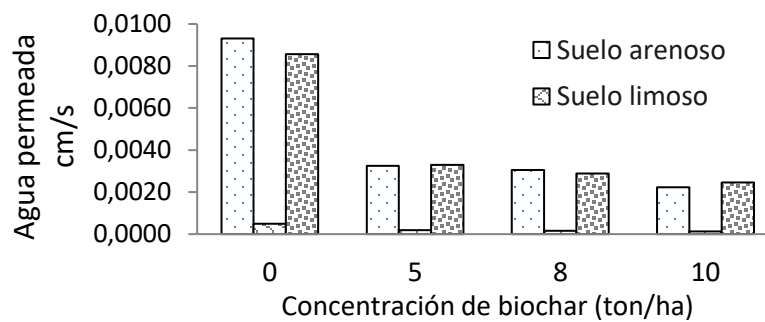


Nombre de la fuente: Elaboración propia

El procedimiento consistió en tomar un reactor perforado sellado con parafilm, añadiendo el material inerte hasta el comienzo de L, luego la muestra de suelo se adiciona hasta una altura definida L, luego se agrega agua progresivamente, hasta lograr saturación del suelo y que el nivel del agua agregada no disminuya en el nivel superior, en este punto se define una altura h1 para el nivel inicial del agua y un punto h2 (nivel en el que se refleja una disminución cuando el agua filtra a través de la columna de suelo), con los puntos h1 y h2 definidos y el nivel del agua en h1 se hace un agujero en el parafilm y se toman el volumen de agua filtrado y el tiempo de salida del caudal medido, finalmente el cálculo de permeabilidad se realiza con la ecuación 1.

En la Figura 2-10 se presentan los resultados obtenidos para la permeabilidad de tres tipos de suelo, suelo orgánico, arenoso y limoso al cual se le aplicaron dosis de 0, 5, 8 y 10 toneladas por hectárea de biochar producido a partir de cuesco de palma con una temperatura de 550°C con un tiempo de residencia de 1 hora.

**Figura 2-10.** Resultados pruebas de permeabilidad con aplicación de biochar en diferentes dosis



Nombre de la fuente: Elaboración propia

La aplicación de biochar en suelos a diferentes dosificaciones tiene un efecto en la cantidad de agua permeada para los tres tipos de suelos, en estos se presenta una disminución como se puede observar en Figura 2-10, este resultado significa que se tiene una mayor retención de humedad a medida que aumenta la dosificación de biochar de 0 a 10 toneladas por hectárea, el cambio principal se da en los suelos arenoso y orgánico, en ambos se da una reducción aproximada de 0.060 cm/s de agua permeada, en cuanto al suelo limoso se mantiene la misma tendencia de reducción en el agua permeada, sin embargo en este tipo de suelo no es posible ver un cambio significativo, por lo general los suelos limosos están compuestos por partículas que varían entre 0.02 y 0.002 mm, las cuales pueden formar estructuras o tener la formación de películas plásticas que retienen alta cantidad de agua (Casanova 1991).

Para el análisis de permeabilidad, se evaluó estadísticamente la variación en la dosis de biochar con 0, 5, 8 y 10 toneladas por hectárea, estos datos se analizaron por duplicado y se utilizó el método de diseño multifactorial categórico, donde se tomaron como factores independientes la dosis de aplicación del biochar y el tipo de suelo con un total de 24 corridas, donde se determinó que el valor P tanto para la dosis del biochar como para el tipo de suelo fue en ambos casos 0.0000 teniendo esto en cuenta y considerando que se ha elegido la suma de los cuadrados tipo III, los valores P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Dado que 3 valores P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%; En otras palabras, tanto la dosis aplicada del biochar como el tipo de suelo son factores estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95% (detalle del análisis estadístico en anexo 3).

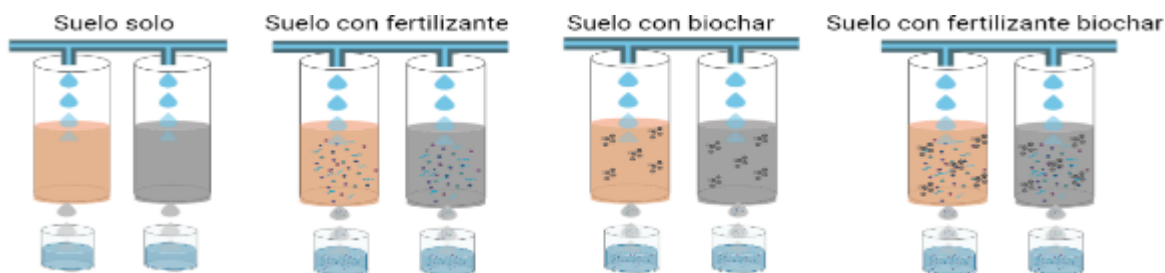
Los resultados obtenidos en el análisis de permeabilidad presentan un panorama prometedor principalmente para los suelos arenosos, ya que estos debido a su baja retención de humedad presentan problemas de fertilidad, por lo que se podría plantear la aplicación de biochar como una alternativa para la mejora en la retención de humedad de suelos arenosos.



## 2.2.5 Prueba de permanencia de nutrientes en el suelo con aplicación de biochar

Para determinar la permanencia de los nutrientes en el suelo debido a la aplicación de biochar, se realizaron pruebas a partir de un montaje experimental con combinaciones de suelo arenoso/biochar y suelo orgánico/biochar, aplicando el biochar obtenido a 550°C con una hora de tiempo de residencia y una dosificación de 8 ton/ha. Esta dosificación se seleccionó debido a los resultados positivos obtenidos para la retención de humedad y el incremento en el pH de los suelos ensayados. El fertilizante empleado fue triple 15, con contenido de N, P y K como macronutrientes principales la dosificación fue de 1.8 ton/ha según las recomendaciones de uso del producto; en la Figura 2-11 se presenta el montaje experimental, a través del cual se evaluaron dos tipos de suelo, suelo orgánico y suelo arenoso, ambos se trataron con las mismas dosis de biochar y de fertilizante. Durante el ensayo se realizaron lavados intermitentes para verificar la eliminación de nutrientes vía lixiviación. Los cambios en contenido de nutrientes de la fase sólida se evaluaron a los 0 y 60 días y la fase líquida se evaluó en los días 0, 5, 15, 30 y 60.

**Figura 2-11.** Montaje pruebas en suelo con aplicación de biochar.



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos de este análisis experimental tienen como objetivo evaluar la pérdida de nutrientes como potasio ( $K^+$ ), fósforo ( $PO_4^+$ ), Calcio ( $Ca^{+2}$ ), Magnesio ( $Mg^+$ ) y nitrógeno ( $NH_4^+$  y  $NO_3^-$ ), por lixiviado o la permanencia de los mismos en la fracción sólida del suelo, en diferentes tipos de texturas, debido a la aplicación de biochar. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

### **Análisis de fracción sólida:**

En las Tabla 2-2 y Tabla 2-3 se presentan los resultados obtenidos para el análisis de macronutrientes presentes en la fase sólida del suelo para el suelo arenoso y orgánico

respectivamente, el análisis de Calcio, magnesio y potasio se realizó por medio de bases intercambiables con acetato de amonio al 1 molar a pH 7, en el caso del fósforo se realizó por medio del método estar Bray II, finalmente el nitrógeno presente en el suelo en forma de nitrito se evaluó por medio de sulfato de aluminio al 0.025 molar.

▪ **Resultados en suelo arenoso**

Los resultados presentados en la Tabla 2-2 se dividen en dos bloques para cada macronutriente, el primer bloque presenta el análisis del suelo con un lavado, el día cero del montaje experimental, posterior a esto se realizaron lavados de la columna de suelo los días 5, 15, 30 y 60, luego del último lavado se tomó la muestra de suelo del día 60 para evaluar los macronutrientes la respuesta de esta se puede observar en el segundo bloque. En este la abreviación S/A hace referencia al suelo arenoso, específicamente la fase sólida, los complementos SS, SF, SB y SBF hacen referencia a suelo solo sin aplicación de biochar o fertilizante, suelo con aplicación de fertilizante a 1.8 ton/ha, suelo con aplicación de biochar a 8 ton/ha y suelo con aplicación de biochar a 8 ton/ha y fertilizante a 1.8 ton/ha respectivamente.

**Tabla 2-2:** Resultados pruebas suelo arenoso. Elaboración propia

	S/A -SS	S/A-SF	S/A-SB	S/A-SBF
<b>K</b>				
Día 0	15,64	2846,36	15,64	2463,19
Día 60	11,73	82,11	15,64	86,02
<b>Ca</b>				
Día 0	2,52	11,55	2,13	10,36
Día 60	1,87	0,10	2,12	21,00
<b>Mg</b>				
Día 0	0,91	3,97	0,76	3,76
Día 60	0,77	0,27	0,83	0,35
<b>P</b>				
Día 0	0,01	0,05	0,02	0,13
Día 60	0,09	0,43	0,05	0,47
<b>NO3-</b>				
Día 0	43,75	545,00	39,75	6500,00
Día 60	2,39	2,95	2,80	3,50

En los análisis realizados en la matriz sólida del suelo arenoso presentados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se encuentran cambios en los diferentes nutrientes con la aplicación del biochar, específicamente cuando se analiza el suelo con aplicación de biochar con respecto al suelo solo se evidencia una estabilidad de Calcio, Fosforo, Potasio y Magnesio en función del tiempo, es decir los elementos se mantienen en un valor que no varía de forma significativa entre los días cero y sesenta; Otro caso puntual se puede evidenciar cuando se analiza el suelo con fertilizante y el suelo con fertilizante y biochar, para el calcio y el fósforo se presenta un aumento del elemento en ambos casos, sin embargo, se evidencia un aumento mayor cuando se tiene la aplicación del biochar y el fertilizante (SBF) con un porcentaje de incremento de 51% y 72% respectivamente, en cuanto al nitrógeno se tiene un consumo de este elemento en todos los casos, para el nitrato a los 60 días se podría decir que sin importar la aplicación inicial se tiene un valor similar cercano a 20 mg/l, por lo tanto para este nutriente en la fracción sólida del suelo se podría decir que no existe un efecto significativo de la aplicación de biochar.

En términos generales se podría decir que hay un efecto del biochar en el contenido de nutrientes en la fase sólida del suelo a excepción del nitrato, con el paso del tiempo en los suelos arenosos se van generando cambios en el comportamiento de los macronutrientes, ya sea manteniendo estable el elemento con el paso del tiempo o aumentando su concentración.

#### ▪ **Resultados en suelo orgánico**

En la Tabla 2-3 se presentan los resultados del análisis de la fase sólida del suelo orgánico estos se realizaron los días 0 y 60, por lo que se presentan los resultados en dos bloques para cada uno de los macronutrientes evaluados, al igual que en suelo arenoso el primer bloque presenta el análisis del suelo el día cero posterior a un lavado, y la segunda columna hace referencia a la fase sólida en el día 60, recolectada después de realizar lavados los días 5, 15, 30 y 60, este montaje experimental y las pruebas realizadas en la fase sólida se realizaron con el objetivo de evaluar la respuesta de macronutrientes presentes en el suelo (calcio, fosforo, nitrógeno, potasio y magnesio), para este se evaluó S/O-SS suelo orgánico solo sin aplicación de biochar o fertilizante (barra azul), S/O-SF suelo orgánico con aplicación de fertilizante al 1.8 ton/ha (barra roja), S/O-SB suelo orgánico con

aplicación de biochar a 8 ton/ha (barra verde) y S/O-SBF suelo orgánico con aplicación de fertilizante y biochar con dosis de 1.8 y 8 ton/ha respectivamente (barra morada).

**Tabla 2-3:** Resultados pruebas suelo arenoso. Elaboración propia

	S/O -SS	S/O-SF	S/O-SB	S/O-SBF
<b>K</b>				
Día 0	1305,88	437,90	1415,36	1321,52
Día 60	1083,02	1915,82	1215,96	1274,60
<b>Ca</b>				
Día 0	13,64	0,44	14,12	10,70
Día 60	14,90	12,07	16,30	12,61
<b>Mg</b>				
Día 0	4,43	0,42	4,52	3,89
Día 60	4,13	4,16	4,50	3,52
<b>P</b>				
Día 0	0,03	3,38	0,01	0,05
Día 60	0,12	0,14	0,11	0,12
<b>NO3-</b>				
Día 0	87,00	1837,50	1835,00	3150,00
Día 60	9,33	2575,00	14,78	312,50

En la Tabla 2-3 se presentan los resultados del análisis de la fase sólida del suelo orgánico para los macronutrientes principales presentes en el suelo, en el caso específico del potasio para el día 60 cuando se tiene aplicación de biochar y biochar fertilizante se llega a un valor cercano de 1215 y 1274 mg/l respectivamente, estos valores son mayores a los alcanzados en el caso del suelo solo y el suelo con fertilizante, por lo que la aplicación de biochar en este caso tiene un efecto en la cantidad del nutriente disponible en la fase sólida para el día 60.

Para el calcio se presenta un incremento en todas las evaluaciones realizadas, cuando se tiene la aplicación del biochar y se compara con el suelo solo, se tiene un incremento de 13% y 8% respectivamente, en este caso la aplicación del biochar logra superar el aumento del elemento en un 5%, analizando el valor numérico el suelo con biochar termina el día 60 de 16.3 mg/l se puede decir que la aplicación de biochar podría generar un aumento en la cantidad de calcio en la fase sólida del suelo logrando estar por encima de los demás escenarios evaluados, sin embargo

---

cuando se da aplicación de fertilizante el aumento para el suelo con fertilizante y biochar no es significativo., en el caso del fósforo no se logra evidenciar un cambio significativo con la aplicación del biochar.

En el caso del magnesio, el suelo con aplicación de biochar después de 60 días logra mantener la concentración por encima de los demás, con un valor de 4.5 igual que el inicial, el valor con aplicación de biochar se mantiene estable en el tiempo, sin embargo, cuando se analiza el suelo con biochar y fertilizante, no se evidencia esta misma estabilidad del nutriente.

El fósforo con aplicación de biochar se presenta un aumento del 90% para el día 60, para el caso de suelo con biochar y fertilizante se tiene un incremento de 60%, sin embargo en todos los casos se alcanza a llegar a un valor cercano a 0.1 mg/l por lo que a los 60 días no se tiene diferencia significativa entre los diferentes escenarios propuestos, sin embargo se hace evidente que en el suelo solo con aplicación de fertilizante se pierde mas del 96% del contenido de fosforo debido a los procesos de lixiviación.

Para el nitrógeno presente en el suelo como nitrato inicialmente el suelo con aplicación de biochar con o sin fertilizante para el día cero está por encima de la concentración de los otros escenarios, incluso comparando el suelo con biochar y el suelo con fertilizante el valor de ambos es similar, por lo que se da un aumento en la cantidad inicial del elemento debida a la aplicación del biochar, es decir se presenta una tendencia de incremento del elemento posiblemente por la presencia de grupos amino e isonitrilos , los cuales se encontraron en el biochar de 550°C a una hora por medio del análisis de FTIR; sin embargo, con el paso del tiempo se tiene una disminución que en todos los casos supera el 90% de perdida asociada a la solubilización del elemento y el paso del mismo a la solución del suelo, en términos generales se puede considerar un resultado positivo de la aplicación de biochar para la disponibilidad de nitrato en suelo.

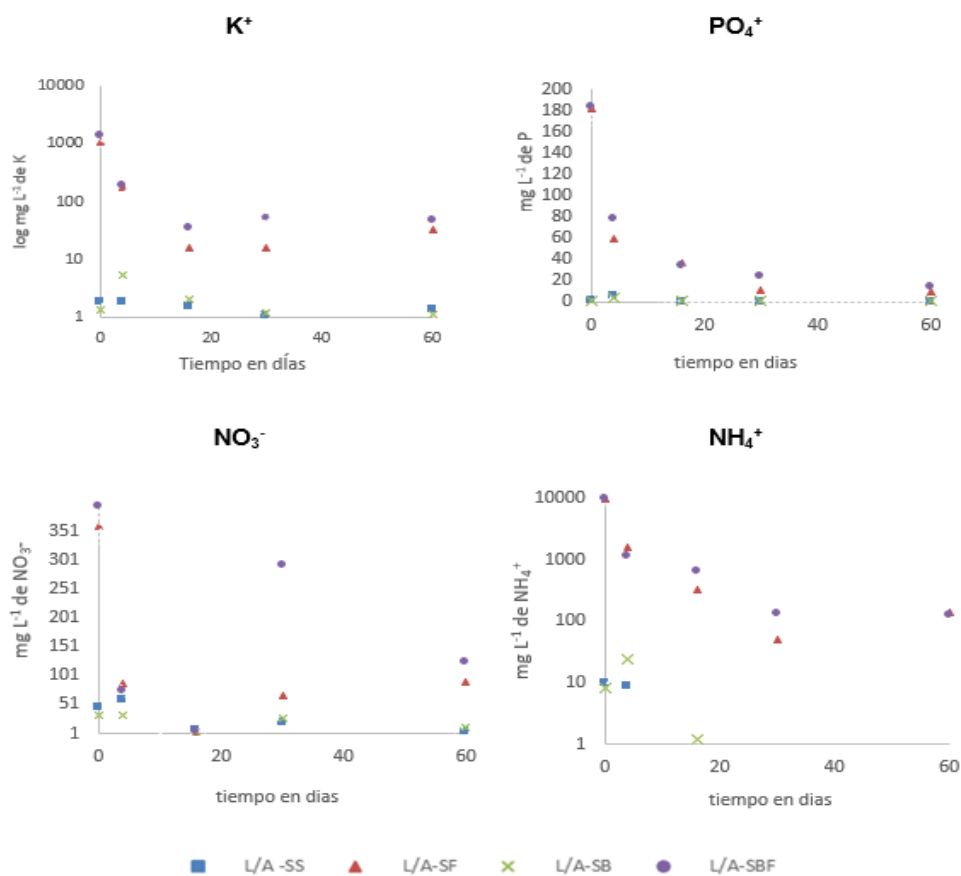
#### **Análisis de fracción líquida:**

Se realizó el análisis de la fracción líquida, los días 0, 5, 15, 30 y 60, el lixiviado se tomó pasando 250ml a través de la columna de suelo, este análisis se realizó tanto para suelo arenoso como para suelo orgánico.

▪ **Resultados lixiviado suelo arenoso**

En la Figura 2-12 se presenta el resultado obtenido para los macronutrientes más importantes en el suelo, potasio, fosforo evaluado como potasio y nitrógeno evaluado como nitrito y amonio, estos fueron evaluados la fase liquida lixiviada del suelo arenoso, el resultado presenta el análisis en función del tiempo para los días 0, 5, 15, 30 y 60, en la gráfica se tienen 4 patrones diferentes, L/A-SS representa el lixiviado a través del suelo arenoso con suelo solo sin aplicación de biochar, L/A-SF lixiviado para suelo con fertilizante dosificado en 1,8 ton/ha, L/A-SB lixiviado para suelo arenoso con aplicación de biochar a 8 ton/ha, y L/A-SBF es el lixiviado para el suelo arenoso con aplicación de biochar y fertilizante a 8 y 1.8 ton/ha respectivamente.

**Figura 2-12:** Resultados pruebas de lixiviado para suelo arenoso con aplicación de biochar.



Nombre de la fuente: Elaboración propia

---

Evaluando el lixiviado del suelo arenoso se evidenció en la Figura 2-12 que la aplicación de biochar representada por la x de color verde en el suelo arenoso, genera un leve incremento en la disponibilidad comparando el suelo con aplicación de biochar con o sin fertilizante con respecto al suelo sin aplicación de biochar con o sin fertilizante, con el paso del tiempo se tiene que la muestra con aplicación de biochar tiene mayor concentración del nutriente, a pesar de que en todos los casos se da una disminución de la disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo, cuando se tiene biochar esta disminución es menor; para el potasio cuando se tiene aplicación de biochar solo se da una disminución del 14% comparada con el 23% de reducción para el suelo solo y 97% para el suelo con fertilizante; en cuanto al fósforo cuando se tiene aplicación de biochar se da una disminución del 75% mientras en el suelo solo y suelo con fertilizante son de 79% y 95% respectivamente; finalmente para el nitrato se tiene una disminución de 68% cuando se aplica biochar comparada con 93% para suelo solo y 75% para suelo con aplicación de fertilizante. Es decir, la aplicación de biochar permite disminuir el porcentaje de pérdida de nutrientes en el tiempo.

en cuanto al nitrógeno, cuando se aplica fertilizante y biochar se puede evidenciar un aumento en la disponibilidad de nitrógeno entre los días 20-50, específicamente para el nitrato, en estos casos se mantiene por encima el valor de la concentración durante este periodo de tiempo, sin embargo, después de esto continua con la pérdida del elemento.

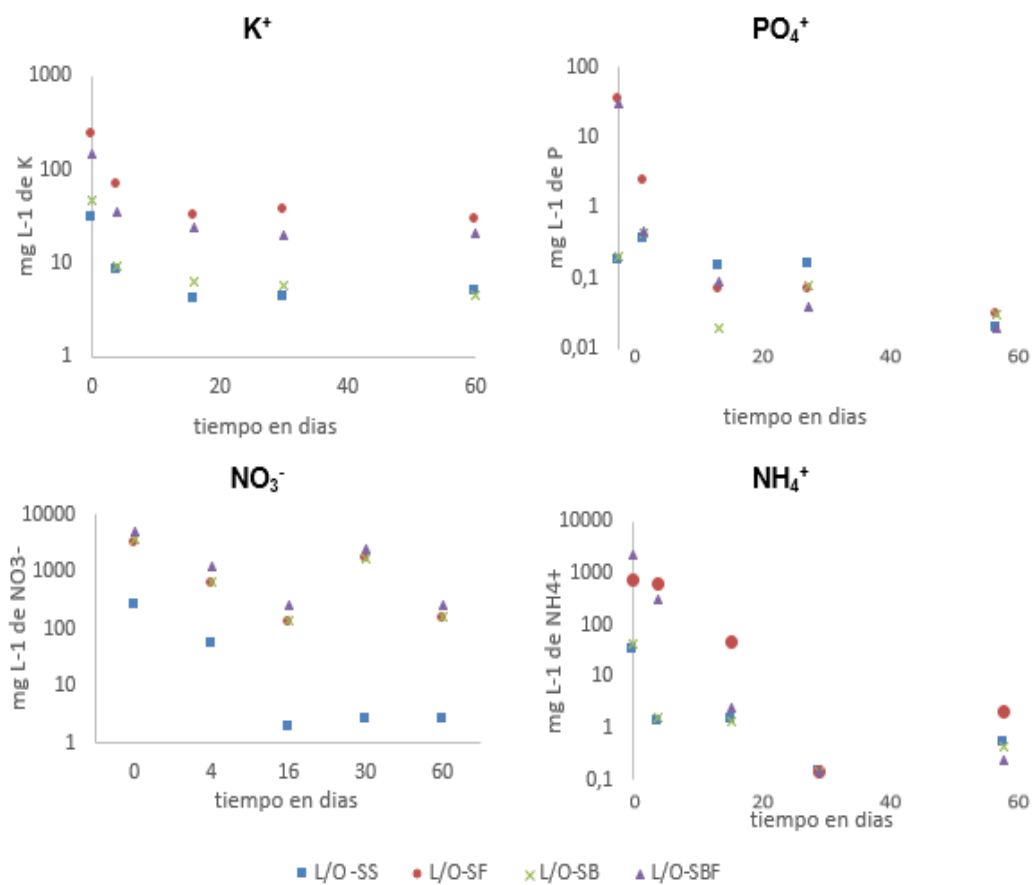
En el caso del potasio con o sin aplicación de biochar a los 60 días se llega el mismo valor de concentración (1.2 mg/l), solo se ve un pequeño incremento cuando se tiene fertilizante y biochar, por lo que se podría decir que no se tiene un efecto significativo con la aplicación del biochar para el suelo arenoso en la disponibilidad de potasio.

Finalmente analizando la aplicación de fertilizante siempre se tiene una cantidad mayor al inicio en el día cero, este se pierde con rapidez hasta un valor menor el cual se mantiene en el tiempo.

▪ **Resultados lixiviados en suelo orgánico**

En la Figura 2-15, se presentan los resultados relacionados con la evaluación de macronutrientes principales del suelo para el lixiviado del suelo orgánico, la evaluación en la solución del suelo permite cuantificar la cantidad de macronutrientes que estarían disponibles para las plantas, en este la abreviación L/O hace referencia al lixiviado del suelo orgánico, SB hace referencia a la aplicación de biochar dosificado a 8 ton/ha, SF a suelo con aplicación de fertilizante dosificado a 1.8 ton/ha, SBF representa el suelo orgánico con aplicación de biochar a 8 ton/ha y fertilizante dosificado en 1.8 ton/ha.

**Figura 2-13:** Resultados pruebas lixiviación de suelo orgánico con aplicación de biochar.



Nombre de la fuente: Elaboración propia



---

Evaluando el lixiviado del suelo orgánico se evidenció en la Figura 2-13, que la aplicación de biochar al igual que en el suelo arenoso presenta un aumento en la disponibilidad de los nutrientes cuando se evalúa el suelo con aplicación de biochar con respecto al suelo solo, en todos los casos se evidencia que se mantiene por encima la disponibilidad de los macronutrientes en la solución del suelo orgánico, el caso más interesante es el del nitrato donde se iguala la disponibilidad del biochar a la del suelo con fertilizante, esto puede ser debido a la presencia de grupos funcionales del biochar que pueden fomentar la disponibilidad de nitrógeno en la solución del suelo.

Otro punto importante en cuanto al nitrógeno es el aumento en el día 30 cuando se tiene presencia de fertilizante, este comportamiento se puede deber al efecto de la CIC en el suelo orgánico, la cual puede generar complejos los cuales a medida que hay cambios en el pH se puede dar una liberación de elementos, con el aumento de cargas negativas, este cambio en las cargas genera un aumento en la acidez, y puede generar una disminución en la CIC del biochar, generadas por la disociación de la materia orgánica a pH mayor a 6, algunos autores como por Bear et al 1964, Casanova 1991 y Jaramillo 2000 presentan en sus textos la formación de complejos en el suelo (BEAR 1964; Casanova 1991; Jaramillo 2000).

Evaluando el suelo con aplicación de biochar y fertilizante, con respecto al suelo con fertilizante, se tiene un efecto positivo con el nitrato, el cual presenta un incremento significativo, además el suelo con aplicación de biochar se mantuvo por encima del valor suelo con fertilizante, es decir la aplicación de biochar en suelo orgánico logra mantener una mayor disponibilidad de nitrato con o sin fertilizante.

En la Figura 2-13 se puede observar que después de 60 días en las muestras con aplicación de fertilizante aún se conserva una cantidad de nutriente disponible para ser absorbido por la planta. En el caso del amonio la cantidad final del nutriente es casi igual sin importar si se dio o no adición del biochar esto se puede deber a que este elemento es volátil y se pierde fácilmente, otro nutriente que disminuye drásticamente es el fósforo, inicialmente cuando se aplica el fertilizante es posible que una cantidad de este elemento pueda quedar en la solución del suelo.

Si se realiza la comparación entre los resultados de lixiviación del suelo arenoso y los resultados de lixiviación del suelo orgánico, en la Figura 2-12 se logra evidenciar un comportamiento similar de los nutrientes, todos tienen una pérdida asociada al proceso de lixiviación, que según los reportes de la literatura representa cerca del 80%, en el caso del amonio se presenta una diferencia significativa que puede ser asociada a la actividad microbiana, como el caso de la bacteria *Azotobacter spp*, quien aporta a los procesos de nitrificación o procesos de oxidación del amonio en suelo, en el suelo arenoso al no tener presencia de microorganismos la cantidad de amonio se mantiene más estable, en caso del suelo orgánico se tiene un consumo significativo de este nutriente, esto es acorde con lo expuesto por Osorio en su libro microorganismos del suelo y su efecto sobre la disponibilidad de nutrientes (Osorio 2014b).

En los resultados obtenidos por medio de la caracterización y aplicación de biochar en suelos se obtienen resultados que muestran un efecto positivo en la aplicación del biochar tanto en suelos arenosos como orgánicos, este efecto se evidencia en la mejora de parámetros como retención de humedad, permeabilidad, capacidad de intercambio, disponibilidad de nutrientes tanto en la fase sólida del suelo como en el lixiviado, además de aumento en el pH, por lo tanto la aplicación de biochar proveniente de cuesco de palma en suelos agrícolas y arenosos, es una alternativa promisorio para el aprovechamiento de residuos agroindustriales enfocada en el mejoramiento de suelos.

### 3. Modelo matemático y simulaciones

Algunas investigaciones presentan avances relacionados con modelos matemáticos que incluyen parte de la dinámica del suelo y los nutrientes, a continuación, se tiene el planteamiento de ecuaciones presentadas que relacionan diferentes parámetros de la dinámica del suelo, sin interacción de biochar la cual se tomará como base para iniciar el planteamiento del modelo matemático de aplicación de biochar en suelos.

El estudio del suelo realizado por Roose y Fowler, parte de la ecuación de conservación de masa como base del modelo, donde se considera que el agua que ingresa al suelo puede ser absorbida por la raíz, esta se acopla a la ley de Darcy la cual modela el proceso de infiltración en suelos verticales; A partir de esto utiliza la ecuación de Richards para establecer el flujo de agua en el suelo que actúa como un medio poroso y el proceso de absorción de agua por parte de la raíz. Este modelo presenta la adaptación del modelo inicial propuesto por Nye, Tinker y Baber, en el que se presenta la absorción clásica de nutrientes por parte de las plantas, este se modificó teniendo en cuenta una ecuación que integra fenómenos difusivos y convectivos, además de aplicar la ecuación no a una raíz cilíndrica única sino a una raíz ramificada en función de la geometría de orden cero y uno que tienen un mecanismo de absorción que se ajusta a una cinética de Michaelis Mentel, los resultados del modelo fueron validados de forma teórica y experimental por los autores (Roose and Fowler 2004). En la ecuación  $\phi \frac{\partial S}{\partial t} = -D_o D(S) \nabla S + K_S k(S) \hat{k} - F_w(S, z, t)$  (3.13.1 se presenta la ecuación planteada por los autores para el flujo de agua en el suelo en función de la saturación de este:

$$\phi \frac{\partial S}{\partial t} = -D_o D(S) \nabla S + K_S k(S) \hat{k} - F_w(S, z, t) \quad (3.1)$$

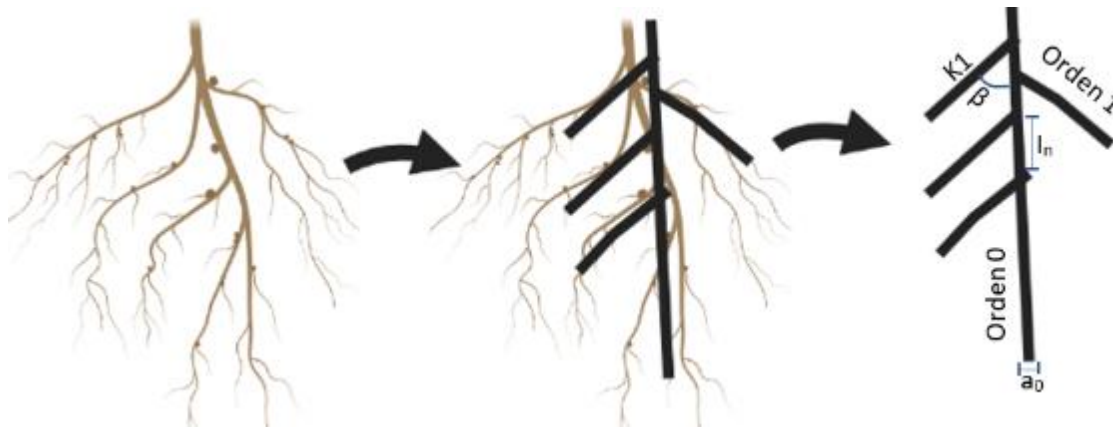
Esta ecuación incluye un término difusivo, un término conectivo y un  $F_w$  que representa un término fuente de la cantidad de agua que se va por medio de la raíz, este término  $F_w$  se

evalúa en función de la geometría de la raíz, el ángulo de las ramas, la densidad de las raíces, la saturación del suelo y la presión relativa del suelo, como sigue:

$$F_w(S, z, t) = \frac{2\pi a k_r + \{2\pi a k_r k_{z,1}\}^{\frac{1}{2}} \psi_1(z)}{\pi(a_0 + L_1 \cos \beta)^2} [p(S) - p_r] \quad (3.2)$$

En la Figura 3-2 se presenta la raíz, con los elementos involucrados dentro de la ecuación:

**Figura 3-1:** Esquema de componentes y su interacción en el suelo



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Donde:  $a$  hace referencia al radio de la raíz,  $K$  es el parámetro que relaciona la longitud máxima que puede alcanzar la raíz,  $a$  es el radio de la raíz el subíndice corresponde a raíces de orden cero y uno respectivamente,  $L$  es la longitud de la raíz,  $\beta$  es el ángulo entre la raíz de orden cero y orden uno,  $z$  es a dirección de la raíz,  $\psi_1$  son los puntos de ramificación.

Se debe aclarar que algunos parámetros de esta ecuación por definición pueden variar dependiendo de cada tipo de suelo, uno de estos parámetros es  $p(S)$  el cual representa la succión característica del suelo, para este parámetro se tiene variación con datos experimentales para cinco tipos de suelo diferentes los cuales fueron propuestos por Van Genuchten (Genuchten V M 1980).

Las ecuaciones encontradas son un acercamiento para conocer la dinámica del suelo, sin embargo, se evidencian falencias en las reacciones químicas que se dan en el suelo y la incidencia que tienen las mismas en el flujo de nutrientes a las plantas, es importante mencionar que a pesar del aumento de investigaciones relacionadas con el uso de biochar

en suelo no se evidencia un modelo matemático que permita predecir la respuesta del suelo con respecto a la aplicación del biochar.

Otros modelos Matemáticos consultados se comparan a continuación:

**Tabla 3-1:** Modelos encontrados. Elaboración propia

Autor	Iones	Difusión	Convección	Raíz	Lixiviación	Saturación	Fase sólida	Reacciones químicas	Actividad microbiológica	Biochar o fertilizante
(Sánchez-Reinoso, Ávila-Pedraza, and Restrepo-Díaz 2020)	4	x		x						
(Custos, Moyne, and Sterckeman 2020)	9	x	x			x				
(Roose, Fowler, and Darrah 2001)	2	x	x	x		x				
(Sepúlveda-robles 2015)	0	x		x			x			
(Roose and Fowler 2004)	6	x		x						
(Foster and Miklavcic 2013)	2	x	x	x						
(Sun et al. 2015)	11	x					x			x
(Lindsay 2015)							x	x		
<b>Modelo propuesto</b>	<b>5</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>

Por esto se realiza un modelo que permita identificar el proceso de interacción entre el suelo, la raíz y el biochar, teniendo en cuenta los demás elementos involucrados que incluyen en la dinámica del suelo. El suelo está compuesto por tres fases: líquida, sólida y gaseosa, además de la interacción de la solución del suelo con la raíz. En el modelo se tendrá en cuenta la interacción del agua, la saturación del suelo, el intercambio de nutrientes y diferentes fenómenos asociados a la saturación y el porcentaje de humedad.

### 3.1 Fases y elementos del modelo

#### 3.1.1 Definición de las fases y elementos

El modelo matemático propuesto tendrá las siguientes fases:

- **Fase sólida:** se definirá como un medio poroso el cual está ocupado por las fases líquida y gaseosa, de forma ideal la relación que se tiene debería considerar 50% de espacio poroso el cual tiene 25% de agua y 25% de aire, la interacción entre la fase sólida y líquida del suelo determinan la concentración de los diferentes elementos y componentes del suelo relacionados con la nutrición vegetal, en la fase sólida hay presencia de moléculas orgánicas las cuales son solubles y aportan en la formación de complejos y quelatos que llegan a la solución del suelo y fomentan la solubilidad de componentes inorgánicos. En esta fase es importante mencionar que los complejos orgánicos no solo aumentan la disponibilidad de iones que provienen de su misma composición, sino que además afectan el equilibrio entre la fase sólida y líquida que regula la cantidad y disponibilidad de macro y oligoelementos en el suelo (BEAR 1964) y (Casanova 1991) .
- **Fase líquida:** representa la solución del suelo la cual está conformada por un medio acuoso que incluye cationes, aniones, moléculas orgánicas, moléculas inorgánicas e incluso algunos metales en solución; la composición y concentración de cada uno de estos en el suelo varía en función de la composición de la fase sólida del suelo y de las condiciones ambientales , los electrolitos presentes en el suelo se encuentran en equilibrio con los diferentes componentes del suelo como las sales que pueden ser solubles o adsorbidas, los compuestos precipitados y los iones intercambiables, estos tienen un papel fundamental en la nutrición de las plantas y tiene como parámetro de interés la saturación del suelo, además, la fase líquida está en equilibrio dinámico con la fase sólida del suelo (BEAR 1964).
- **Fase gaseosa:** se estima que la cantidad de fase gaseosa en el suelo puede variar entre 0 – 45 %, cuando se está trabajando en capacidad de campo la proporción varía entre 10-15% para suelos con cultivos. Por lo general el crecimiento de las raíces produce cantidades significativas de CO<sub>2</sub> también se da una interacción entre la solución del suelo y la fase gaseosa ya que estas permanecen en equilibrio , el aire del suelo tiene un contenido de oxígeno inferior al atmosférico que puede rondar el 20% debido a la actividad de microorganismos, y este contenido puede variar en función de la profundidad incluso puede estar e valores inferiores al 5%, a medida que disminuye el oxígeno se presentan cambios en el dióxido de carbono el cual puede variar entre 0.35 – 10%, sin embargo cuando este valor es muy alto puede ser toxico para las plantas(BEAR 1964) y (Amésquita et al. 2001).

- **Raíz:** la raíz será modelada por medio de la interacción con la solución del suelo, el transporte de agua y nutrientes se da por medio de un modelo que se basa en procesos de difusión y convección, en este caso se propone además de la difusión el término de apetencia el cual considera los requerimientos nutricionales de la planta y una relación de área en la que se da el flujo de nutrientes (Custos, Moyne, and Sterckeman 2020).
- **Biochar:** la interacción del biochar en el suelo será como aporte de nutrientes la cual se establece por medio de una cinética de liberación en función del tiempo, que se realiza de forma experimental para Nitrógeno, Fósforo y Potasio, este término actuará dentro de la ecuación como un sumidero de nutrientes para el suelo.

### 3.1.2 Definición de fases

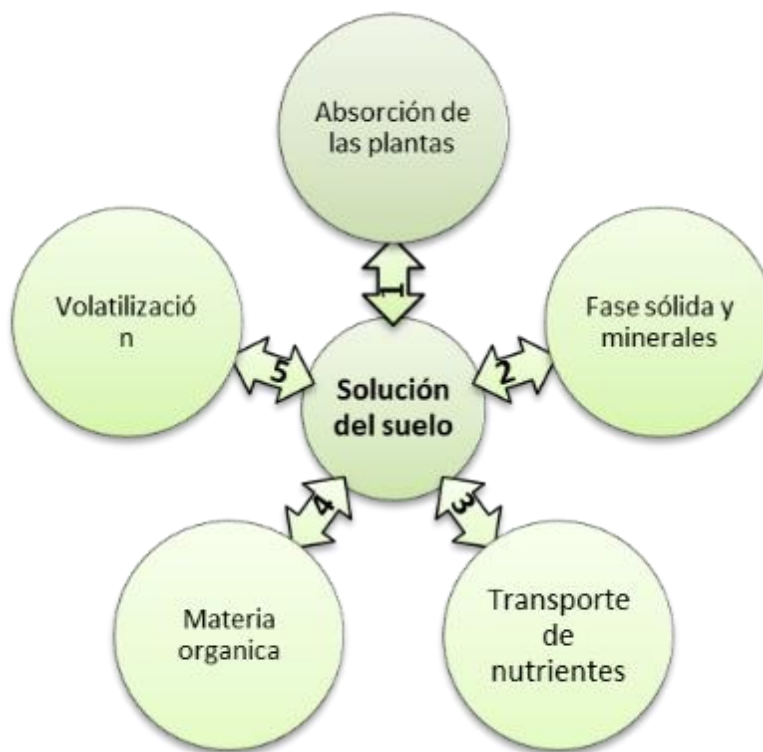
La solución del suelo es el punto de encuentro de las fases, en la cual se encuentran los iones que son absorbidos en los procesos de nutrición vegetal, en este se dan interacciones entre las diferentes fases y fenómenos del suelo, sin embargo se debe tener en cuenta que la concentración real de cada uno de los iones o especies cambia en función de la saturación del suelo o el contenido de humedad (Solution and Equilibria 1997).

En la Figura 3-2 se presentan los componentes involucrados en el suelo los cuales se describen a continuación:

1. Los iones disueltos en la solución del suelo son absorbidos por la planta, a su vez se da liberación de exudados por la raíz.
2. Cuando la solución del suelo tiene sobresaturación de un mineral este se precipita, o si la solución del suelo se satura con un mineral este se disuelve hasta encontrar el equilibrio, también los iones migran de la fase sólida por medio de flujo de masa, que puede ser medido por la diferencia del potencial hídrico entre la superficie de la raíz y la masa del suelo o por movimiento difusivo (Amésquita et al. 2001).
3. Los iones se pueden transportar por procesos difusivos y convectivos.

4. La presencia de materia orgánica aporta elementos involucrados en reacciones de oxidorreducción, además de aporte de dióxido de carbono a la fase gaseosa del suelo.
5. Puede tener lugar la liberación de gases a la atmósfera o la disolución de componentes gaseosos en la solución del suelo.

**Figura 3-2:** Esquema de componentes y su interacción en el suelo



Nombre de la fuente: Elaboración propia

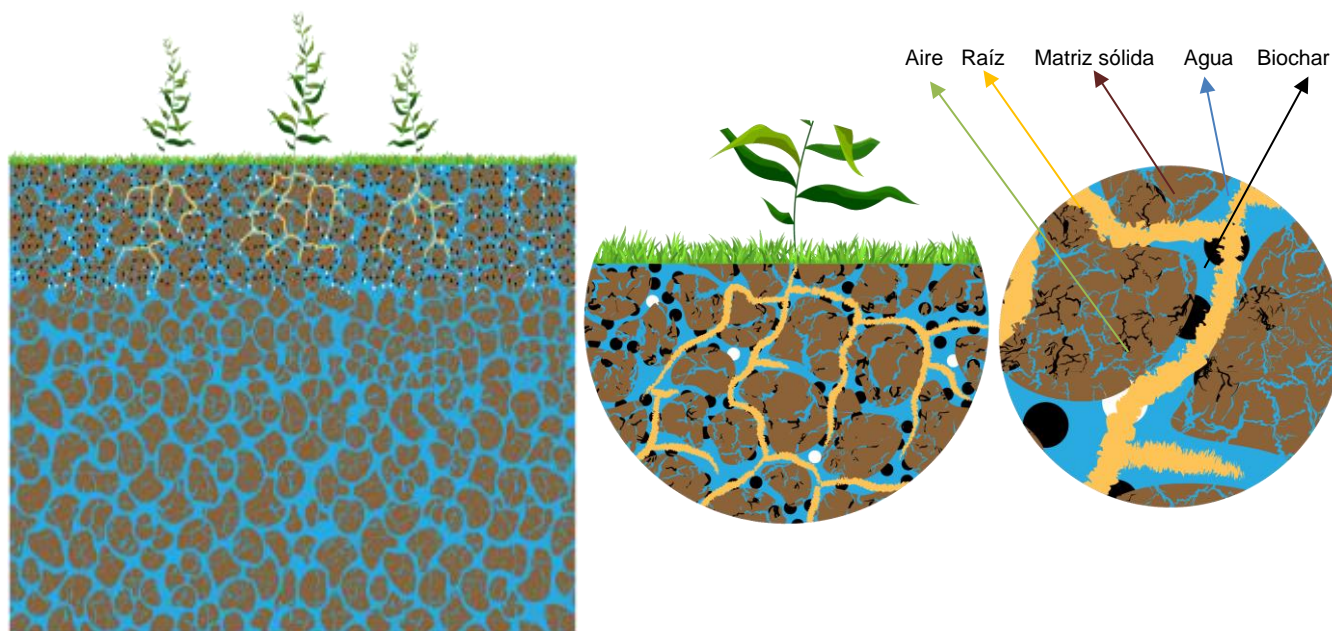
### 3.2 Esquema general del modelo

Como se mencionó anteriormente en el suelo se tendrán en cuenta 3 fases: el aire, el agua, y la matriz sólida del suelo, además se tienen como componentes la raíz y el biochar, para esto se realiza un modelo que permite identificar el proceso de interacción entre cada una de las fases y componentes mencionados, con el objetivo de comprender los diferentes fenómenos que se llevan a cabo en el suelo.



En la Figura 3-3 se presenta el esquema general del modelo, donde se relacionan las fases y componentes que serán involucrados en el modelo matemático.

**Figura 3-3:** Esquema general del modelo, con fases y componentes.



Nombre de la fuente: Elaboración propia

### Supuestos:

- I. Matriz sólida del suelo es homogénea y será un término fuente de aporte de iones y elementos a la solución del suelo.
- II. El biochar está uniformemente distribuido y será un término fuente de aporte de iones y elementos a la solución del suelo.
- III. El suelo está en capacidad de campo y la cantidad de aire varía entre 10-15% para suelos con cultivos.
- IV. La raíz se agregará como un término fuente de absorción de agua y nutrientes.

El modelo matemático propuesto se resuelve en dos etapas, la primera etapa resuelve la saturación del suelo, con esta respuesta se pasa la solución de la concentración para cada uno de los nutrientes.

### 3.3 Ecuación para la saturación del suelo

#### 3.3.1 Ecuación para la solución del suelo

La ecuación propuesta por T. Roose y A.C. Fowler, 2004, acopla la ley de Darcy y la conservación, que se expresa mediante la ecuación de Richards para representar el flujo de agua en medios porosos y el proceso de absorción por parte de la raíz, a esta se adiciona un término de interacción de nutrientes con la raíz, esta se toma como base para la solución de la saturación del suelo.

$$\phi \frac{\partial S}{\partial t} = \text{div}(U) - F_w(S, z, t) \quad (3.3),$$

$U = D_o D(S) \nabla S - K_S k(S) \hat{k} = \nabla S D_{\text{eff}}(S) - K_{\text{eff}}(S)$ , es una representación de la velocidad del movimiento del agua, que parte de la ley de Darcy, definida por un término convectivo efectivo  $K_{\text{eff}}$  y uno difusivo efectivo  $D_{\text{eff}}$ ; en este caso se tiene como condiciones de frontera:

$$-D_o D(S) \nabla S + K_S k(S) \hat{k} = W_{\text{dim}}, \quad Z = 0 \quad (3.4)$$

Donde:

$$W_{\text{dim}} = \text{Flux de volumen en la superficie del suelo por unidad de tiempo}$$

Expandiendo la expresión en función de la conductividad y la difusividad se tiene que:

$$\phi \frac{\partial S}{\partial t} = \nabla [\nabla S D_{\text{eff}}(S) - K_{\text{eff}}(S)] - F_w(S, z, t) \quad (3.5)$$

Estas ecuaciones se usan para indicar la forma como se mueve el agua en un suelo parcialmente saturado, la movilidad del agua del suelo no es linealmente dependiente del nivel de saturación del suelo.

Para la difusividad y la conductividad reducida, en función de la saturación del suelo, se obtienen por medio del modelo propuesto por el modelo de (Mualen 1976), soportado en (Ahuja and Swartzendruber 1972), (Haverkamp et al. 1977) y (Endelman et al. 1974) donde se considera suelo homogéneo y saturado.

$$f(S) = \int_0^S \left[ \frac{x^{\frac{1}{m}}}{1-x^{\frac{1}{m}}} \right]^{1/m} dx \quad (3.6)$$

Para simplificar la expresión se realiza la sustitución de  $x$  por  $y^m$

$$f(S) = m \int_0^S y^{m-1+\frac{1}{n}} (1-y)^{-1/n} dy \quad (3.7)$$

$$f(S) = 1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}}\right)^m \quad (m=1-1/n) \quad (0 < m < 1) \quad (3.8)$$

Esta ecuación representa la función general, en el caso de la difusividad hidráulica:

Partiendo de la ecuación de conductividad hidráulica y la curva de retención de agua en suelo.

$$K_r = S^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{\int_0^S \frac{1}{h(x)} dx}{\int_0^1 \frac{1}{h(x)} dx} \right]^2 \quad (3.9)$$

En este caso el valor de  $h$  (presión de cabeza) es dado en función del contenido de agua.

$$S = \left[ \frac{1}{1+(ah)^n} \right]^m \quad (3.10)$$

Simplificando la expresión para la conductividad hidráulica, solucionando la expresión para  $h$  y sustituyendo en la ecuación se obtiene

$$K_r(S) = S^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{f(S)}{f(1)} \right]^2 \quad (3.11)$$

$$K_r(S) = S^{1/2} \left[ 1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}}\right)^m \right]^2 \quad (3.12)$$

Partiendo del término de conductividad hidráulica, y del procedimiento realizado anteriormente:

Teniendo en cuenta que la difusividad está definida como:

$$D(S) = K(S) \left[ \frac{dh}{dS} \right] \quad (3.13)$$

Entonces:

$$D(S) = \frac{(1-m)K_s}{am(S_s-S_r)} S^{\frac{1}{2}-\frac{1}{m}} \left[ \left(1 - S^{\frac{1}{m}}\right)^{-m} + \left(1 - S^{\frac{1}{m}}\right)^m - 2 \right] \quad (3.14)$$

$$D(S) = S^{\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{m}\right)} \left[ \left(1 - S^{\frac{1}{m}}\right)^{-m} + \left(1 - S^{\frac{1}{m}}\right)^m - 2 \right] \quad (3.15)$$

Donde

$K_s$  Es la conductividad hidráulica en saturación, estas propiedades se obtienen asumiendo que  $k = m - 1 + \frac{1}{n} = 0$

Por lo que la ecuación completa sería:

$$\phi \frac{\partial S}{\partial t} = \nabla \left[ \nabla S \left( D_o * S^{\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{m}\right)} \left[ \left(1 - S^{\frac{1}{m}}\right)^{-m} + \left(1 - S^{\frac{1}{m}}\right)^m - 2 \right] \right) - \left( K_s \hat{k} S^{\left(\frac{1}{2}\right)} \left[ 1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}}\right)^m \right]^2 \right) \right] - \frac{2\pi a k_r + \{2\pi a k_r k_{z,1}\}^{\frac{1}{2}} \psi_1(z)}{\pi(a_0 + L_1 \cos \beta)^2} \left[ p(S) - p_c \left( S^{-\frac{1}{m}} - 1 \right)^{\frac{1}{m}} - p_r \right] \quad (3.16)$$

Donde:

**Tabla 3-2:** Definición de términos de la ecuación

Término	Definición	Unidades	Valor o formula
S	Saturación	-	$S = \frac{\phi_i \text{ (contenido volumétrico de agua)}}{\phi \text{ (porosidad)}} = \frac{V_{\text{agua}}}{V_{\text{Raiz o poros}}}$
$\phi_i$	Contenido de agua en el suelo	-	$\phi_i = \frac{V_{\text{agua}}}{V_{\text{total}}}$
$\phi$	Porosidad del suelo	-	$\phi = \frac{V_{\text{raiz}}}{V_{\text{total}}}$
$D_{\text{eff}}(S)$	Difusividad efectiva en función de la saturación del suelo (Roose and Fowler 2004).	$\left[ \frac{cm^2}{dia} \right]$	$D_{\text{eff}} = D_o D(S)$ (3.17) $D_o = 10^3$ Difusividad del agua en el suelo no saturado $\left[ \frac{cm^2}{dia} \right]$ $D(S) = S^{\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{m}\right)} \left[ \left(1 - S^{\frac{1}{m}}\right)^{-m} + \left(1 - S^{\frac{1}{m}}\right)^m - 2 \right]$ Difusividad reducida $m = \frac{1}{2}$ Parámetro adimensional para el flujo de agua
$K_{\text{eff}}(S)$	Conductividad efectiva en función de la saturación del suelo.	$\left[ \frac{cm}{dia} \right]$	$K_{\text{eff}} = K_s k(S) \hat{k}$ (3.18) $K_s = 5$ Conductividad hidráulica del suelo saturado $\left[ \frac{cm}{dia} \right]$ $k(S) = S^{\left(\frac{1}{2}\right)} \left[ 1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}}\right)^m \right]^2$ Conductividad reducida en el suelo saturado

Término	Definición	Unidades	Valor o formula
$F_w(S, z, t)$	Término fuente, término de absorción de agua que ingresa a la raíz por unidad de volumen del suelo por Ganuchten 1980 (Roose and Fowler 2004), (Genuchten V M 1980).	$\left[\frac{1}{s}\right]$	<p data-bbox="813 306 1421 579"><math>\hat{k} = \text{Magnitud vector unitario hacia abajo [cm]}</math>  <math>k(S)</math>, es un término importante en la dinámica del suelo, este varía en función de la saturación, por lo que se puede utilizar como parámetro para evaluar la capacidad de campo del suelo y determinar en función de las propiedades del suelo, la carga hidráulica y la porosidad la cantidad de agua ingresa al suelo, es decir para definir la tasa de infiltración del suelo.            NOTA: Cuando el suelo no está saturado se utiliza una tasa de infiltración y cuando se satura la conductividad permanece constante en función del gradiente hidráulico (Roose &amp; Fowler 2004).</p> $F_w(S, z, t) = \frac{2\pi a k_r + \{2\pi a k_r k_{z,1}\}^{\frac{1}{2}} \psi_1(z)}{\pi(a_0 + L_1 \cos\beta)^2} [p(S) - p_r] \quad (3.19)$ <p data-bbox="776 810 1421 884"><math>2\pi a k_r = 7.85 * 10^{-10} \left[\frac{m^2}{s MPa}\right]</math> Conductividad axial de la raíz</p> <p data-bbox="776 894 1421 968"><math>k_{z,1} = 4.6 * 10^{-14} \left[\frac{m^4}{MPa s}\right]</math> Conductividad axial del lateral de primer orden</p> <p data-bbox="776 978 1421 1010"><math>a_0 = 5 * 10^{-4} [m]</math> Radio de la raíz de orden cero</p> <p data-bbox="776 1020 1421 1083"><math>L_1 = 0.08 [m]</math> Longitud máxima de primer orden de la rama lateral</p> <p data-bbox="776 1094 1421 1157"><math>\cos\beta = 0.5</math> Angulo de la rana de orden uno y cero de la raíz</p> <p data-bbox="776 1167 1421 1241"><math>\psi_1(z) = \left[\frac{1}{m}\right]</math> Densidad de raíces de primer orden por unidad de longitud en la raíz de orden cero</p> <p data-bbox="776 1251 1421 1314"><math>p(S)</math> Parámetro característico de succión en función de la saturación relativa, presión relativa del suelo</p> $p(S) = -p_c \left(S^{-\frac{1}{m}} - 1\right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.20)$ <p data-bbox="776 1388 1421 1451"><math>p_c</math> Parámetro experimental para cada tipo de suelo (Genuchten V M 1980).</p> <p data-bbox="776 1461 1421 1493">Las condiciones de frontera para este término son:</p> $p_r = P = cte \quad , \quad \frac{\partial P_r}{\partial z} = 0 \quad , \quad Z = L$

En esta ecuación se realiza la modificación de la condición de frontera a la salida, ya que en el modelo propuesto no se considera la infiltración de agua sino una retención de esta a los 100 cm de profundidad.

### 3.3.2 Condición de frontera

- **Infiltración**

El volumen de agua que se infiltra al suelo atraviesa la superficie y ocupa parcial o totalmente los poros del suelo, la cantidad de agua que se infiltra al suelo se puede expresar con el modelo de Horton donde el contenido de humedad en el suelo depende de la humedad inicial, la saturación, contenido de agua por unidad de medio, entre otros, los cuales pueden variar dependiendo del tipo de suelo que se desee modelar, Weber 2014 plantea la ecuación 3.3, que evalúa la infiltración en el suelo en función de la capacidad de infiltración del suelo y la permeabilidad.

$$F = f_c + (f_o - f_c) * e^{-Kt} \tag{3.21}$$

Donde:

$F$  Capacidad de infiltración en un tiempo  $t$  (mm/h),  $f_c$  Capacidad de infiltración para un tiempo, donde el suelo está saturado (mm/h),  $f_o$  Capacidad de infiltración inicial (mm/h),  $K$  Constante en función de las condiciones del suelo (min<sup>-1</sup>) (permeabilidad) y  $t$  Tiempo transcurrido en (min)

**Tabla 3-3:** Datos experimentales Infiltración en diferentes tipos de suelo (Adaptado de (Weber 2014))

Tipo de suelo	$f_c$ (mm/h)	$K$ (mm/h)
Desnudo	6-220	1.6
Agrícola estándar con materia orgánica	20-290	0.8
Pantanosos	2-20	1.8
Arenoso fino desnudo	2-25	2
Arcilloso con materia orgánica	10-30	1.4

Para el término de capacidad de infiltración inicial, se presenta una variación de la ecuación propuesta por Weber 2014, acoplada a la ecuación propuesta por Green-Ampt que tiene en cuenta el encharcamiento y la infiltración del suelo (Rauhermi 2018).

El acople de estos modelos presenta una ecuación para la infiltración del suelo que permita modificar variables en función del tipo de suelo al que se desee aplicar el modelo, además al incluir el término de la saturación como base del planteamiento puede ser integrado a la ecuación inicial propuesta por Roose y Fowler como una

condición de frontera más cercana a la realidad, donde el agua que ingresa al suelo no se acumula, sino que sigue infiltrando a través de las capas del suelo.

El punto de partida para la integración de los dos modelos es definir la variación de humedad:

$$\Delta\phi = (1 - S) * \phi_e \quad (3.22)$$

Donde:  $S$  Saturación del suelo y  $\phi_e$  Porosidad efectiva del suelo varía para cada tipo de suelo.

A partir de esto se tiene que  $f_o$  se puede expresar por medio de la ecuación 3.23:

$$f_o = K * \left(1 + \frac{\psi * \Delta\phi}{F_o}\right) \quad (3.23)$$

Donde:  $F_o$  Infiltración acumulada inicial (1mm),  $\psi$  Potencial de succión del frente húmedo (239 mm),  $\phi_e$  Porosidad efectiva puede variar con el tipo de suelo (0.4).

Finalmente, con el acople de ambos términos, se obtiene la infiltración en función de la saturación de suelo es:

$$F = f_c + \left(K * \left(1 + \frac{\psi * \Delta\phi}{F_o}\right) - f_c\right) * e^{-Kt} \quad (3.24)$$

$$F = f_c + \left(K * \left(1 + \frac{\psi * ((1-S) * \phi_e)}{F_o}\right) - f_c\right) * e^{-Kt} \quad (3.25)$$

- **Superficie z=0**

Para  $z$  igual a cero, se toma la condición de frontera propuesta por Roose y Fowler en la cual se asume un flujo de agua inicial a causa de precipitaciones, este en unidades de cm/s, esta condición de frontera viene acompañada de un término que aporta una tasa de fertilización constante, que se aplica por medio de la siguiente ecuación (Roose and Fowler 2004).

Para la ecuación de saturación del suelo:

$$-D_o D(S) \nabla S + K_S k(S) \hat{k} = W_{dim}, \quad Z = 0 \quad (3.26)$$

En el caso de la concentración:

$$\text{En } z = 0, \quad -D_f \phi^{1+d} S^{1+d} \frac{\partial c}{\partial z} + W_{dim} C = Q_{dim} \quad (3.27)$$

### 3.4 Ecuación para la concentración de nutrientes

Una vez se tiene el resultado para la ecuación de saturación del suelo, se pasa a resolver la concentración para cada uno de los nutrientes, por esto se deben definir los términos fuente para cada una de las fases.

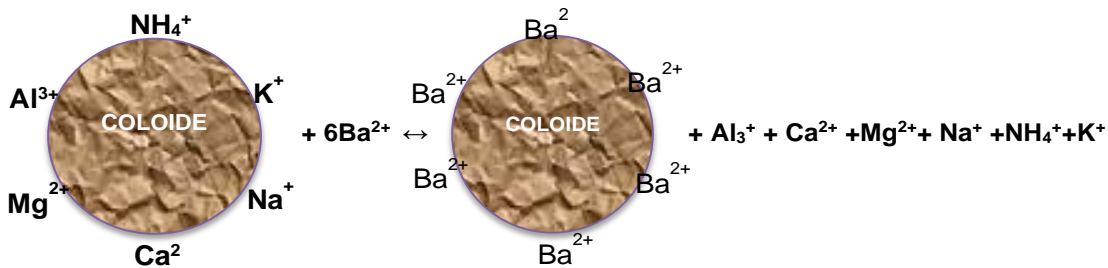
#### 3.4.1 Ecuación para la fase sólida

La fase sólida del suelo tiene dentro de su composición iones y moléculas que están involucrados en procesos de retención, dilución, absorción o intercambio iónico, estos procesos están relacionados a interacciones electrostáticas, por fuerzas de Van der Waals, precipitación, fijación y quimi-sorción.

Para definir la forma como interactúa la fase sólida se tomará como punto de intercambio e interacción los coloides que son la parte reactiva del suelo compuesta por átomos o iones con carga permanente o variable, la primera está relacionada con los mecanismos de sustitución isomórfica y la segunda varía entre positiva o negativa en función del pH, la interacción del coloide con la solución del suelo permite intercambiar elementos y liberar nutrientes que son de provecho para la nutrición de las plantas, en la

Figura 3-4. Esquema interacción de un coloide se presenta la interacción de un coloide en el suelo (BEAR 1964).

Figura 3-4. Esquema interacción de un coloide



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Para analizar el comportamiento de la fase sólida del suelo, primero es necesario definir algunos términos de interés:



- **Potencial químico:** representa la disponibilidad de energía libre que promueve la transferencia de un estado de alto potencial químico a uno de bajo, en este caso se da una transferencia de la fase sólida a la solución del suelo (Amésquita et al. 2001). El potencial es función de la actividad del ion y se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$\mu_i = -RT \ln(a_i) \quad (3.28)$$

Donde R es a constante de los gases ideales, T es la temperatura y  $a_i$  es la actividad del ión (Amésquita et al. 2001).

- **Factor de cantidad (Q):** La fase sólida del suelo contiene iones de reserva, los cuales se liberan a la solución del suelo en tres formas, formas rápidamente disponibles, formas en equilibrio con la solución del suelo y forma fijada en el sólido, los cuales han sido cuantificados evaluando intercambio isotópico, resinas de intercambio, isotermas de absorción y extractores químicos, por medio de diagramas de predominancia o actividad de puede identificar el potencial químico de la fase sólida (Amésquita et al. 2001).
- **Factor de intensidad (I):** busca determinar la migración de iones desde la fase sólida a la solución del suelo, se determina por medio del método de desplazamiento que coincide con resultados que se basan en el potencial de Shofield y la relación de actividades y se define a partir del potencial químico (Amésquita et al. 2001).
- **Factor de capacidad (b):** permite definir la tendencia del ion para moverse desde el equilibrio del sólido a la solución, se hace la relación entre el factor cantidad y el factor intensidad (Q/I), si es cercano a 1 hay equilibrio entre las fases, mayor a 1 pasará el ion desde el sólido hasta la solución del suelo (Amésquita et al. 2001).
- **Difusión:** reúne los términos de cantidad, intensidad y capacidad, se puede establecer el proceso difusivo en un diferencial dx en el cual se da variación de la concentración, que se puede expresar por medio de la siguiente ecuación (Amésquita et al. 2001):

$$\mu_{c-cd} - \mu_c = RT \frac{\ln(c-cd)}{c} \quad (3.29)$$

$$d_\mu = RT \ln \left( 1 - \frac{dc}{c} \right) \quad (3.30)$$

En el caso de la difusión de los iones en el suelo se debe tener en cuenta la porosidad del suelo, la tortuosidad y algunos factores fisicoquímicos que están involucrados en este proceso y se agrupan por medio del coeficiente de difusión efectivo el cual se presenta a continuación.

$$D_{eS} = D_i \phi f_i c_i \quad (3.31)$$

Donde:  $D_i$  Difusividad del ion en el agua  $\frac{m^2}{s}$ ,  $\phi$  Porosidad,  $f_l$  Factor de impedancia o tortuosidad y  $c_i$  Concentración del ion  $\frac{mol}{m^3}$

Es importante mencionar que el término difusivo varía para cada uno de los nutrientes que se van a trabajar, por lo que sería posible tener la expresión para cada uno de los nutrientes:

Nitrógeno:  $D_{I,NO_3^-} = 1.90 * 10^{-9} \frac{m^2}{s}$  (Custos, Moyne, and Sterckeman 2020)

$$D_{eSN} = 1.90 * 10^{-9} \phi f_i c_i$$

Fósforo  $D_{I,P} = 7.90 * 10^{-10} \frac{m^2}{s}$  (Custos, Moyne, and Sterckeman 2020)

$$D_{eSP} = 7.90 * 10^{-10} * \phi f_i c_i$$

Potasio  $D_{I,K} = 1.96 * 10^{-9} \frac{m^2}{s}$  (Custos, Moyne, and Sterckeman 2020)

$$D_{eSK} = 1.96 * 10^{-9} * \phi * f_i * c_i$$

- **Término fuente para fase sólida**

Entonces el término fuente agregado a la ecuación para la fase sólida sería:

$$F_{fs} = D_{eS} * \frac{1}{A_s} \quad (3.32)$$

Donde:  $F_{fs}$  Término fuente para la fase sólida  $\left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3\text{s}}\right]$ ,  $D_{eS}$  Difusividad efectiva de la fase sólida  $\left[\frac{\text{mol}}{\text{m s}}\right]$  y  $A_s$  Área del sólido en el suelo  $[\text{m}^2]$

### 3.4.2 Ecuación para la raíz

La ecuación de flujo de nutrientes hacia la raíz se expresará como un término fuente que representa el flujo de nutrientes por medio de la raíz se puede representar por medio de una cinética de Michaelis Mentel y se puede expresar por la ecuación anterior (Custos, Moyne, and Sterckeman 2020).

$$F_{c_i} = \frac{I_{max_i}(c_i - \varphi_i)}{K_{mi} + (c_i - \varphi_i)} * A * S \quad \left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3\text{s}}\right] \quad (3.33)$$

Donde:  $I_{max_i}$  Flujo máximo hacia la raíz del nutriente  $i$   $\left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^2\text{s}}\right]$ , este se puede encontrar en la Tabla 4-5,  $c_i$  Concentración del componente  $i$   $\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$ ,  $\varphi_i$  Apetencia de la especie  $i$  por parte de la raíz depende de la especie  $i$   $\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$ , especificado en la Tabla 4-6,  $K_{mi}$  Constante de Michaelis Mentel para  $i$   $\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$  descrito en la Tabla 4-5 y  $A$  Relación de distribución de cilindro entre el área interna de la raíz y el volumen de raíz  $\frac{\text{m}^2 \text{raíz interna}}{\text{m}^3 \text{raíz}}$

### 3.4.3 Ecuación y términos de transporte para oxígeno

El oxígeno es un componente esencial en la dinámica del suelo, como los procesos de crecimiento de las plantas, nitrificación, desnitrificación, degradación de materia orgánica, la respiración de microorganismos en la rizósfera y reacciones de oxidorreducción, la propuesta para el manejo del oxígeno en el modelo se realiza considerando el transporte de oxígeno no solo en la solución del suelo, sino también su consumo por microorganismos ubicados en la rizósfera, además se incluyen los efectos de la materia orgánica (Refsgaard, Christensen, and Ammentorp 1991).

- **Término fuente para el transporte de oxígeno**

El transporte de elementos gaseosos en el suelo, principalmente de oxígeno, se puede presentar como flujo gaseoso masal y difusión molecular, el flujo masal gaseoso se da

por procesos de inundación y es instantáneo, la difusión del oxígeno en el agua es 10000 veces más pequeña que la difusión en aire, el suelo no puede ser considerado homogéneo ya que en este se presenta una estructura variable la cual influye en la forma como se difunden los diferentes elementos, en el caso de la difusión molecular se da debido a la diferencia en las presiones parciales de los gases y la diferencia de concentración debida al consumo biológico de oxígeno y la producción de dióxido de carbono. En este caso se consideran dos escenarios, en el primero se tiene el oxígeno presente en los agregados del suelo cerca de la raíz, en este caso el oxígeno tiene una difusión de  $1 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  mientras que la difusión en el agua, para el resto del suelo cuando está lejos de la raíz se considera como  $2.6 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  (Refsgaard, Christensen, and Ammentorp 1991).

A continuación se presenta la ecuación general utilizada, teniendo en cuenta la propuesta de Buckingham para el flujo de oxígeno a solución del suelo, en esta se va a considerar el flujo hasta los 30 cm con los datos para difusión en los agregados, y después de esta profundidad solo difusión en agua dentro del suelo (Obado 2003).

$$J_{O_2} = D_{O_2} \phi f_l c_i \left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \text{ s}} \right] \quad (3.34)$$

Donde:  $D_{O_2}$  Coeficiente de difusión de  $O_2$  en fase líquida  $2.6 \cdot 10^{-9} \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$ ,  $\phi$  Porosidad,  $f_l$  Factor de impedancia o tortuosidad y  $c_i$  Concentración del ion  $\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$

Entonces el término fuente agregado a la ecuación sería:

$$F_{fG} = J_{O_2} * \frac{V_s}{A_G} \quad (3.35)$$

Donde:  $F_{fG}$  Término fuente para la fase gaseosa del suelo  $\left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{ s}} \right]$ ,  $J_{CO_2}$  Flux de oxígeno de fase gaseosa a la líquida  $\left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \text{ s}} \right]$  y  $\frac{V_s}{A_G}$  Representa el volumen de suelo sobre el área ocupada por la fase gaseosa  $\left[ \frac{1}{\text{m}} \right]$ .

- **Consumo de oxígeno cerca de la raíz**

Como complemento a la ecuación de transporte de oxígeno, se incluye un consumo en la rizósfera, que puede ser descrito por una ecuación dual de Michaelis Mentel, en la cual se tiene en cuenta el contenido de materia orgánica expresada como

demanda de oxígeno, esta ecuación se remplaza por la ecuación del consumo de raíz, cuando se calcula el valor de la concentración para el oxígeno, la ecuación se presenta a continuación (Refsgaard, Christensen, and Ammentorp 1991).

$$F_{c_o} = \frac{k_1 c_o c_{MO} X}{(K_{mO} + c_o)(K_{mMO} + c_{MO})} * S \left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{s}} \right] \quad (3.36)$$

Donde:  $k_1$  Tasa de utilización de materia orgánica por peso de biomasa  $6 * 10^{-5} \left[ \frac{1}{\text{s}} \right]$ ,  $c_o$  Concentración de oxígeno  $\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$ ,  $c_{MO}$  Concentración de materia orgánica  $0.25 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$ ,  $X$  concentración de biomasa por metro cubico libre de agua  $8 * 10^{-17} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$ ,  $K_{mO}$  Constante de Michalis Mentel para oxígeno  $6.25 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$ ,  $K_{mMO}$  Constante de Michalis Mentel para la materia orgánica  $1 * 10^{-13} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$  y  $S$  Saturación del suelo.

### 3.4.4 Términos de transporte para el hidrógeno

El hidrógeno presenta procesos de absorción en el suelo, debido a reacciones biológicas por lo que se considera puede tomar aproximadamente el 80% del hidrógeno presente en la atmosfera, estos valores pueden variar de forma significativa en función de la actividad biológica del suelo, el clima y algunas condiciones externas (Constant et al. 2010).

Dentro del suelo el efecto principal que modifica la presencia de hidrógeno son las bacterias que tienen procesos de oxidación de hidrógeno, se estima que cerca de 28 especies, por esto basados en la cinética de Michaels Mentel de orden 1 se tienen diferentes constantes para el hidrógeno, los microorganismos relacionados con estos procesos se encuentran principalmente en la rizósfera, cerca de la raíz por lo que se reemplazará el término de consumo de las plantas, por los términos de consumo asociado a los microorganismos del suelo (Constant et al. 2010; Trevors 1985).

$$F_{c_R} = \frac{I_{max_i}(c_H)}{K_{mi} + c_H} * A * S \left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{s}} \right] \quad (3.37)$$

Donde:  $I_{max_i}$  Flujo máximo de hidrógeno por el microorganismo  $i$   $\left[\frac{mol}{m^2s}\right]$  que se establece para cada bacteria en la Tabla 4-7,  $c_H$  Concentración De hidrógeno  $\frac{mol}{m^3}$ ,  $K_{mi}$  Constante de Michalis Mentel para el microorganismo  $i$   $\frac{mol}{m^3}$  (Tabla 4-7) y  $A$  Relación de distribución de cilindro entre el área interna de la raíz y el volumen de raíz  $\frac{m^2 raiz\ interna}{m^3 raiz}$

### 3.4.5 Ecuación para el biochar

El efecto del biochar en el suelo se calcula por medio de una prueba de liberación de nutrientes, de la que se tiene una ecuación para cada uno de los macronutrientes más importantes en los procesos de nutrición de las plantas estos en función del tiempo, el procedimiento experimental de este se describe en la sección: *Pruebas de nutrientes con aplicación de biochar*, las ecuaciones encontradas se presentan a continuación:

$$F_{BK} = 31.172 * e^{-0.12 * t} * \left(\frac{1e^{-6}}{39}\right) \left[\frac{mol}{cm^3 dia}\right] \quad R = 0.845 \quad (3.38)$$

$$F_{BP} = 0.1394 * e^{-0.141 * t} * \left(\frac{1e^{-6}}{31}\right) \left[\frac{mol}{cm^3 dia}\right] \quad R = 0.892 \quad (3.39)$$

$$F_{BNO_3} = 417.6 * e^{-0.341 * t} * \left(\frac{1e^{-6}}{62}\right) \left[\frac{mol}{cm^3 dia}\right] \quad R = 0.994 \quad (3.40)$$

### 3.4.6 Ecuación para lixiviado

En cuanto a las pérdidas por lixiviación se encontraron ecuaciones de forma experimental evaluando la cantidad de nutriente que se perdía por lavado en función del tiempo para cada uno de los elementos, el procedimiento experimental de este se describe en la sección: *Pruebas de nutrientes con aplicación de biochar*, las ecuaciones encontradas se presentan a continuación:

$$F_{LK} = 6E^{-7} x^{-0.475}, \quad R = 0.9436 \left[\frac{mol}{cm^3 dia}\right] \quad (3.41)$$

$$F_{LP} = -1E^{-13} t^4 + 1E^{-11} t^3 - 4E^{-10} t^2 + 3E^{-9} t + 3E^{-9}, \quad R = 1 \left[\frac{mol}{cm^3 dia}\right] \quad (3.42)$$

$$F_{LNO_3} = 4E^{-6} x^{-1.29}, \quad R = 0.9898 \left[\frac{mol}{cm^3 dia}\right] \quad (3.43)$$

### 3.4.7 Ecuación para el flujo de nutrientes completa

Considerando la propuesta de Roose y Fowler 2004, se propone una ecuación de flujo de nutrientes en la cual hay un equilibrio instantáneo en el suelo y en los poros. Además, tomando el efecto buffer del suelo, el requerimiento de planta que implica la apetencia y la difusividad de los nutrientes propuesta por Custos 2020, que se puede expresar como una cinética de Michaelis Mentel, además de los términos fuente mencionados anteriormente, la ecuación propuesta para el flujo de nutrientes se puede expresar en la ecuación 3.44.

$$\frac{\partial}{\partial t} [(b + \phi S)c] + \nabla[cu] = \nabla [(\nabla c S D_f)] - F_c + F_{fS} + F_B + F_{fG} - F_l \quad (3.44)$$

Donde:

**Tabla 3-4:** Definición de términos de la ecuación

Término	Definición	Unidades	Valor o formula
S	Saturación	-	$S = \frac{\phi_i \text{ (contenido volumétrico de agua)}}{\phi \text{ (porosidad)}} = \frac{V_{\text{agua}}}{V_{\text{Raiz o poros}}}$
$\phi_i$	Contenido de agua en el suelo	-	$\phi_i = \frac{V_{\text{agua}}}{V_{\text{total}}}$
$\phi$	Porosidad del suelo	-	$\phi = \frac{V_{\text{raiz}}}{V_{\text{total}}}$
u	Velocidad del movimiento del agua	$\left[ \frac{m^2}{s} \right]$	$u = D_0 D(S) \nabla S - K_S k(S) \hat{k} \quad (3.45)$
C	Concentración total	$\frac{mol}{m^3}$	$C = \frac{\rho}{M_{H_2O}}$
$D_f$	Difusividad efectiva de la especie i en el agua.	$\left[ \frac{m^2}{s} \right]$	$D_{\text{eff},i} = \text{Valor constante dado para cada especie} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$ (Custos 2020)
$\rho$	Densidad del agua	$\left[ \frac{g}{cm^3} \right]$	$1 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$
$M_{H_2O}$	Peso molecular del agua	$\left[ \frac{g}{mol} \right]$	$18 \left[ \frac{g}{mol} \right]$
$F_c$	Flujo de nutrientes que se va por la raíz	$\left[ \frac{mol}{m^3 s} \right]$	$F_c = \frac{I_{\text{max}_i} (C_i - \phi_i)}{K_{m_i} + (C_i - \phi_i)} * A * S \quad (3.46)$

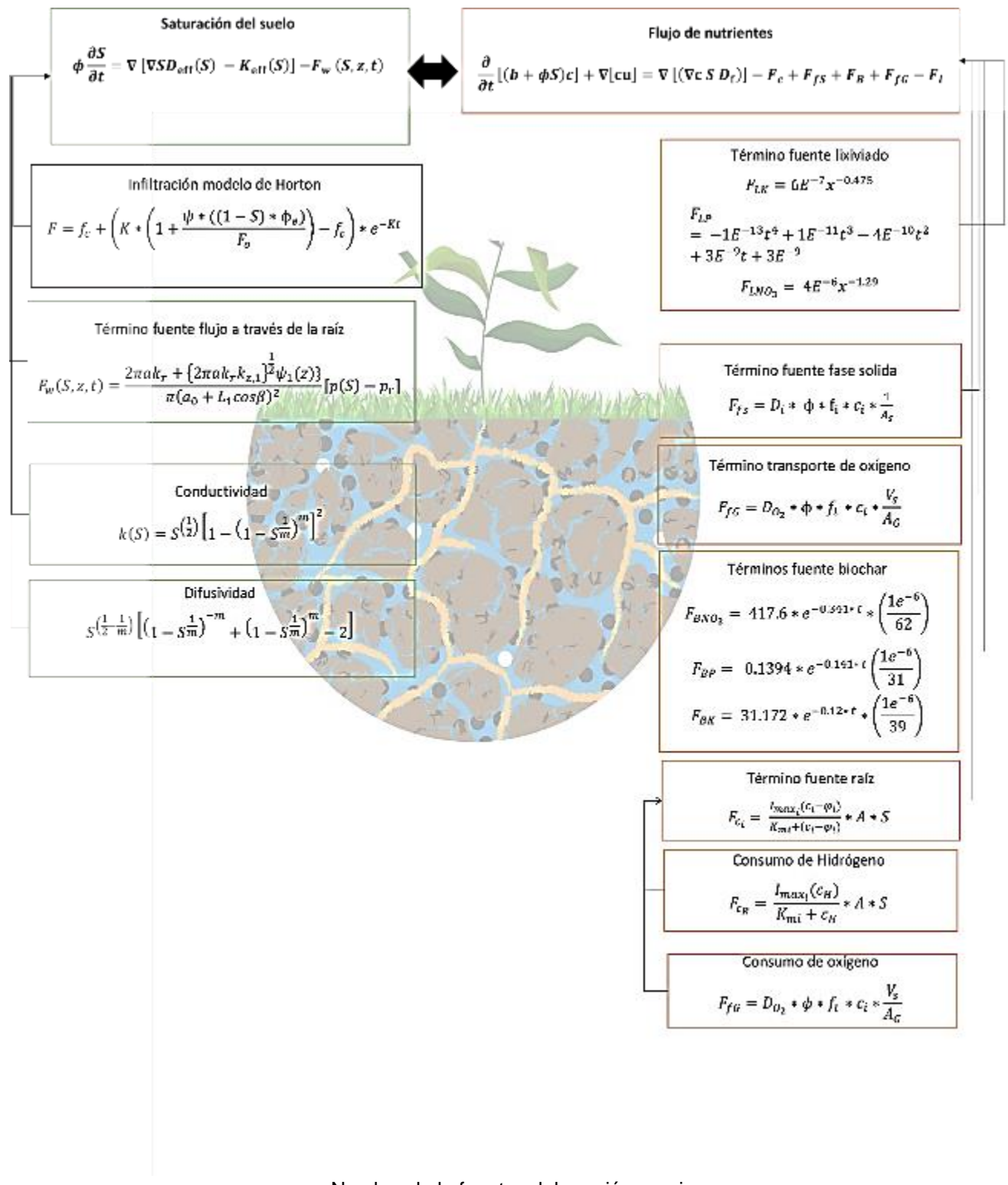
Término	Definición	Unidades	Valor o formula
$F_{fG}$	Flujo de dióxido de carbono aportado al suelo desde la fase gaseosa	$\left[\frac{mol}{m^3s}\right]$	$F_{fG} = J_{CO_2} * \frac{V_s}{A_G}$
$F_{fs}$	Flujo de nutrientes aportados por la fase sólida del suelo	$\left[\frac{mol}{m^3s}\right]$	$F_{fs} = D_{es} * \frac{1}{A_s}$
$F_B$	Flujo de nutrientes aportados por el biochar	$\left[\frac{mol}{m^3s}\right]$	Varía para cada elemento ver sección: <i>Ecuación para el biochar</i>
$F_B$	Flujo de nutrientes perdidos por lixiviación	$\left[\frac{mol}{m^3s}\right]$	Varía para cada elemento ver sección: <i>Ecuación para lixiviado</i>
b	Capacidad buffer definida para cada nutriente		Toma un valor específico para cada nutriente Tabla 4-4

### 3.5 Sinopsis del modelo de transporte

Teniendo en cuenta las ecuaciones, condiciones de frontera y términos fuente presentados en las secciones anteriores, se presenta la Figura 3-5 la cual resume las ecuaciones desarrolladas para el modelo de transporte, y la forma como están relacionadas entre sí para resolver de forma simultánea la ecuación de saturación del suelo y la concentración de cada uno de los nutrientes, todo esto considerando los diferentes términos fuente, además de la ecuación utilizada como condición de frontera para la saturación del suelo. Este modelo presenta un panorama amplio de la dinámica de nutrientes en el suelo, como se detalló en el capítulo cada uno de los términos fuente considerados son esenciales en la dinámica de nutrientes y presentan una interacción significativa que influye en la disponibilidad de nutrientes para la planta. Como se observa en la Figura 3-5 se están considerando ecuaciones diferenciales acopladas que dan respuesta de la dinámica de nutrientes y el flujo de agua en el suelo.



Figura 3-5. Esquema general del modelo



Nombre de la fuente: elaboración propia

### 3.6 Definición de términos para el modelo de transporte

En esta sección se presentan las tablas relacionadas con las propiedades, constantes y coeficientes para cada uno de los términos trabajados en el capítulo.

**Tabla 3-5:** Coeficiente de difusión (Custos 2020)

Coeficiente de difusión	
$D_{\text{eff,Ca}^{2+}}$	$7.93 * 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
$D_{\text{eff,K}^+}$	$1.96 * 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
$D_{\text{eff,Mg}^{2+}}$	$7.05 * 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
$D_{\text{eff,Zn}^{2+}}$	$7.15 * 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
$D_{\text{eff,NH}_4^+}$	$1.98 * 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
$D_{\text{eff,NO}_3^-}$	$1.90 * 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
$D_{\text{eff,SO}_4^{2-}}$	$1.07 * 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
$D_{\text{eff,P}}$	$7.9 * 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
$D_H$	$4.8 * 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

**Tabla 3-6:** Constantes potencial Buffer (Custos 2020)

Constantes potencial Buffer por especie			
Especie	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
$\text{Ca}^{2+}$	30.3	33.5	14.6
$\text{K}^+$	23.1	23.7	48.3
$\text{Mg}^{2+}$	22.4	20.9	8.5
$\text{Zn}^{2+}$	300	2760	270
$\text{NH}_4^+$	0	0	0
$\text{NO}_3^-$	0.4	0.4	0.4
$\text{SO}_4^{2-}$	6	6	6
$P$	0	0	0

**Tabla 3-7:** Velocidad máxima y constante de Michaelis Mentel (Custos 2020)

Velocidad máxima y constante de Michaelis Mentel			
$I_{\max Ca}$	$1.042 * 10^{-9} \frac{mol}{m^2s}$	$K_m Ca$	$3.9 * 10^{-2} \frac{mol}{m^3}$
$I_{\max K}$	$5.02 * 10^{-8} \frac{mol}{m^2s}$	$K_m K$	$3.2 * 10^{-2} \frac{mol}{m^3}$
$I_{\max Mg}$	$6.5 * 10^{-9} \frac{mol}{m^2s}$	$K_m Mg$	$0.44 \frac{mol}{m^3}$
$I_{\max NH_4}$	$1.0 * 10^{-7} \frac{mol}{m^2s}$	$K_m NH_4$	$5.4 * 10^{-2} \frac{mol}{m^3}$
$I_{\max Zn}$	$9.0 * 10^{-13} \frac{mol}{m^2s}$	$K_m Zn$	$2.8 * 10^{-3} \frac{mol}{m^3}$
$I_{\max NO_3}$	$3.75 * 10^{-8} \frac{mol}{m^2s}$	$K_m NO_3$	$1.16 * 10^{-2} \frac{mol}{m^3}$
$I_{\max SO_4}$	$1.1 * 10^{-9} \frac{mol}{m^2s}$	$K_m SO_4$	$7.0 * 10^{-2} \frac{mol}{m^3}$
$I_{\max P}$	$3.26 * 10^{-8} \frac{mol}{m^2s}$	$K_m P$	$5.8 * 10^{-3} \frac{mol}{m^3}$

**Tabla 3-8:** Valores para apetencia de nutrientes por parte de la planta (Custos, Moyne, and Sterckeman 2020)

Apetencia de la planta por cada nutriente	
$FI_{Ca}$	$1.54 * 10^{-6} \frac{mol}{m}$
$FI_{Mg}$	$5.07 * 10^{-6} \frac{mol}{m}$
$FI_K$	$6.10 * 10^{-5} \frac{mol}{m}$
$FI_{NO_3}$	$3.95 * 10^{-4} \frac{mol}{m}$
$FI_{SO_4}$	$1.18 * 10^{-6} \frac{mol}{m}$
$FI_{NH_4}$	$2.54 * 10^{-5} \frac{mol}{m}$
$FI_P$	$1.27 * 10^{-6} \frac{mol}{m}$

**Tabla 3-9:** Velocidad máxima y constante de Michaelis Mentel para microorganismos que procesan hidrógeno adaptado de (Constant et al. 2010).

Velocidad máxima y constante de Michaelis Mentel		
Especie	$I_{max}$	$K_m$
<i>Streptomyces sp. MP1</i>	$1.88 * 10^{-11} \frac{mol}{m^2s}$	$1 * 10^{-4} \frac{mol}{m^3}$
<i>Streptomyces sp. MP2</i>	$1.83 * 10^{-11} \frac{mol}{m^2s}$	$1.35 * 10^{-4} \frac{mol}{m^3}$
<i>Streptomyces sp. HP3</i>	$3.34 * 10^{-11} \frac{mol}{m^2s}$	$4.3 * 10^{-5} \frac{mol}{m^3}$
<i>Streptomyces sp. HP9</i>	$3.01 * 10^{-12} \frac{mol}{m^2s}$	$3.74 * 10^{-4} \frac{mol}{m^3}$
<i>Streptomyces sp. HP12</i>	$1.53 * 10^{-11} \frac{mol}{m^2s}$	$3.61 * 10^{-4} \frac{mol}{m^3}$
<i>Streptomyces sp. HP13</i>	$2.84 * 10^{-12} \frac{mol}{m^2s}$	$1.12 * 10^{-4} \frac{mol}{m^3}$
<i>Streptomyces sp. PCB7</i>	$1.05 * 10^{-11} \frac{mol}{m^2s}$	$4.7 * 10^{-5} \frac{mol}{m^3}$
<i>S. avermitilis 46492T</i>	$3.57 * 10^{-11} \frac{mol}{m^2s}$	$3.9 * 10^{-5} \frac{mol}{m^3}$

#### ▪ Discretización

Para dar solución a ecuaciones diferenciales se puede utilizar el método de diferencias finitas el cual busca dar una solución aproximada de estas partiendo de la descripción del sistema y dando solución a cada nodo, para lo cual se debe partir del proceso de discretización la cual se puede plantea en 3 set de solución, uno donde se tienen las condiciones de frontera superiores, otro donde se definen los nodos intermedios y finalmente un set donde se tienen las condiciones de salida.

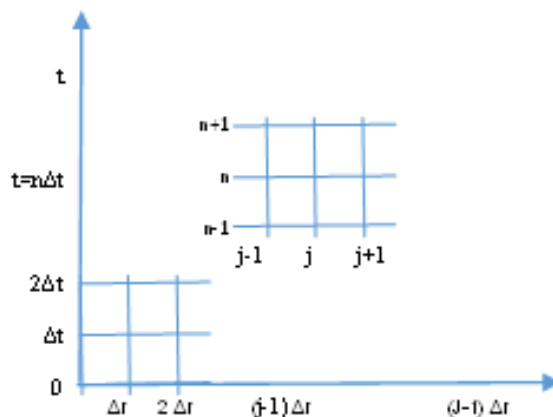
Es importante mencionar que la variación tanto para la saturación (S) como para la concentración (c) se actualizan en cada como como se muestra a continuación:

$$dS = \frac{S[i+1]-S[i-1]}{2*dx} \quad (3.47)$$

$$dc = \frac{c[i+1]-c[i-1]}{2*dx} \quad (3.48)$$

Para iniciar el proceso de desratización se propone el método de diferencias finitas, en el cual se tiene el espacio r-t, donde se tendrán pasos de  $\Delta t$  y  $\Delta r$  como se muestra en la Figura 3-5.

**Figura 3-6** Esquema para discretización



Nombre de la fuente: elaboración propia

Se puede reescribir la ecuación en coordenadas radiales se tiene que:

$$\phi \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} * \left[ D_o D(S) r \frac{\partial S}{\partial r} - K_S k(S) \right] - F_w(S, z, t) \quad (3.49)$$

Por series de Taylor

$$\phi (S_{j+1}^n) = \frac{1}{r} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\Delta r^m}{m!} \left[ D_o D(S) r \frac{\partial^m S}{\partial r^m} \right]_j^n - \frac{1}{r} [K_S k(S)] - F_w(S, z, t) \quad (3.50)$$

$$\phi (S_j^n) = \frac{1}{r} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{\Delta t^l}{l!} \left[ D_o D(S) r \frac{\partial^l S}{\partial t^l} \right]_j^n - \frac{1}{r} [K_S k(S)] - F_w(S, z, t) \quad (3.51)$$

Remplazando los demás términos

$$\phi (S_j^n) = \frac{1}{r} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{\Delta r^l}{l!} \left[ D_o \left( S^{\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{m}\right)} \left[ \left(1 - S^{\frac{1}{m}}\right)^{-m} + \left(1 - S^{\frac{1}{m}}\right)^m - 2 \right] \frac{\partial^l S}{\partial t^l} \right)_j^n - \frac{1}{r} \left[ \frac{\rho g k_s}{\mu} \left( S^{\frac{1}{2}} \left[ 1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}}\right)^{m-2} \right] \right) \right] - F_w(S, z, t) \right.$$

Además, se hace la definición en 3 set:

Set 1: establece las condiciones de frontera iniciales en el nodo 0

$$f[i] = -D0 * \frac{D(S[i])}{dx} * (S[i + 1] - S[i]) + Ks * k(S[i]) - Wdim \quad (3.52)$$

Set 2: es para los nodos intermedios que están entre 1 y n-1

$$f[i] = \frac{f^i}{dt} * (S[i] - S0[i]) - D0 * D(S[i]) * \frac{S[i+1]-2*S[i]+S[i-1]}{dx} - mu * dS + Fw_{node[i]} \quad (3.53)$$

Set 3: condiciones de frontera en el nodo n-1

$$f[i] = -D0 * \frac{D(S[i])}{dx} * (S[i] - S[i - 1]) + Ks * k(S[i]) \quad (3.54)$$

## 3.7 Modelo de equilibrio químico del suelo

Los modelos matemáticos son una herramienta que permite comprender y predecir diferentes fenómenos, por esto este trabajo busca utilizar un modelo matemático que permita comprender el efecto de la aplicación de biochar en suelos. El análisis de los fenómenos del suelo es bastante complejo ya que en este se incluyen reacciones de difusión, convección, reacciones químicas, interacción de fases, entre otros, que hace que los modelos deban tener en cuenta diferentes variables, con esto en mente se desea hacer uso de PHREEQC para acoplar al modelo físico los procesos de interacción química que se dan en el suelo, para esto se tomará como punto de partida el método de Godunov.

### 3.7.1 Método de Godunov

El método de Godunov permite avanzar la solución en el tiempo, asumiendo que el cálculo en el punto n+1 puede ser calculado en dos pasos, primero se resuelve en este caso el modelo de transporte propuesto en un tiempo  $\Delta t$ , posterior a esto se define un valor en n+1 con la solución del modelo de equilibrio químico (Dukowicz, Cline, and Addessio 1989), (Florez 2008).

Es un método que considera la propagación de información por medio de esquemas numéricos de separación de la diferencia de flujo, este permite resolver sistemas de conservación tomando como punto de partida la discretización por volúmenes o elementos finitos, sin importar que se trate de variables discontinuas, por lo que se puede dar solución sin importar si se tiene un perfil continuo o discontinuo, además se garantizan las leyes de conservación, la solución se da con el equilibrio de los flujos a través de las interfaces de las celdas por medio de la solución de Riemann en las interfaces, la forma general de escribirlo se presenta a continuación (Venant and Entre n.d.), (GUINOT 2003).

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( F_{j+\frac{1}{2}}^* - F_{j-\frac{1}{2}}^* \right) \quad (3.55)$$

Este considera el flujo numérico entre dos celdas y tiene la solución local de cada elemento, permitiendo dar solución a un problema tipo Riemann, partiendo del valor promedio de la variable sobre cada celda y la vecina lo que permite reconstruir el valor en el centro de la celda, finalmente por medio del método se da solución a una sola ecuación escalar homogénea, se debe tener en cuenta que al momento de dar solución por medio de este método se considera que se cumple la condición de Courant, donde es constante sobre el eje del tiempo (Venant and Entre n.d.), (GUINOT 2003).

### 3.7.2 PHREEQC

Phreeqc es un software de simulación que ha sido utilizado para la solución de problemas geoquímicos se basa principalmente en simular reacciones químicas y procesos que involucran el transporte de agua, este toma como base el equilibrio en soluciones acuosas donde se puede tener interacción de minerales, gases, sólidos y superficies de sorción (Parkhurst and Appelo 2013). Este programa incluye:

- Reacciones de intercambio iónico: tiene en cuenta el coeficiente de actividad o coeficiente de fracción activa, el cual se multiplica por la fracción y determina la actividad de la especie en el intercambio iónico (Parkhurst and Appelo 2013).
- Procesos con sólidos: tiene como punto de partida el enfoque de Guggenheim para la actividad de componentes binarios no ideales (Parkhurst and Appelo 2013).
- Intercambios entre solución y fase gaseosa: considera intercambio de gases ideales o equilibrio con Peng Robinson para solubilidad de gases a alta presión (Parkhurst and Appelo 2013).
- Modelo de transporte: utiliza el método de diferencias finitas para transporte advectivo o dispersivo (Parkhurst and Appelo 2013).

### 3.7.3 Componentes y reacciones para integrar

El uso de Phreeqc tiene como propósito integrar las reacciones químicas del suelo, dentro de la concentración final de los componentes de interés. El programa estará dividido en

varias secciones, teniendo en cuenta, una de dilución de minerales, una de dilución de la fase gaseosa y finalmente una sección de equilibrio y transporte de la fase acuosa.

▪ **Fase sólida**

Los procesos de dilución de minerales se dan debido a los procesos de meteorización por dilución acida en el suelo, en este se presentan reacciones químicas que relacionan diferentes nutrientes en este caso se van a tener en cuenta los siguientes minerales:

**Tabla 3-10:** componentes de la fase sólida agregados en Phreeqc.

Mineral	Elemento que aporta	Nombre en Phreeqc	
Illita	Potasio	Illite	PHASES
Muscovita	Potasio	K-mica	PHASES
Microclina	Potasio	K-feldspar	PHASES
Calcita	Calcio	Calcite	PHASES
Dolomita	Calcio, Magnesio	Dolomite	PHASES
Yeso	Calcio	Gypsum	PHASES
Hidroxiapatita	Calcio, fósforo	Hydroxyapatite	PHASES
Feldespatos	Calcio	Anorthite	PHASES

▪ **Fase gaseosa**

La fase gaseosa tiene una composición que varía de forma rápida debido a la dinámica del suelo, su componente principal es el dióxido de carbono aportado por procesos biológicos por raíces y microorganismos durante el proceso de respiración, la cantidad de fase gaseosa varía dependiendo de la condiciones del suelo, la textura y la estructura del mismo, en este caso se tomará como referencia los suelos de cultivo en capacidad de campo que tiene 10% (Amésquita et al. 2001) ,(Moreno and Sara Ibáñez 2016).

La fase gaseosa está relacionada con la solución del suelo, ya que la reacción principal que tiene es la disolución de dióxido de carbono, aportando al suelo carbonato y aniones, por lo general está conformado por 20 % de oxígeno, 78% de nitrógeno y 2% de dióxido de carbono en estado de saturación, de esta composición depende el crecimiento de las raíces está relacionado con la producción de dióxido de carbono, para determinar la cantidad de componentes entre la fase líquida y gaseosa se utiliza como referencia o punto de partida el coeficiente de distribución de las fases, las fases



se relacionan también por procesos de difusión, esta interacción tiene lugar no solo en el suelo sino también con el aire atmosférico, el suelo al ser una membrana permeable permite el intercambio selectivo de componentes, principalmente oxígeno y dióxido de carbono entre el aire del suelo y la atmósfera (BEAR 1964).

Para el estudio de interacción de la fase gaseosa se considera presencia de vapor de agua, dióxido de carbono, oxígeno y nitrógeno, como componentes de la fase gaseosa del suelo, para este caso se define un equilibrio entre la fase gaseosa y la solución del suelo, en este caso se tiene equilibrio, descomposición y reacciones de óxido-reducción.

**Tabla 3-11:** componentes de la fase gaseosa agregados en Phreeqc.

Componente	Porcentaje en fase gaseosa del suelo	Nombre en Phreeqc
Nitrógeno	78-80 %	N <sub>2</sub> (g) PHASES
Oxígeno	10-20 %	O <sub>2</sub> (g) PHASES
Dióxido de carbono	0.2-3.5%	CO <sub>2</sub> (g) PHASES
Amonio	3%	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>

#### ▪ Reacciones de óxido-reducción

Estas reacciones están involucradas con la actividad microbiana, provee elementos involucrados en otras reacciones de equilibrio y transporte.

**Tabla 3-12:** componentes con reacciones de oxidoreducción agregados en Phreeqc.

Componente	Nombre en Phreeqc
Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>3+</sup> SOLUTION_SPECIES
Fe (OH) <sub>3</sub>	Fe (OH) <sub>3</sub> SOLUTION_SPECIES
MnO <sub>2</sub>	Mn <sup>+2</sup> SOLUTION_SPECIES
Cu <sup>2+</sup>	Cu <sup>+2</sup> SOLUTION_SPECIES
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> SOLUTION_SPECIES
H <sup>+</sup>	2H <sup>+</sup> SOLUTION_SPECIES
Al <sup>3+</sup>	Al SOLUTION_SPECIES

▪ **Equilibrio**

En el caso de intercambio iónico se deben definir las especies involucradas, para esto se toma como punto de partida la química de suelos.

**Tabla 3-13:** componentes agregados al módulo de equilibrio en Phreeqc.

Proceso del suelo	Nombre en Phreeqc
Nitrificación -desnitrificación	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> SOLUTION_SPECIES
Descomposición, amonificación y volatilización	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> SOLUTION_SPECIES
Dilución	K <sup>+</sup> SOLUTION_SPECIES
Dilución	H <sub>2</sub> O SOLUTION_SPECIES
Dilución y reacciones con CO <sub>2</sub>	Ca <sup>+2</sup> SOLUTION_SPECIES
Dilución	Mg <sup>+2</sup> SOLUTION_SPECIES
Descomposición	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> SOLUTION_SPECIES
Descomposición y precipitación	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> SOLUTION_SPECIES
Descomposición	Fe <sup>+2</sup> SOLUTION_SPECIES
Neutralización de Ca	Cl <sup>-</sup> SOLUTION_SPECIES
Dilución Al <sup>3+</sup>	Al SOLUTION_SPECIES

▪ **Ácidos exudados por la raíz**

En el caso de los ácidos exudados por las raíces de la planta, se consideró que las raíces tienen exudados, los cuales son sustancias orgánicas e intercambian sustancias y elementos con la solución del suelo, estos fueron agregados dentro de los valores de entrada de cada uno de los elementos como se especifica en la siguiente tabla (RUBIO 2011). Este ajuste de los elementos se agregó a Phreeqc el contenido de moles producidas de cada elemento, como consecuencia de la lixiviación de ácidos por parte de la raíz de las plantas.

**Tabla 3-14:**Ácidos exudados por la raíz, adaptado de (RUBIO 2011)

Acido	mg/l	Productos		
Oxálico	10	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Tartárico	200		8CO <sub>2</sub>	6 H <sub>2</sub> O
Málico	200		4CO <sub>2</sub>	3 H <sub>2</sub> O
Acético	300		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Maleico	2		4 CO <sub>2</sub>	2 H <sub>2</sub> O
Cítrico	300		12 CO <sub>2</sub>	8 H <sub>2</sub> O
Succínico	300		4 CO <sub>2</sub>	7 H <sub>2</sub> O

---

Fumárico	2,5	4 CO <sub>2</sub>	2 H <sub>2</sub> O
----------	-----	-------------------	--------------------

---

### 3.8 Verificación del modelo químico planteado

Los modelos matemáticos son una herramienta que permite comprender y predecir diferentes fenómenos, es por esto que este trabajo busca utilizar un modelo matemático que permita comprender el flujo de nutrientes en el suelo, el análisis de los fenómenos del suelo es bastante complejo ya que en este se incluyen reacciones de difusión, convección, reacciones químicas, interacción de fases, entre otros, que hace que los modelos deban tener en cuenta diferentes variables, en el suelo se encuentran diferentes elementos que hacen parte esencial de la nutrición de las plantas, estos interactúan por medio de reacciones químicas y están presentes en diferentes estados.

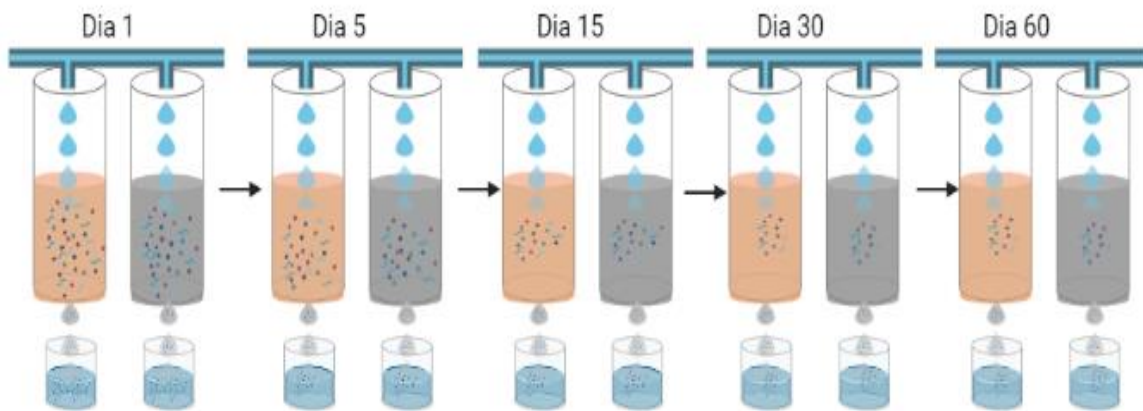
En el suelo se presentan las siguientes fases: la fase líquida, la cual es principalmente agua que es utilizada como medio de transporte e intercambio de elementos y compuestos químicos esenciales para el crecimiento de las plantas, las reacciones principales que se dan en esta fase son reacciones de oxidación-reducción y reacciones de transporte y equilibrio químico; la fase sólida que ocupa aproximadamente el 55% del suelo, es un medio poroso donde se encuentra materia orgánica, materia inorgánica, minerales, entre otros elementos los cuales liberan nutrientes a la fase líquida; finalmente se tiene la fase gaseosa que puede ocupar aproximadamente el 10% del suelo cuando se está en capacidad de campo, es decir se tiene un estado de saturación en el suelo, esta se caracteriza principalmente por tener presencia de dióxido de carbono y oxígeno los cuales interactúan con elementos de la solución del suelo hasta llegar al equilibrio.

Estas fases se relacionan por medio de reacciones químicas, por lo que se consideró el uso de un software llamado Phreeqc, el cual se utiliza para realizar simulación de procesos geoquímicos se basa principalmente en simular reacciones químicas y procesos que involucran el transporte de agua, esta toma como base el equilibrio en soluciones acuosas donde se puede tener interacción de minerales, gases, sólidos y superficies de sorción; Las reacciones o procesos que se pueden simular en este programa son los siguientes: Reacciones de intercambio iónico las cuales tiene en cuenta el coeficiente de actividad o

coeficiente de fracción activa, el cual se multiplica por la fracción y determina la actividad de la especie en el intercambio iónico, procesos con sólidos estos tienen como punto de partida el enfoque de Guggenheim para la actividad de componentes binarios no ideales, intercambios entre solución y fase gaseosa los cuales consideran intercambio de gases ideales o equilibrio con Peng Robinson para solubilidad de gases a alta presión y los modelo de transporte que utilizan el método de diferencias finitas para transporte adventivo o dispersivo [2].

Por lo tanto, se desea hacer uso de PHREEQC para comprender la química del suelo, el cual será comparado por medio de pruebas experimentales. Esto consiste en evaluar cambios en las propiedades químicas del suelo, en la Figura 3-6 se presenta el montaje experimental realizada, por medio de la cual se evaluaron los cambios función del tiempo para dos tipos de suelo: un suelo inerte y un suelo orgánico, inicialmente se realiza la caracterización del suelo con determinación de Ca, Mg, K, P soluble, pH, CIC, MO, NO<sub>3</sub> y NH<sub>4</sub>, esta información se utiliza como datos iniciales en Phreeqc, posterior a esto se recolecta el lixiviado los días 0, 5, 15, 30 y 60, se realiza el análisis y caracterización química del lixiviado y con un balance de masa se determina el contenido del suelo, el cual se compara con los resultados de Phreeqc en la Tabla 3-15.

**Figura 3-7.** Montaje experimental



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Una vez se tengan los resultados experimentales, son comparados con los resultados del modelo de equilibrio químico en PHREEQC, estos resultados se presentan en la Tabla 3-15, en la cual se realiza una comparación con los datos que arroja PHREEQC donde los

datos de entrada al programa se modificaron para ser iguales a los del suelo evaluado, esta prueba se realizó tanto para el lixiviado del suelo arenoso como para el lixiviado del suelo orgánico, evaluando los macronutrientes principales presentes en la solución del suelo y la concentración de los mismos con el paso del tiempo, para determinar en qué punto se tiene igual valor de respuesta del programa con la realidad.

**Tabla 3-15:** Comparación en el equilibrio químico de nutrientes disponibles en la solución del suelo para valores experimentales y valores del modelo en PHREEQC.

<b>Suelo inorgánico</b>				
	<b>K</b>	<b>P</b>	<b>NO3-</b>	<b>NH4+</b>
Valor experimental	0.073	1.30e-6	0.0087	0.47
Valor del modelo	0.073	2.94e-7	0.0088	0.47
<b>Suelo orgánico</b>				
	<b>K</b>	<b>P</b>	<b>NO3-</b>	<b>NH4+</b>
Valor experimental	0.033	0.00083	0.0029	0.034
Valor del modelo	0.033	0.00089	0.0030	0.034

El programa realizado en Phreeqc permite determinar el equilibrio químico del suelo como se observa en la Tabla 3-15, en esta se puede evidenciar un ajuste para el día 15, para el caso del suelo orgánico se puede identificar que el potasio, nitrito y amonio tienen alto ajuste entre los resultados experimentales y los resultados obtenidos en la simulación, en el caso del fósforo no se tiene un ajuste, puede ser porque el valor inicial de este elemento era muy pequeño y como se evidencio a partir de las pruebas de liberación de nutrientes este se pierde rápidamente, en cuanto al suelo arenoso se presentó un ajuste con todos los macronutrientes trabajados, en este se tiene un valor mayor de contenido de fósforo por lo que es posible tener un ajuste más cercano que en el suelo arenoso.

Esta comparación permite determinar que el código realizado en PHREEQC tiene resultados de equilibrio químico que pueden ser comparados con resultados experimentales.

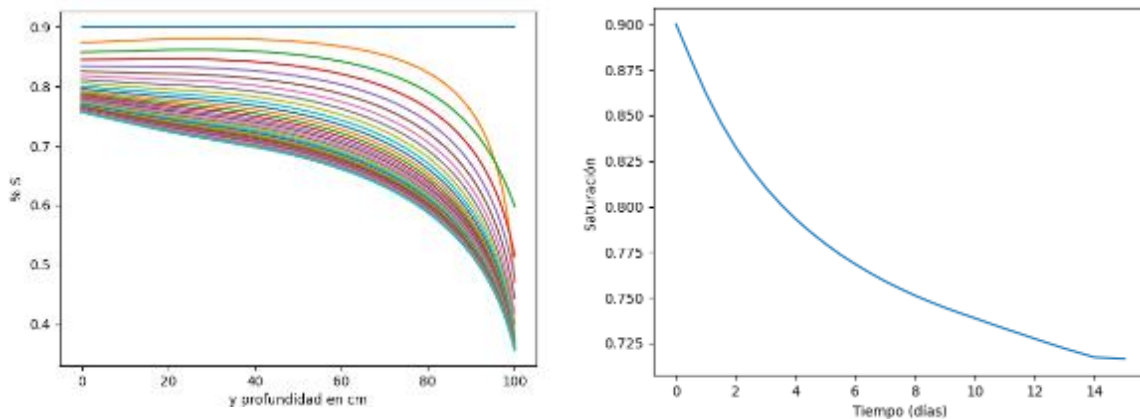
### 3.9 Verificación del modelo integrado de transporte y equilibrio químico sin aplicación de biochar

A continuación, se realiza el análisis para los resultados obtenidos en la simulación, donde se tiene acoplado el modelo de equilibrio químico y el de transporte, se realizó este acople sin la aplicación del biochar con el fin de comparar los resultados obtenidos con el modelo con resultados experimentales reportados en la literatura, este análisis se realizará para la saturación del suelo y los macronutrientes principales presentes en la solución del mismo.

#### 3.9.1 Respuesta de saturación del suelo

Para analizar el comportamiento de saturación en el suelo, se realizó la simulación con saturación inicial de 90%, para esto se agregan datos de entrada al modelo para suelo orgánico con porosidad 0.4 y una difusividad del agua encontrada en la literatura de 1000 cm<sup>2</sup>/día, la simulación se realizó para un metro de profundidad, distribuido en 200 nodos, en un tiempo de 15 días con un delta de tiempo de 0.5 días. En la Figura 3-7 se encuentra a mano izquierda el resultado obtenido de saturación del suelo para los diferentes tiempos, en la derecha se presenta la respuesta en función del tiempo para una profundidad específica de 30 cm.

**Figura 3-8.** Gráficas de nutrientes en función del tiempo.



Nombre de la fuente: Elaboración propia

En la Figura 3-7 posible observar un comportamiento descendente en función de la profundidad del suelo, es decir a medida que el suelo es más profundo la saturación va

disminuyendo, este comportamiento corresponde a lo esperado, ya que se estableció como condición de frontera a la salida un cambio en el horizonte del suelo que permite que se tenga in proceso de infiltración a las siguientes capas del suelo, es decir, el agua continúa infiltrado a la siguiente capa de suelo después del metro de profundidad.

Para evaluar la respuesta obtenida, se ha realizado una búsqueda bibliográfica, en esta se pudo encontrar que otros autores reportan datos de simulaciones y experimentales, en los cuales se evidencia la variación de la saturación del suelo en función de la profundidad, al igual que los resultados encontrados en la simulación se observa que a medida que aumenta la profundidad la saturación va disminuyendo, uno de los modelos encontrados en la revisión bibliográfica es el modelo de Fredlund y King el cual está relacionado con la presión del aire, la porosidad y distribución de poros, esta permite evaluar la infiltración y saturación del suelo en este se encuentra la probabilidad de saturación del suelo, la cual al disminuye con la profundidad; por otro lado, Ochsner presenta el movimiento del agua en el suelo por medio de un modelo dinámico en el software CHEMFLO, en el cual se identificó que al ingresar agua cerca del estado de saturación la velocidad del frente húmedo o el contenido volumétrico de agua va disminuyendo con el tiempo y la profundidad, es decir la saturación del suelo disminuye a medida que aumenta la profundidad del suelo; Oliveira, realizó un estudio experimental en un periodo de dos años estudiando cambios en la saturación del suelo con aplicación de cal, a medida que aumenta la profundidad se presenta una disminución en la saturación del suelo; por lo que la respuesta que se obtiene para la saturación es coherente con lo reportado en la literatura, cabe resaltar que este comportamiento puede variar en función de las propiedades del suelo, ya que condición de frontera a la salida depende de propiedades del suelo como la porosidad, potencial de succión, permeabilidad, entre otras (Guo 2020; Hidalgo, Vega, and Obando 2018; Ochsner 2019; Oliveira et al. 2003).

### **3.9.2 Respuesta de nutrientes**

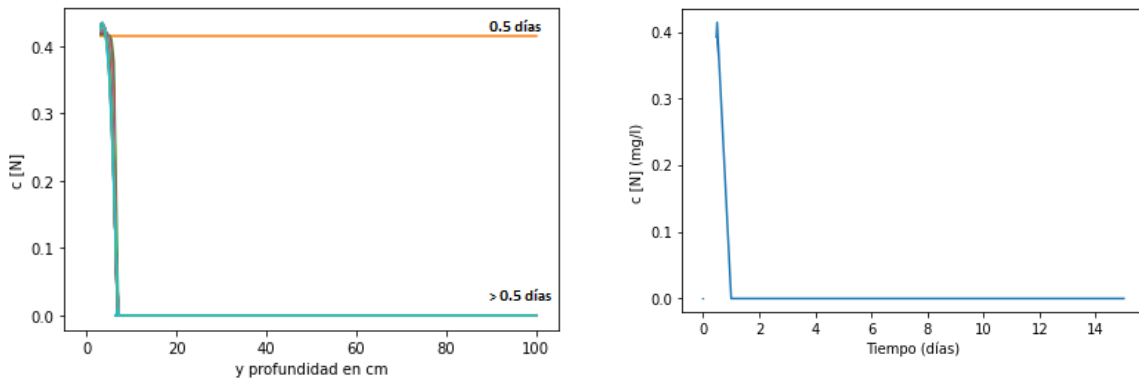
En el caso del flujo de nutrientes, se realizó la evaluación para los tres macronutrientes principales presentes en el suelo, nitrógeno, fósforo y potasio, en este caso se tomaron en su forma iónica la cual puede ser absorbida por la raíz para los procesos de nutrición vegetal, es decir para nitrógeno  $\text{NO}_3^-$ , para fósforo  $\text{PO}_4^{2-}$  y para potasio  $\text{K}^+$ .

Para la entrada de los nutrientes se estableció una concentración inicial para suelo orgánico, al igual que en la saturación del suelo para cada uno se presentan dos figuras, en la izquierda se tiene la gráfica en función de la profundidad para los tiempos de simulación, esta simulación se realizó en todos los casos para 15 días con un delta de tiempo de 0.5 días, al lado derecho se presenta la gráfica en función del tiempo para una profundidad de 30 cm, donde aún se tiene presencia de la raíz y se puede analizar la dinámica del nutriente con el efecto de los términos fuente, es importante mencionar que el término de fuente de aplicación de biochar no está encendido en la simulación realizada, ya que el objetivo es poder comparar los resultados obtenidos con reportes de la literatura.

- **Nitrógeno**

En la Figura 3-7 se presentan las gráficas obtenidas con el modelo matemático acoplado al modelo de equilibrio químico, en esta se presentan los resultados en función de la profundidad a diferentes tiempos y en función del tiempo para una profundidad específica de 30 cm.

**Figura 3-9.** Gráficas de nitrato en función del tiempo.



Nombre de la fuente: Elaboración propia

El nitrógeno se evaluó como la concentración de nitrato, este elemento es esencial en las plantas ya que está relacionado con los procesos de crecimiento y formación de estructuras, en la Figura 3-7 se presenta el resultado obtenido en la variación de nitrógeno en el suelo, este resultado fue comparado con diferentes fuentes bibliográficas, donde se logró identificar un comportamiento similar entre la respuesta del modelo matemático y las fuentes encontradas, en ambos casos de presenta una disminución del nutriente en función de la profundidad del suelo entre

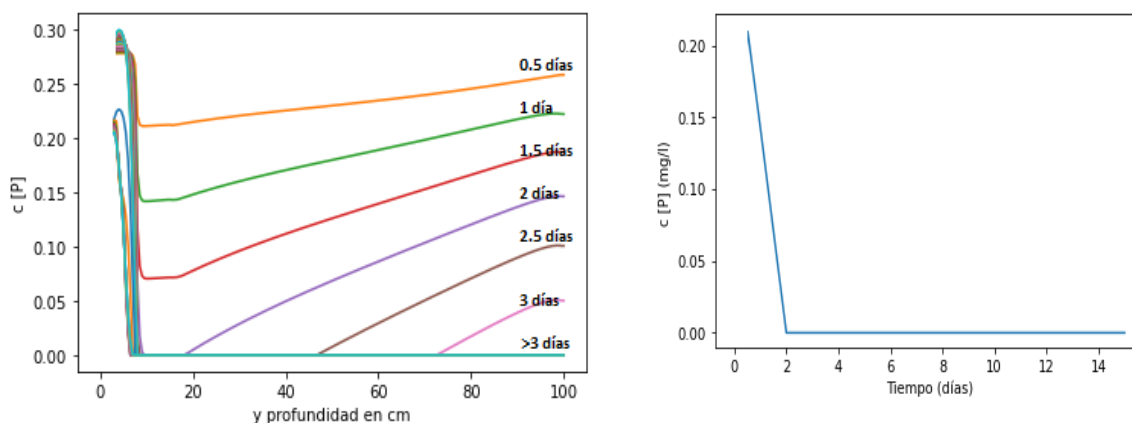


los primeros 10 centímetros, también en otra de las referencias se encontró que cuando la profundidad de muestreo supera los 90 cm y en otra de las fuentes a partir de los 30cm, en términos generales se encontró que la concentración de nitrógeno del suelo mostró un patrón decreciente con aumento de profundidad y el tiempo, es importante mencionar que estos resultados varían con el tipo de suelo y los diferentes tratamientos aplicados en las fuentes consultadas.(Acevedo et al. 2011; Das et al. 2016; Groppo et al. 2015a; Yang et al. 2014; Zhu et al. 2002).

#### ▪ Fósforo

Para el caso del fósforo se presentan los resultados obtenidos en la simulación en la Figura 3-8, en esta se presenta el cambio del nutriente en función de la profundidad para diferentes tiempos, y en función del tiempo para una profundidad de 30 cm, los cambios en la concentración del fosforó se evaluaron sin la aplicación del biochar para poder realizar una comparación entre los resultados del modelo y los resultados de investigaciones reportados en la literatura.

**Figura 3-10.** Graficas de fósforo en función del tiempo.



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Se identificó en la Figura 3-8 que a medida que aumentaba la profundidad se daba una disminución en la concentración de fosforó, esto cuando se analizan los primeros 20 cm de profundidad, es decir, la cantidad disponible disminuye en los primeros centímetros de suelo a medida que pasa el tiempo, inicialmente la línea naranjada presenta disminución de la cantidad inicial, y así sucesivamente se tiene

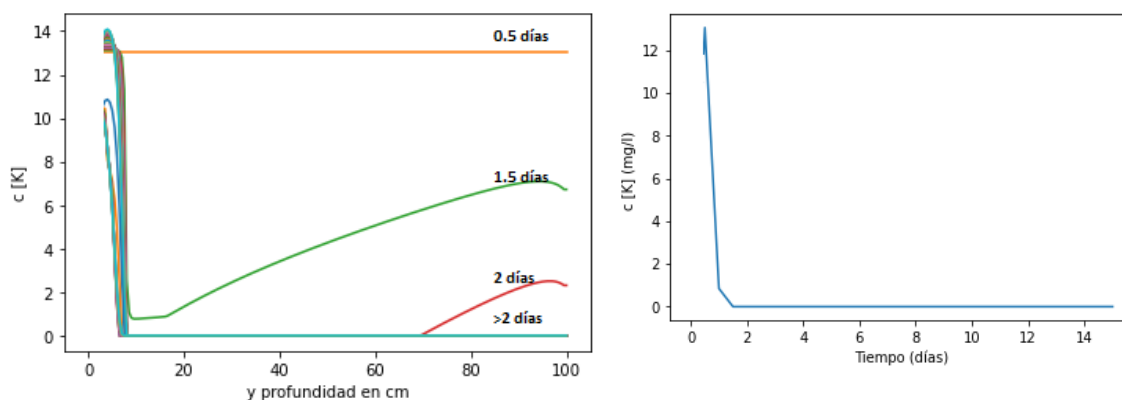
una disminución de la concentración, los resultados obtenidos en los primeros centímetros de profundidad se pueden comparar con resultados de autores como Lang et al en 2017 analizó la concentración de fosforó en función de la profundidad del suelo y estableció que se observan concentraciones decrecientes del fosforó total a medida que aumenta la profundidad en el suelo, por otro lado, Ciro y Alexandre en el año 2014 reportan una disminución del fosforó disponible en los primeros 10-20 cm de suelo y a partir de los 30 cm de profundidad este se estabilizaba. En otro estudio, Groppo en 2015 reportó absorción de fosforó en los primeros 60 cm de suelo, inicialmente entre 0-30 cm se tiene un consumo más pronunciado y a medida que se acerca a 60 cm se va estabilizando la concentración tanto en pasturas, suelos forestales y medios selectivos. Hart et al en 2009 encontró que el fósforo presente en el suelo es mayor en la parte superior cercana al punto donde se da la fertilización; a medida que aumenta la profundidad se da una disminución rápida de este componente y por debajo de 12 pulgadas (30 cm) los valores de fósforo se estabilizan y son uniformes tanto en suelos fertilizados, como en los no fertilizados. Finalmente, Graeme en 2019 presenta la estratificación vertical y horizontal del fósforo, y determina la disminución de este elemento en los primeros 6 cm y luego la estabilización, en todos los reportes encontrados se tiene una relación con el comportamiento reportado, en este caso en estudios de campo realizados en diferentes condiciones y con aplicación de diferentes elementos de fertilización, donde se tiene un comportamiento decreciente de la concentración del nutriente. Por lo que el resultado encontrado por medio de la simulación encontrada es coherente (Graeme Sandral, Ehsan Tavakkoli, Maryam Barati y Russell Pumpa (Departamento de Industrias Primarias de Nueva Gales del Sur, Instituto Agrícola Wagga Wagga, Wagga Wagga, NSW) (Centro Graham para la Innovación Agrícola, Universidad Charles Sturt, Wagga Wag 2019; Groppo et al. 2015b; Hart et al. 2014; Lang et al. 2017; Rosolem and Merlin 2014).

Sin embargo, los reportes encontrados en la literatura analizan los resultados para los primeros centímetros de profundidad, la simulación realizada se analizó hasta los 100 cm de profundidad donde se pudo observar un pequeño aumento en la cantidad de nutrientes que al final del paso del tiempo se pierden debido a procesos de lixiviación hacia las demás capas del suelo.

- **Potasio**

En la Figura 3-9 se presentan los resultados obtenidos en el modelo para los cambios en la concentración de potasio en función de la profundidad y el tiempo, estos resultados serán comparados con reportes de la literatura con el objetivo de analizar el comportamiento y su ajuste con resultados experimentales reportados en otras investigaciones, al igual que en los casos anteriores esta simulación corresponde a 15 días con un delta de tiempo de 0.5 días, a la izquierda se presentan los resultados en función de la profundidad y al lado derecho se presenta el resultado para el nutriente en función del tiempo para 30 cm de profundidad.

**Figura 3-11.** Gráficas de potasio en función del tiempo.



Nombre de la fuente: Elaboración propia

En la Figura 3-9 se puede observar un consumo de los otros nutrientes, tanto en función de la profundidad como función del tiempo se puede ver una disminución en la cantidad de nutriente marcada de forma significativa en los primeros centímetros de profundidad, antes del día 2 se logra tener una pequeña retención del nutriente, pero con el paso del tiempo se tiene un consumo o pérdida por lixiviación del elemento, en la gráfica de la derecha que presenta el cambio en función del tiempo para la profundidad de 30 cm se tiene un consumo marcado, que luego del segundo día se consume completamente. En 2011 Costa et al encontraron de forma experimental que se da una disminución en los niveles de potasio en el suelo a medida que aumenta la profundidad evaluado a profundidades hasta 20 cm coherente con los resultados encontrados, este comportamiento también es reportado por Hart et al en 2009 como resultado de pruebas de profundidad en campo, donde el potasio disponible es mayor en la superficie del suelo o la profundidad de labranza, por debajo de esta (entre 10-20

cm) se tiene un valor que tiende a la estabilidad, recalcando que en todos los casos por debajo de 24 pulgadas se tiene un valor uniforme e igual para suelos fertilizados y no fertilizados; los resultados reportados del comportamiento del potasio concuerdan con los resultados obtenidos en la simulación (Crusciol et al. 2011; Hart et al. 2014).

De manera global el comportamiento de la concentración para todos los nutrientes por medio de la simulación presenta una disminución rápida de los nutrientes, posterior a esto se estabiliza o se consume completamente, en la simulación actual no se tiene una tasa de fertilización por lo que el consumo se da rápidamente de acuerdo a los valores iniciales ingresados en la simulación, más adelante se tiene un aporte de nutrientes por efecto del biochar de biochar para cada uno de los macronutrientes.

En las Figuras 3-7, 3-8 y 3-9 se presenta el comportamiento encontrado para cada uno de los nutrientes, donde se evidencia un consumo inicial y la estabilización de cada elemento a diferentes concentraciones, además, el caso del potasio considerando la serie lio trópica del suelo se ha identificado que el potasio es uno de los componentes que se consumen más rápido, por lo que siempre se encuentra en menor proporción con respecto al nitrógeno o fósforo, en este caso en el resultado de la simulación es coherente con el comportamiento esperado.

En todos los casos, los reportes de la literatura utilizados para realizar la comparación se analizaron en los primeros 20 cm de suelo, donde se tiene un comportamiento acorde a lo reportado, sin embargo, como la profundidad de simulación es hasta 100 cm se identificó que inicialmente se presenta el consumo y la disminución de los elementos, posterior a esta etapa se presenta una acumulación de nutrientes a mayor profundidad en los primeros días, pero al final del tiempo se tienen las pérdidas por lixiviación o consumo que llevan a que se agoten los macronutrientes en el suelo.

### **3.10 Acople de Modelo de transporte y modelo químico acoplados**

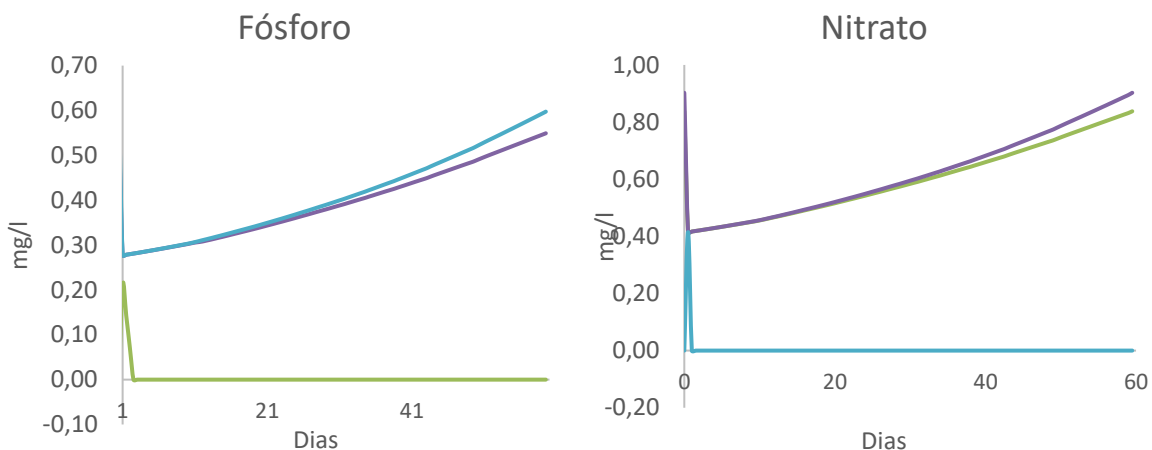
Una vez acoplados los modelos teniendo en cuenta la propuesta de Godunov, se evalúa el efecto de cada uno de los términos fuente propuestos en el modelo de transporte, para el suelo a una profundidad de 30 cm, donde aún se tiene presencia de raíces, todas las simulaciones realizadas incluyen el modelo de equilibrio químico.

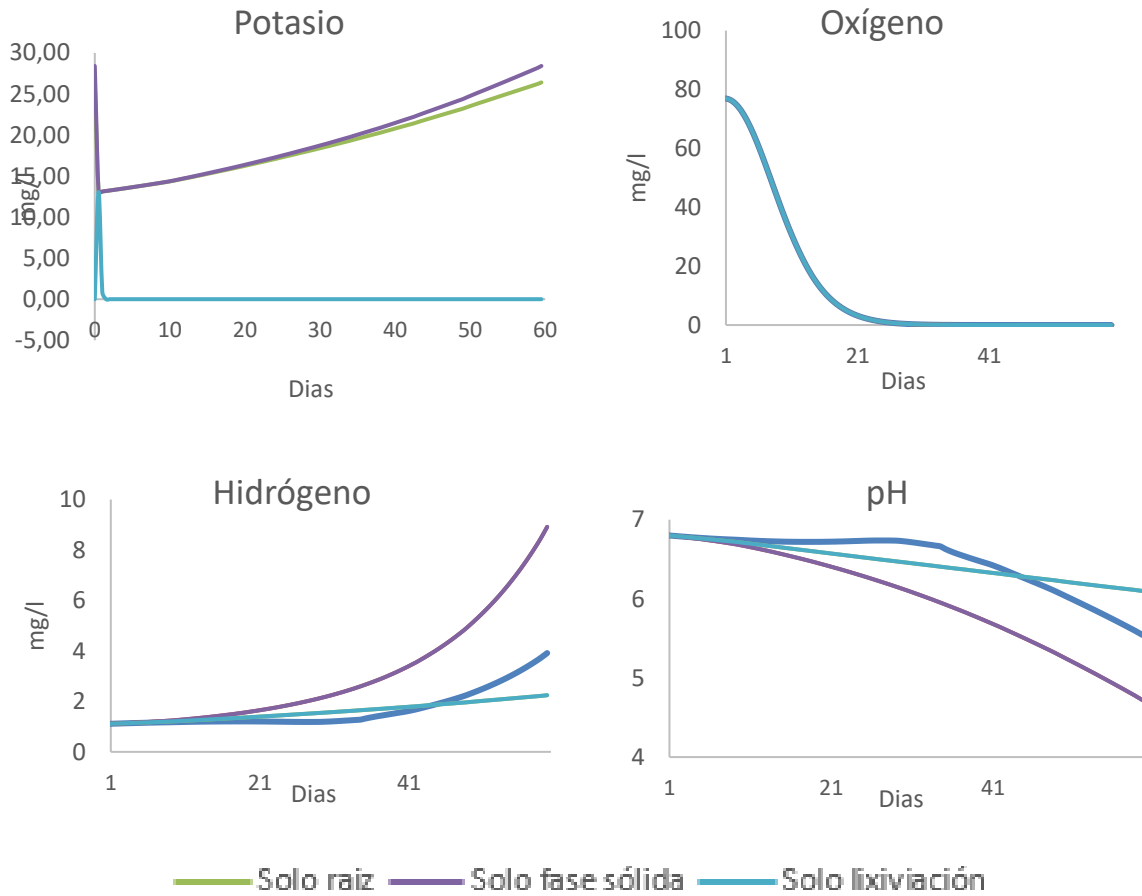
La evaluación de cada uno de los términos fuente permite determinar el efecto individual y evaluar su relevancia en la dinámica de los nutrientes en el suelo, en la sección 3.10.1 se presentan los resultados de cada uno de los términos fuente evaluados de forma independiente.

### 3.10.1 Evaluación de términos fuente

En la Figura 3-10, se presentan el efecto de la absorción por parte de la fase sólida y la correspondiente a la raíz, además de las pérdidas por lixiviación. Se realizó la simulación del término fuente de la raíz, el lixiviado y la fase sólida durante 60 días con un delta de tiempo de 0.5 días y se evaluó a una profundidad de 30 cm donde aún se tiene presencia de las raíces. El resultado obtenido de la simulación del término fuente de la raíz se representa con una línea verde, la fase sólida se ilustra con una línea morada y la línea azul es para representar para la respuesta del término fuente asociado a la lixiviación.

**Figura 3-12.** Gráficas de nutrientes en función del tiempo para términos fuente.





Nombre de la fuente: Elaboración propia

En el caso del término fuente de la raíces (línea verde) se evidencia un comportamiento similar para el fósforo, nitrato y potasio; puesto que estos son macronutrientes consumidos por la planta. En estos se logra observar una disminución de la concentración en comparación con la fase sólida (línea morada), esto se explica por la mayor capacidad de absorción de la raíz con respecto al aporte de macronutrientes por la fase sólida.

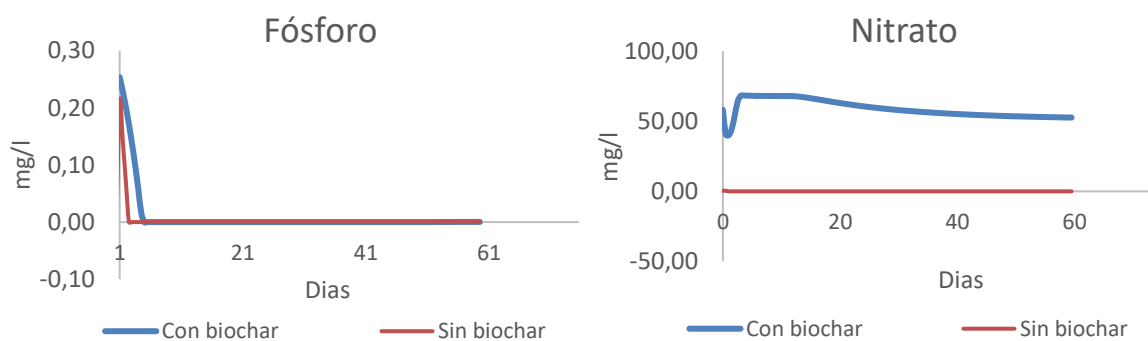
Al realizar la simulación del modelo considerando solo el aporte de la matriz sólida del suelo como un término fuente que aporta minerales por la disolución de estos, se puede evidenciar un pequeño incremento en los nutrientes y la liberación de estos en función del tiempo con una tendencia similar para nitrato, fósforo y potasio, es importante mencionar que la matriz sólida del suelo varía dependiendo del tipo de suelo, por lo que se debe realizar una caracterización previa de los minerales que se van a considerar en el modelo, a la hora de cambiar el tipo de suelo en el que se desee aplicar el modelo.

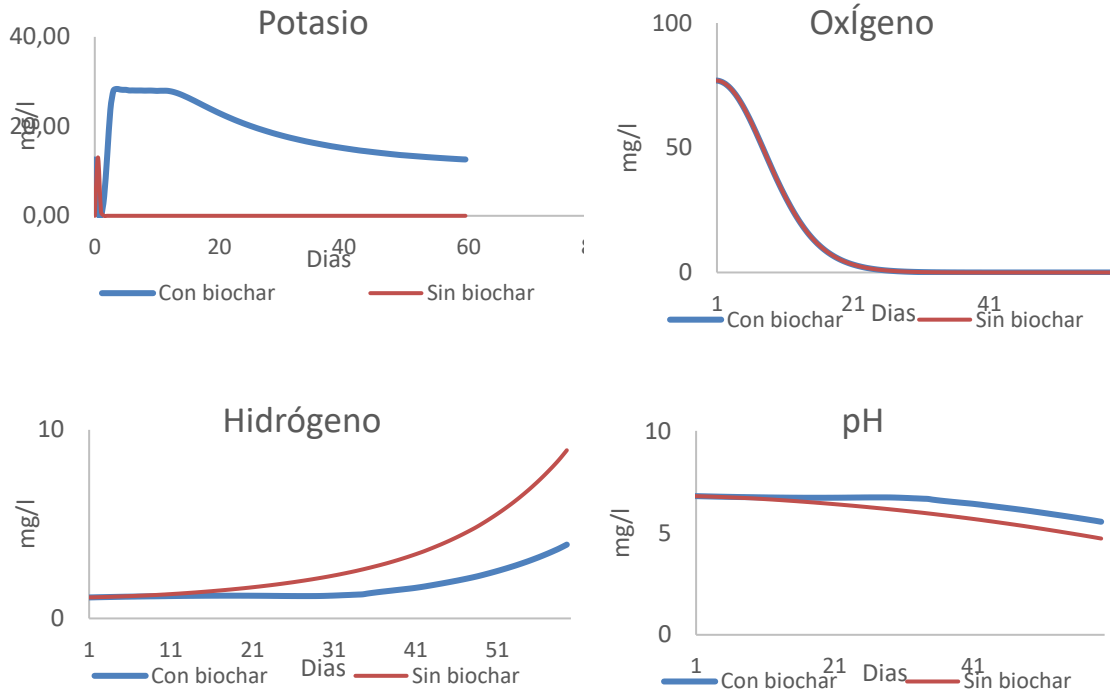
El proceso de lixiviación en el suelo representa cerca del 80% de la pérdida de nutrientes, esto se puede evidenciar en los resultados presentados en la Figura 3-10 al tener solo el término lixiviación en el modelo matemático (línea azul) todos los nutrientes van a cero de forma rápida, lo cual concuerda con los reportes realizados en la literatura, para nitrato, fósforo y potasio se da una pérdida significativa por lixiviación, llevando todos los elementos a cero, en este caso al no contar con el aporte del biochar y la matriz sólida del suelo se hace evidente la pérdida de elementos por este fenómeno ver Figura 3-12.

- **Evaluación de la aplicación del biochar con el modelo matemático**

Una vez evaluados los términos fuente de raíz, lixiviación y fase sólida se realizó la evaluación del término fuente del biochar a 30 cm de profundidad, con una simulación a 60 días con un delta de tiempo de 0.5 días. En la Figura 3-13, se presenta la simulación con todos los términos fuente en dos casos, en color azul se presenta el resultado de la simulación cuando se aplica biochar, en rojo se presenta el resultado de la simulación sin aplicación de biochar.

- **Figura 3-13.** Comparación entre modelo con biochar y sin biochar.





Nombre de la fuente: elaboración propia

Inicialmente se tiene potasio en este se evidencia un efecto positivo del biochar que se mantiene en el tiempo en un valor cercano a 13 mg/l, en la Figura 3-12 se evidencia que el consumo por parte de la planta causaría una disminución leve en los resultados, en ese orden de ideas se puede establecer que el modelo permite predecir o cuantificar la cantidad de potasio disponible para las plantas en la solución del suelo es adecuado y puede ser utilizado como una herramienta de predicción en suelos donde se de aplicación de biochar (Figura 3-13).

En el caso del nitrato se evidencia un efecto positivo con la aplicación del biochar, sin la aplicación de este se tiene un consumo inmediato del elemento que se mantiene en cero durante el resto de la simulación, mientras que el resultado en azul que representa el efecto de la aplicación del biochar muestra una tendencia a estabilizarse cerca de los 55 mg/l, en la Figura 3-12 se evidencia que el efecto de la raíz no es tan significativo y solo disminuiría un poco la cantidad de nitrógeno obtenido, por lo tanto los resultados obtenidos con el modelo para la disponibilidad de nitrato en el suelo se ajustan y pueden ser utilizados como una herramienta de predicción sobre la aplicación del biochar en suelos (Figura 3-13).



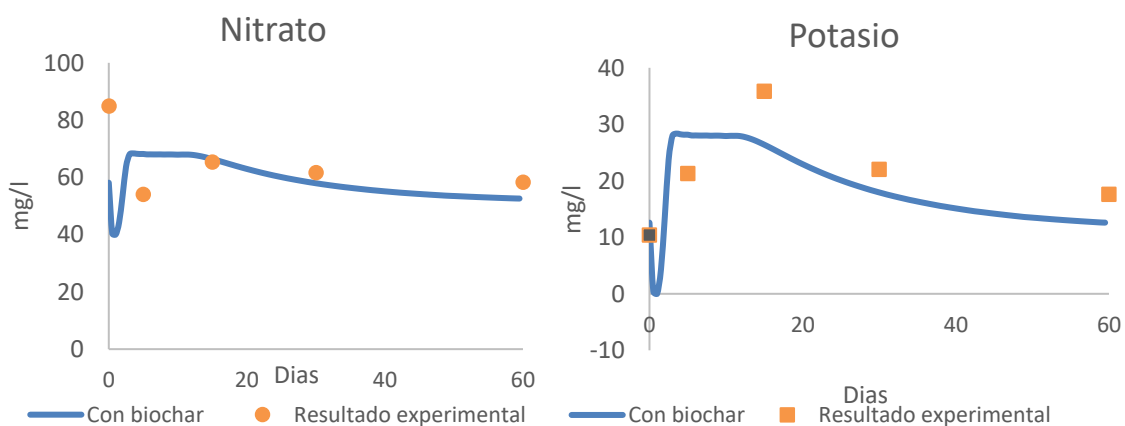
En cuanto al fósforo, en este no se evidencia una diferencia significativa entre los resultados obtenidos con aplicación de biochar y sin aplicación de biochar, solo un aumento en el tiempo para el consumo total del fósforo, en la Figura 3-13.

Por otro lado, el oxígeno no presenta ningún cambio con la aplicación del biochar, ya que no se agregó dentro del modelo matemático una variación en la cantidad de oxígeno en el suelo cuando se aplica biochar (Figura 3-13).

En el caso del Hidrógeno y el pH se presenta el que el pH en el suelo con biochar se mantiene por encima del pH en el suelo sin biochar, esta respuesta del modelo se da gracias a la disminución de  $H^+$ , como respuesta a la formación de complejos en el suelo, puesto que, considerando los resultados experimentales se agregó un término fuente para la disminución de hidrógeno. Sin embargo, este término puede ser evaluado con más detalle en investigaciones futuras, para tener una respuesta más ajustada (Figura 3-13).

Por otro lado, se presenta en la Figura 3-13 donde se realiza la comparación entre resultados simulados para la aplicación de biochar con resultados experimentales obtenidos para el suelo sin plantas.

- **Figura 3-14.** Comparación entre modelo con biochar y resultados experimentales



Fuente: elaboración propia

En la Figura 3-13 se realizó la comparación de datos experimentales obtenidos en columnas de suelo sin plantas y se evidencia que la retención de nitrógeno y potasio con aplicación de biochar es similar a los resultados experimentales obtenidos en un suelo que

no tiene raíces, es decir la aplicación de biochar logra retener estos nutrientes y mantenerlos en el tiempo como si no se tuviera una absorción de nutrientes por parte de las plantas.

Finalmente los resultados obtenidos con la aplicación de biochar en suelos presentan resultados significativos de la evaluación de la dinámica de nutrientes en el suelo en función del tiempo, es decir el código puede predecir la dinámica de estos elementos en función del tiempo para 60 días, e involucrar diferentes elementos al modelamiento, lo que permite tener un acercamiento a la dinámica de diferentes fenómenos del suelo, que no habían sido considerados en otros modelos presentados, en especial cuando se tiene aplicación del biochar, dando cuenta de los cambios en la disponibilidad de nutrientes y pH del suelo.

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

La evaluación del efecto de la aplicación de biochar a partir de la pirólisis lenta del cuesco de palma dosificado en 8 ton/ha presento un cambios en las características del suelo y permitió determinar ecuaciones empíricas para el flujo de nutrientes a partir del biochar y las pérdidas por lixiviación, las cuales se pudieron acoplar al modelo de transporte y equilibrio químico, para obtener como respuesta final un modelo que da respuesta de la dinámica en el suministro de nutrientes en suelos agrícolas en función del tiempo y la profundidad.

Se determinaron los cambios en suelos debido a la aplicación del biochar, en el pH se logró identificar un incremento para los tres tipos de suelo trabajos de hasta una unidad, este resultado se pudo reflejar tanto en los resultados experimentales como en el código. Otra de las características que cambio con la aplicación del biochar es la permeabilidad la cual tuvo una reducción significativa con el aumento en la dosis de biochar, este hallazgo es importante principalmente en suelos arenosos donde la pérdida de agua causa disminución significativa de la fertilidad, se determinó el incremento en nutrientes como potasio y nitrito en función del tiempo resultado reflejado tanto en los resultados experimentales como en el modelo matemático, además se determinó que la CIC se ve afectada con la aplicación del biochar y esta puede tener influencia en la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Se propuso un modelo predictivo de la dinámica de nutrientes en suelo teniendo en cuenta diferentes elementos involucrados en la dinámica del suelo, el cual es un avance significativo en el modelamiento en suelos destinados para actividades agrícolas, donde se consideró el transporte de nutrientes, las reacciones de equilibrio químico, el efecto de los microorganismos ubicados en la rizosfera, los cambios en la saturación del suelo, la aplicación de biochar, el efecto de la fase sólida, la lixiviación, el efecto de las raíces considerando además la apetencia que permite variar el tipo de cultivo, la fase líquida y la

fase gaseosa, lo que ofrece un panorama más completo de la dinámica de nutrientes en suelos, con o sin aplicación de biochar.

El modelo propuesto permite predecir la disponibilidad de nutrientes, específicamente para el potasio y el nitrato en función de la profundidad y el tiempo, considerando diferentes parámetros involucrados en la dinámica y disponibilidad de nutrientes; en este caso la incorporación del efecto de la lixiviación permitió ajustar mejor el comportamiento de los nutrientes en el suelo en comparación con modelos propuestos en la literatura.

## **4.2 Recomendaciones**

Se propone realizar procesos de funcionalización del biochar que puedan aportar elementos específicos al suelo, además, se puede proponer una ecuación fenomenológica para la aplicación de biochar en suelos que permita tener un modelo más robusto y aplicable a diferentes tipos de biochar.

## 5. Referencias

- Acevedo, D, M Alvarez, E Hernandez, and R Amendola. 2011. "CONCENTRACIÓN DE NITRÓGENO EN SUELO POR EFECTO DE MANEJO ORGÁNICO Y CONVENCIONAL Nitrogen Concentration in Soil as Affected by Organic and Conventional Management." *Terra Latinoamericana* 29: 29: 325–32.
- Agegnehu, Getachew, Adrian M. Bass, Paul N. Nelson, and Michael I. Bird. 2016. "Benefits of Biochar, Compost and Biochar-Compost for Soil Quality, Maize Yield and Greenhouse Gas Emissions in a Tropical Agricultural Soil." *Science of the Total Environment* 543: 295–306. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054>.
- Ahuja, L, and D Swartzendruber. 1972. "An Improved Form of Soil-Water Diffusivity Funcion." *Soil Science* 36: 9–14.
- Alam, Samrat, and Daniel S Alessi. 2019. Biochar from Biomass and Waste *Modeling the Surface Chemistry of Biochars*. Elsevier Inc. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00004-2>.
- Allen, Richards, Luis Pereira, Dirk Raes, and Martin Smith. 2006. *Evapotranspiración Del Cultivo*. Roma: ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN.
- Amésquita, Edgar et al. 2001. "Fertilidad de Suelos. Diagnóstico y Control." *Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelos*: 507.
- Anal, Ciencias, and Francisco J Alguacil. 2013. "Máster Universitario En Ciencia y Tecnología Química Módulo : Química Analítica BIOCMBUSTIBLES MEDIANTE PIRÓLISIS DE BIOMASA RESIDUAL " Andrea Urien Pinedo."
- ANDI. 2017. "Agroindustria Hacia La Transformación de La Cadena de Valor Agroindustrial." In *Estrategia Para Una Nueva Industrialización II*, Bogota, Colombia, 148–85.
- Azcón-Bieto, J, and M Talón. 2003. McGrawHill *Fundamentos de Fisiología Vegetal*.
- BEAR, FIRMAN E. 1964. "Quimica Del Suelo." *Soil Science* 98(3): 210.
- Bohn, Hinrich, Brian McNeal, and George O'connor. 1993. *QUIMICA DEL SUELO*. 1st ed. ed. LIMUSA SA. Mexico.
- Bouchelta, Chafia et al. 2012. "Effects of Pyrolysis Conditions on the Porous Structure Development of Date Pits Activated Carbon." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 94: 215–22.
- Bridgwater, A V, D Meier, and D Radlein. 1999. "An Overview of Fast Pyrolysis of Biomass An Overview of Fast Pyrolysis of Biomass." 6380(December 2017).
- Casanova, Eduardo. 1991. *Introducción a La Ciencia Del Suelo*.

- Castilla-Caballero, Deyler et al. 2020. "Experimental Data on the Production and Characterization of Biochars Derived from Coconut-Shell Wastes Obtained from the Colombian Pacific Coast at Low Temperature Pyrolysis." *Data in Brief* 28: 1–11.
- Constant, Philippe, Soumitra Paul Chowdhury, Jennifer Pratscher, and Ralf Conrad. 2010. "Streptomycetes Contributing to Atmospheric Molecular Hydrogen Soil Uptake Are Widespread and Encode a Putative High-Affinity [NiFe]-Hydrogenase." *Environmental Microbiology* 12(3): 821–29.
- Crusciol, Carlos Alexandre Costa, Rodrigo Arroyo Garcia, Gustavo Spadotti Amaral Castro, and Ciro Antonio Rosolem. 2011. "Papel Do Nitrato Na Lixiviação de Bases Em Semeadura Direta." *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 35(6): 1975–84.
- Custos, Jean Marc, Christian Moyne, and Thibault Sterckeman. 2020. "How Root Nutrient Uptake Affects Rhizosphere PH: A Modelling Study." *Geoderma* 369(March): 114314. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114314>.
- Dai, Zhongmin et al. 2017. "Potential Role of Biochars in Decreasing Soil Acidification - A Critical Review." *Science of the Total Environment* 581–582: 601–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.169>.
- Das, Subhajit et al. 2016. "Influence of Microbial Composition on the Carbon Storage Capacity of the Mangrove Soil at the Land-Ocean Boundary in the Sundarban Mangrove Ecosystem, India." *Geomicrobiology Journal* 33(9): 743–50.
- Deem, Lauren M., and Susan E. Crow. 2017. "Biochar." In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier.
- Deem, Lauren M et al. 2017. "Biochar." : 1–5.
- Duilio, Torres R., Florentino Adriana, and López Marisol. 2005. "Pérdidas de Suelo y Nitrógeno Por Escorrentía En Un ULTISOL Degradado Bajo Diferentes Condiciones de Cobertura Vegetal En Chaguaramas-Guárico."
- Dukowicz, K, Michael C Cline, and Frank L Addressio. 1989. "Godunov Method \*." 63: 29–63.
- Endelman, F et al. 1974. "The Mathematical Modelong of Soil-Water-Nitrogen Phenomena." *Oak Ridge National Laboratory*.
- EPEC. 2019. *Energía Renovable: La Biomasa*. Cordoba.
- Escalante, Ariadna et al. 2016. "Biocarbón (Biochar) I: Naturaleza, Historia, Fabricación y Uso En El Suelo Biocarbon (Biochar) I: Nature, History, Manufacture and Use in Soil." *Terra Latinoamericana* 34: 367–82. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00367.pdf>.
- Florez, Paulo Antonio. 2008. "EL METODO DE GODUNOV." *UNIVERSIDAD DEL BIO - BIO, CHILLAN-CHILE* 1: 1–81.
- Foster, Kylie J., and Stanley J. Miklavcic. 2013. "Mathematical Modelling of the Uptake and Transport of Salt in Plant Roots." *Journal of Theoretical Biology* 336: 132–43.

- Genuchten V M. 1980. "A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils." *Soil Science Society of America Journal* 44(5): 892–98.
- Gomez, Susana. 2019. "Subproductos Del Café : Valor Agregado Para El Negocio." *Quecafe*. <https://quecafe.info/usos-alternativos-subproductos-cafe/>.
- Graeme Sandral, Ehsan Tavakkoli, Maryam Barati y Russell Pumpa (Departamento de Industrias Primarias de Nueva Gales del Sur, Instituto Agrícola Wagga Wagga, Wagga Wagga, NSW) (Centro Graham para la Innovación Agrícola, Universidad Charles Sturt, Wagga Wag, Gatton QLD). 2019. "Estratificación de Fósforo y Fósforo." *GRDC*. <https://grdc.com.au/resources-and-publications/grdc-update-papers/tab-content/grdc-update-papers/2019/02/phosphorus-and-phosphorus-stratification>.
- Groppo, J. D. et al. 2015a. "Changes in Soil Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Due to Land-Use Changes in Brazil." *Biogeosciences* 12(15): 4765–80.
- . 2015b. "Changes in Soil Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Due to Land-Use Changes in Brazil." *Biogeosciences* 12(15): 4765–80.
- GUINOT, V. 2003. *Godunov-Type Schemes: An Introduction for Engineers*. ELSEVIER. ed. ELSEVIER SCIENCE.  
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=tQTpL4qdXUEC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Godunov+method+application+in+soil&ots=-9ti\\_1tOxM&sig=-3NNuV2Rt0ALTmkb03Ht0MvR3pE#v=onepage&q=Godunov method application in soil&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=tQTpL4qdXUEC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Godunov+method+application+in+soil&ots=-9ti_1tOxM&sig=-3NNuV2Rt0ALTmkb03Ht0MvR3pE#v=onepage&q=Godunov+method+application+in+soil&f=false).
- Guo, Zhongsheng. 2020. "Estimating Method of Maximum Infiltration Depth and Soil Water Supply." *Scientific Reports* 10(1): 1–8. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-66859-0>.
- Hailegnaw, Niguss Solomon et al. 2019. "Mutual Relationships of Biochar and Soil PH, CEC, and Exchangeable Base Cations in a Model Laboratory Experiment." *Journal of Soils and Sediments* 19(5): 2405–16.
- Hart, J et al. 2014. "Silage Corn: Western Oregon." (July).
- Haverkamp, R, J Vauclin, P Touma, and J Wierrega. 1977. "A Comparison of Numerical Simulation Models for One Dimensional Infiltration." *Soil Science* 41: 285–94.
- Hidalgo, Cesar Augusto, Johnny Alexander Vega, and Melissa Parra Obando. 2018. "Effect of the Rainfall Infiltration Processes on the Landslide Hazard Assessment of Unsaturated Soils in Tropical Mountainous Regions." *Engineering and Mathematical Topics in Rainfall*.
- Iñon, Nora. 2017. "CICLO DEL NITROGENO." In Argentina: Universidad Nacional de San Martín.
- Jaramillo, Daniel. 2000. "Introducción a La Ciencia Del Suelo." *UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA*.

- Juncosa, Ricardo. 2018. "ESCORRENTÍA." In *HIDROLOGÍA I: CICLO HIDROLÓGICO*, Coruña: UNIVERSIDAD DE LA CORUÑA, 65–84.
- Lang, F. et al. 2017. "Soil Phosphorus Supply Controls P Nutrition Strategies of Beech Forest Ecosystems in Central Europe." *Biogeochemistry* 136(1): 5–29.
- Leng, Lijian et al. 2019. "Biochar Stability Assessment by Incubation and Modelling: Methods, Drawbacks and Recommendations." *Science of the Total Environment* 664: 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.298>.
- Lindsay, W. L. 2015. "Solid Phase-Solution Equilibria in Soils." : 183–202.
- Manya, Joan J. 2012. "Pyrolysis for Biochar Purposes : A Review to Establish Current Knowledge Gaps and Research Needs."
- Mualen, Y. 1976. "A New Model for Predicting He Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media." *wATER RESOUR* 12: 513–22.
- Norberto E. HEIN. 1986. "REACCION DEL SUELO Autor (\*)." [http://rafaela.inta.gov.ar/info/miscelaneas/inta\\_rafaela\\_miscelanea\\_041.pdf](http://rafaela.inta.gov.ar/info/miscelaneas/inta_rafaela_miscelanea_041.pdf).
- Novak, J.M., and Mark G. Johnson. 2019. "Elemental and Spectroscopic Characterization of Low-Temperature (350°C) Lignocellulosic- and Manure-Based Designer Biochars and Their Use as Soil Amendments." In *Biochar from Biomass and Waste*, Elsevier, 37–58.
- Obado, Franco Humberto. 2003. *EL Transporte de Oxígeno En El Suelo, Relaciones Agrofísicas Básicas*. ed. ASEUC asociación de editoriales universitarias de Colombia. Manizales: Biblioteca universidad de Caldas.
- Ochsner, Tyson. 2019. "Movimiento Del Agua En Los Suelos." *department of plant and soil sciences Universidad estatal de Oklahoma*. <http://www.soilphysics.okstate.edu/software/water/infil.html>.
- Oliveira, Patrícia Perondi Anchião et al. 2003. "Liming and Fertilization to Restore Degraded Brachiaria Decumbens Pastures Grown on an Entisol." *Scientia Agricola* 60(1): 125–31.
- Osorio, Nelson Walter. 2014a. *Manejo de Nutrientes En Suelos Del Trópico*. 1st ed. ed. L. Vieco S.A.S. Medellín Colombia.
- . 2014b. 41 Manejo de nutrientes en suelos del trópico *Microorganismos Del Suelo y Su Efecto Sobre La Disponibilidad de Nutrientes*. Medellín Colombia.
- . 2018. "Capítulo 14 Silicio." In *Manejo de Nutrientes En Suelos Del Trópico*, ed. Vieco S.A.S. Medellín Colombia.
- Parkhurst, David L., and C.a.J. Appelo. 2013. "Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3 — A Computer Program for Speciation , Batch-Reaction , One-Dimensional Transport , and Inverse Geochemical Calculations. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chapter A43, 497 P." *U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chapter A43: 6-43A*.



- Pumayalla, A. 2018. "UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA Presentada Por." : 1–68.
- Rauhermi. 2018. "Evolución de La Infiltración En Un Suelo a Lo Largo de Una TormentaNo Title." *es el agua*. <http://eselagua.com/2018/11/30/evolucion-de-la-infiltracion-en-un-suelo-a-lo-largo-de-una-tormenta/>.
- Rebolledo, Ariana Escalante, Guadalupe Pérez López, and Claudia Hidalgo Moreno. 2016. "Biocarbón ( Biochar ) I : Naturaleza , Historia , Fabricación y Uso En El Suelo." *Terra Latinoamericana* 34: 367–82.
- Refsgaard, J C, T H Christensen, and H C Ammentorp. 1991. "A Model for Oxygen Transport and Consumption in the Unsaturated Zone." 129: 349–69.
- Roose, T., and A. C. Fowler. 2004. "A Mathematical Model for Water and Nutrient Uptake by Plant Root Systems." *Journal of Theoretical Biology* 228(2): 173–84.
- Roose, T., A. C. Fowler, and P. R. Darrah. 2001. "A Mathematical Model of Plant Nutrient Uptake." *Journal of Mathematical Biology* 42(4): 347–60.
- Rosolem, Ciro Antonio, and Alexandre Merlin. 2014. "Disponibilidade de Fósforo No Solo e Resposta Da Soja Ao Fertilizante Aplicado No Sulco de Semeadura." *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 38(5): 1487–95.
- RUBIO, ADRIANA. 2011. "CARACTERIZACIÓN DE ÁCIDOS ORGÁNICOS DE BAJO PESO MOLECULAR PRESENTES EN EXUDADOS RADICULARES DE Zea Mays: APLICACIONES PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS." *Facultad de Ciencias Químicas, U.A.N.L.*: 1–169.
- Rucks, L et al. 2004. "Propiedades Físicas Del Suelo." *Transactions of the Faraday Society* 64: 3358–60.
- Sánchez-Reinoso, A.D., E.Á. Ávila-Pedraza, and H. Restrepo-Díaz. 2020. "Use of Biochar in Agriculture | Uso de Biocarbón En La Agricultura." *Acta Biologica Colombiana* 25(2): 327–38.
- Sanchez, Javier. 2018. "Ley de Darcy. Conductividad Hidráulica." *Universidad de Salamanca*: 1–14.
- Sánchez, Javier. 2007. "Fertilidad Del Suelo y Nutrición Mineral En Plantas -Conceptos Básicos." *Fertitec S.A.* : 19.  
<http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FERTILIDAD DEL SUELO Y NUTRICION.pdf>.
- Sepúlveda-robles, Jesús. 2015. "Revisión de Modelos Matemáticos Para Captura de Agua y Nutrientes Por La Raíz de Las Plantas." : 47–59.
- Sohi, Saran, Elisa Lopez-capel, Evelyn Krull, and Roland Bol. 2009. "Biochar , Climate Change and Soil : A Review to Guide Future Research." (February).
- Sun, Hao, Catherine E. Brewer, Caroline A. Masiello, and Kyriacos Zygourakis. 2015.

“Nutrient Transport in Soils Amended with Biochar: A Transient Model with Two Stationary Phases and Intraparticle Diffusion.” *Industrial and Engineering Chemistry Research* 54(16): 4123–35.

Trevors, J T. 1985. “Hydrogen Consumption in Soil Introduction The Hydrogen-Oxidizing Bacteria Are Taxonomically a Diverse Group Of.” 2: 417–22.

Valencia, Juan Fernando, and Carolina Avella. 2019. “Más Energía de La Palma de Aceite Para El Sector Eléctrico.” *el palmicultor*. 17.

Venant, Saint, and D Entre. “Capítulo 4 . Esquemas Numéricos Para Las Ecuaciones de Saint Venant Unidimensionales.” : 123–54.

Weber, Juan Francisco. 2014. “Parámetros Del Modelo de Infiltración de Horton Obtenidos Mediante El Uso de Un Simulador de Lluvia, Córdoba, Argentina.” *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* 9(1).

Yaman, Serdar. 2004. “Pyrolysis of Biomass to Produce Fuels and Chemical Feedstocks.” *Energy Conversion and Management* 45(5): 651–71.

Yang, Xueming et al. 2014. “Organic Carbon and Nitrogen Stocks in a Clay Loam Soil 10 Years after a Single Compost Application.” *Canadian Journal of Soil Science* 94(3): 357–63.

Zhu, J. et al. 2002. “Barn Age Impact on Nutrient Leaching for Turkey Barns Built on Clay Loam Soils.” *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 45(6): 1971–76.

## Anexo 1 Modelo en python

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Thu Nov 18 08:42:15 2021

@author: nevis
"""

#IMPORTAR LIBRERIAS PARA SOLUCIÓN DEL MODELO
import os
import numpy as np
from math import *
from numpy import *
from scipy.optimize import minimize
from scipy.optimize import fsolve
from scipy.optimize import root
from scipy.optimize import newton
from numpy.linalg import solve
from scipy import interpolate
from matplotlib import cm
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits import mplot3d

#IMPORTAR FUNCIÓN DE PHREEQC QUIMICA DEL SUELO
from PHRTOTALV2 import funciontotal
#PRENDER BIOCHAR sw1=1 APAGAR=0
sw1=0
#PRENDER fase solida sw2=1 APAGAR=0
sw2=1
#PRENDER lixiviación sw3=1 APAGAR=0
sw3=1
#PRENDER Fc plantas sw4=1 APAGAR=0
sw4=1
#PRENDER FG oxigeno sw6=1 APAGAR=0
sw6=1
#Aplicación de fertilizante en la raiz APAGAR=0
sw5=0

#DEFINIR CONSTANTES DEL MODELO

D0=1e3      #cm^2/dia Difusividad del agua en el suelo
```

K0=51 #cm Longitud maxima de la raiz (0)  
 r0=2 #cm/dia Tasa maxima de alargamiento raiz (0)  
 r1=6.4 #cm/dia Tasa maxima de alargamiento raiz (1)  
 l00=15.5 #cm Longitud inicial de la raiz (0)  
 K1=8 #cm Longitud maxima de la raiz (1)  
 Ks=5 #cm/dia Conductividad hidráulica del suelo saturado  
 fi=0.4 # Porosidad  
 m=0.5 # Parametro para flujo de agua no saturada  
 W=0.05 # Tasa cosntante de lluvia  
 Wdim=((W\*D0)/K0) #cm/dia Flujo de volumen de agua por unidad de superficie del suelo  
 rho=0.1 # Tasa constante de fertilización  
 Pc=0.232e5 #Pa Parametro experimental para cada tipo de suelo  
 a0=5e-2 #cm Radio de la raiz (0)  
 a=a0 #cm Radio de la raiz  
 a1=a0 #cm Radio de la raiz (1) asumida  
 L1=8 #cm Longitud de la raiz (1)  
 beta=np.arccos(0.5) # Angulo entre la raiz (1)  
 kr=7.85e-10\*1e4\*86400\*1e-6/(2\*np.pi\*a) #cm^4\*dia^-1\*Pa^-1  
 kz0=1.875e-10\*1e8\*86400\*1e-6 #cm^4\*dia^-1\*Pa^-1  
 kz1=4.6e-14\*1e8\*86400\*1e-6 #cm^4\*dia^-1\*Pa^-1  
 Pz0=-1e6 #Pa presión en la superficie  
 Fm=(3.26e-12\*3600)\*24 #mol/cm2 dia  
 L=60 #cm  
 L0=L #cm  
 lb=l00 #cm Asumido  
 ln=0.7 #  
 la=15 #cm  
 zmax=100#cm Profundidad total de la simulación  
 ns=7 # Numero de especies quimicas transportadas  
 n=200 # Nodos  
 tfinal=15 #dia Tiempo de simulación  
 dx=zmax/(n-1) #cm  
 dt=0.5 #dia  
 ntsteps=int(tfinal/dt) #Numero de pasos

#### #VALORES PARA CADA NUTRIENTE

nespecies=8

especies=['P','N','K','O','Ca','Mg','NH4','SO4','H']

#### #IMPEDANCIA DEL NUTRIENTE

d=2 # Impedancia del nutriente (Fosfato)

As=1000 #cm2 area del solido en el suelo

AG=As\*0.1 #cm2 area gaseosa en el suelo

## #CAPACIDAD BUFFER

```
dict_b={}
```

```
dict_b['P']=0
```

```
dict_b['N']=0.4
```

```
dict_b['K']=23.1
```

```
dict_b['O']=0
```

```
dict_b['Ca']=30.3
```

```
dict_b['Mg']=22.4
```

```
dict_b['NH4']=0
```

```
dict_b['SO4']=6
```

```
dict_b['H']=20
```

## #CONSTANTES CINETICAS DE MICHAELIS MENTEL

```
dict_lmax={}
```

```
dict_lmax['P']=(3.26e-8/10000)*86400 #mol/cm2dia
```

```
dict_lmax['N']=(3.75e-8/10000)*86400 #mol/cm2dia
```

```
dict_lmax['K']=(5.02e-8/10000)*86400 #mol/cm2dia
```

```
dict_lmax['O']=(1e-8/10000)*86400 #mol/cm2dia
```

```
dict_lmax['Ca']=(1.042e-9/10000)*86400 #mol/cm2dia
```

```
dict_lmax['Mg']=(6.5e-9/10000)*86400 #mol/cm2dia
```

```
dict_lmax['NH4']=(5.40e-2/10000)*86400 #mol/cm2dia
```

```
dict_lmax['SO4']=(1.10e-9/10000)*86400 #mol/cm2dia
```

```
dict_lmax['H']=(1.88e-11/10000)*86400 #mol/cm2dia
```

```
dict_KM={}
```

```
dict_KM['P']=5.83e-3*1e-6 #mol/cm3
```

```
dict_KM['N']=1.16e-2*1e-6 #mol/cm3
```

```
dict_KM['K']=3.2e-2*1e-6 #mol/cm3
```

```
dict_KM['O']=1.6e-5*1e-6 #mol/cm3
```

```
dict_KM['Ca']=3.9e-2*1e-6 #mol/cm3
```

```
dict_KM['Mg']=0.44*1e-6 #mol/cm3
```

```
dict_KM['NH4']=1e-7*1e-6 #mol/cm3
```

```
dict_KM['SO4']=7e-2*1e-6 #mol/cm3
```

```
dict_KM['H']=1e-4*1e-6 #mol/cm3
```

## #APETENCIA DE LA PLANTA PARA CADA NUTRIENTE

```
dict_Fi={}
```

```
dict_Fi['P']=1.27e-6*1e-2 #mol/cm
```

```
dict_Fi['N']=3.95e-4*1e-2 #mol/cm
dict_Fi['K']=6.10e-5*1e-2 #mol/cm
dict_Fi['O']=1.00e-6*1e-2 #mol/cm
dict_Fi['Ca']=1.54e-6*1e-2 #mol/cm
dict_Fi['Mg']=5.07e-6*1e-2 #mol/cm
dict_Fi['NH4']=2.54e-5*1e-2 #mol/cm
dict_Fi['SO4']=1.18e-6*1e-2 #mol/cm
dict_Fi['H']=1e-6*1e-2 #mol/cm
```

```
#DIFUSIVIDAD DE CADA NUTRIENTE
```

```
dict_Df={}
```

```
dict_Df['P']=(7.9e-10*10000)*86400 #cm2/dia
dict_Df['N']=(1.90e-9*10000)*86400 #cm2/dia
dict_Df['K']=(1.96e-9*10000)*86400 #cm2/dia
dict_Df['O']=(2.6e-5)*86400 #cm2/dia
dict_Df['Ca']=(7.93e-10*10000)*86400 #cm2/dia
dict_Df['Mg']=(7.05e-10*10000)*86400 #cm2/dia
dict_Df['NH4']=(1.98e-9*10000)*86400 #cm2/dia
dict_Df['SO4']=(1.07e-9*10000)*86400 #cm2/dia
dict_Df['H']=(4.8e-9*10000)*86400 #cm2/dia
```

```
#Tasa de fertilización constante
```

```
dict_rhodim={}
```

```
dict_rhodim['P']=sw5*(((D0)*(5.83e-3*1e-6)*rho)/(K0)) #mol/dia cm3
dict_rhodim['N']=sw5*(((D0)*(1.16e-2*1e-6)*rho)/(K0)) #mol/dia cm3
dict_rhodim['K']=sw5*(((D0)*(3.2e-2*1e-6)*rho)/(K0)) #mol/dia cm3
dict_rhodim['O']=sw5*(((D0)*(1.6e-3*1e-6)*rho)/(K0)) #mol/dia cm3
dict_rhodim['Ca']=sw5*(((D0)*(3.9e-2*1e-6)*rho)/(K0)) #mol/dia cm3
dict_rhodim['Mg']=sw5*(((D0)*(0.44*1e-6)*rho)/(K0)) #mol/dia cm3
dict_rhodim['NH4']=sw5*(((D0)*(1e-7*1e-6)*rho)/(K0)) #mol/dia cm3
dict_rhodim['SO4']=sw5*(((D0)*(7e-2*1e-6)*rho)/(K0)) #mol/dia cm3
dict_rhodim['H']=sw5*(((D0)*(1e-4*1e-6)*rho)/(K0)) #mol/dia cm3
```

```
#PARAMETROS PARA CORRER EL CODIGO
```

```
zcoo=np.linspace(0,zmax,n)
times=np.linspace(0,tfinal,ntsteps)
nodes=list(range(n))
set1=[0]
set2=list(range(1,n-1))
set3=[n-1]
```

```
#DEFINICION DE FUNCIONES SEGUNDARIAS Y DERIVADAS
```

```
S=np.zeros(n)
```

---

```

def P(S):
    if S>0 and S<1:
        y=-Pc*(S**(-1/m)-1)**(1-m)
    if S<=0:
        Saux=1e-4
        yp=(1-m)*(-1/m)*Saux**(-1/m-1)*(Saux**(-1/m)-1)
        y=(S-Saux)*yp+P(Saux)
    if S>=1:
        y=0
    return y

def psi1(z):
    if z>=lb and z<=L0-la:
        y=1/ln
    else:
        y=0
    return y

def D(S):
    if S>0 and S<1:
        y=S**(1/2-1/m)*((1-S**(1/m))**(-m)+(1-S**(1/m))**m-2)
    if S>=1:
        d=0.999999
        y=dD(d)*(S-d)+D(d)
    if S<=0:
        y=0
    return y

def dD(S):
    if S>0 and S<1:
        y=S**(1/2-1/m)*(S**(-1+1/m)*(1-S**(1/m))**(-1-m)-S**(-1+1/m)*(1-S**(1/m))**(-
1+m))+\
        (1/2-1/m)*S**(-1/2-1/m)*(-2+(1-S**(1/m))**(-m)+(1-S**(1/m))**m)
    if S<=0:
        y=0
    if S>=1:
        xe=0.999999
        d=1e-6
        yp=(dD(xe)-dD(xe-d))/d
        y=dD(xe)+yp*(S-xe)
    return y

```

```
def k(S):
    if S>0 and S<=1:
        y=S**(1/2)*(1-(1-S**(1/m))**m)**2
    if S<=0:
        y=0
    if S>1: y=1
    return y

def dk(S):
    if S>0 and S<1:
        y=2*S**(-1/2+1/m)*(1-S**(1/m))**(-1+m)*(1-(1-S**(1/m))**m)+\
        (1-(1-S**(1/m))**m)**2/(2*S**(1/2))
    if S<=0:
        y=0
    if S>=1:
        xe=0.999999
        d=1e-6
        yp=(dk(xe)-dk(xe-d))/d
        y=dk(xe)+yp*(S-xe)

    return y
```

#PARAMETROS INICIALES

```
S=np.zeros(n)
S0=np.zeros(n) #CONDICION INICIAL PARA SATURACIÓN
X0=np.zeros(n) #OPTIMIZAR LA SATURACIÓN
bnds=np.zeros((n,2))
Smat=np.zeros((n,ntsteps+1))
u=np.zeros(n)
Pr=np.zeros(n)
dict_cmat={}
c_graf={}
dict_c={}
for esp in especies:
    dict_cmat[esp]=np.ones((n,ntsteps+1))
```

#

=====

=====

# SOLUCION PARA SATURACIÓN DEL SUELO



```

#
=====
=====
#ECUACIÓN PARA RAIZ EN CASO DE SATURACIÓN DEL SUELO
def Fw(S):
    n0=100
    APr=np.zeros((n0,n0))
    BPr=np.zeros(n0)
    dx0=L0/(n0-1)
    z0=np.linspace(0,L0,n0)
    set10=[0]
    set20=list(range(1,n0-1))
    set30=[n0-1]
    F=np.zeros(n0)
    interpS=interpolate.interp1d(zcoo,S)
    S0=interpS(z0)
    for i in range(n0):
        if i in set20:
            APr[i,i+1]=-kz0*(1/dx0**2)
            APr[i,i]=-kz0*(-2/dx0**2)+\
            (2*np.pi*a*kr+(2*np.pi*a*kr*kz1)**(1/2)*psi1(z0[i]))
            APr[i,i-1]=-kz0*(1/dx0**2)
            BPr[i]=(2*np.pi*a*kr+(2*np.pi*a*kr*kz1)**(1/2)*psi1(z0[i]))*P(S0[i])
        if i in set10:
            APr[i,i]=1
            BPr[i]=Pz0
        if i in set30:
            APr[i,i]=1/dx0
            APr[i,i-1]=-1/dx0
            BPr[i]=0
    Pr=solve(APr,BPr)
    for i in range(n0):
        if S0[i]>0.01:
            F[i]=(2*np.pi*a*kr+(2*np.pi*a*kr*kz1)**(1/2)*psi1(z0[i]))\
            (np.pi*(a0+K1*np.cos(beta))**2)*(P(S0[i])-Pr[i])
        else:
            F[i]=0
    return z0,F

#ECUACIÓN PARA CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES POR RAIZ ORDEN CERO
def Fc0(S,c,z,t):
    if z<=L0:

```

```
if esp=='K':
    area0=2*np.pi*a0
    F0=area0*S*((Imax*(c-Fi))/((KM)+(c-Fi)))
    if F0<0:
        F0=area0*S*Fi
    return F0
if esp=='P':
    area0=2*np.pi*a0
    F0=area0*S*((Imax*(c-Fi))/((KM)+(c-Fi)))
    if F0<0:
        F0=area0*S*Fi
    return F0
if esp=='N':
    area0=2*np.pi*a0
    F0=area0*S*((Imax*(c-Fi))/((KM)+(c-Fi)))
    if F0<0:
        F0=area0*S*Fi
    return F0
if esp=='O':
    F0=0.1*((6e-5*c*2.5e-5*8e-13)/((KM+c)*(1e-7+2.5e-5)))*S
if esp=='Ca':
    area0=2*np.pi*a0
    F0=area0*S*((Imax*(c-Fi))/((KM)+(c-Fi)))
    if F0<0:
        F0=area0*S*Fi
    return F0
if esp=='Mg':
    area0=2*np.pi*a0
    F0=area0*S*((Imax*(c-Fi))/((KM)+(c-Fi)))
    if F0<0:
        F0=area0*S*Fi
    return F0
if esp=='NH4':
    area0=2*np.pi*a0
    F0=area0*S*((Imax*(c-Fi))/((KM)+(c-Fi)))
    if F0<0:
        F0=area0*S*Fi
    return F0
if esp=='SO4':
    area0=2*np.pi*a0
    F0=area0*S*((Imax*(c-Fi))/((KM)+(c-Fi)))
    if F0<0:
        F0=area0*S*Fi
    return F0
```

```

if esp=='H':
    area0=2*np.pi*a0
    F0MP1=area0*S*(((1.88e-11/10000)*86400)*(c))/((1e-4*1e-6)+(c))
    F0MP2=area0*S*(((1.83e-11/10000)*86400)*(c))/((1.35e-4*1e-6)+(c))
    F0HP3=area0*S*(((3.34e-11/10000)*86400)*(c))/((4.3e-5*1e-6)+(c))
    F0HP9=area0*S*(((3.01e-12/10000)*86400)*(c))/((3.74e-4*1e-6)+(c))
    F0HP12=area0*S*(((1.53e-11/10000)*86400)*(c))/((3.61e-4*1e-6)+(c))
    F0HP13=area0*S*(((2.84e-12/10000)*86400)*(c))/((1.12e-4*1e-6)+(c))
    F0PCB7=area0*S*(((1.05e-11/10000)*86400)*(c))/((4.7e-5*1e-6)+(c))
    F046492T=area0*S*(((3.57e-11/10000)*86400)*(c))/((3.9e-5*1e-6)+(c))

F0=(F0MP1+F0MP2+F0HP3+F0HP9+F0HP12+F0HP13+F0PCB7+F046492T)*area0
return F0
else:
    F0=0

return F0

#ECUACIÓN PARA CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES POR RAIZ ORDEN UNO
def fc1(S,c,z,t):
    if z>lb and z<=L0:
        if esp=='N':
            area1=2*np.pi*a1
            f1=area1*S*((lmax*(c-Fi))/((KM)+(c-Fi)))
            if f1<0:
                f1=area1*S*Fi
            return f1
        if esp=='P':
            area1=2*np.pi*a1
            f1=area1*S*((lmax*(c-Fi))/((KM)+(c-Fi)))
            if f1<0:
                f1=area1*S*Fi
            return f1
        if esp=='K':
            area1=2*np.pi*a1
            f1=area1*S*((lmax*(c-Fi))/((KM)+(c-Fi)))
            if f1<0:
                f1=area1*S*Fi
            return f1
        if esp=='O':
            f1=(S*((6e-5*c*2.5e-5*8e-13)/((KM+c)*(1e-7+2.5e-5))))*0.1
        if esp=='Mg':

```

```

area1=2*np.pi*a1
f1=area1*S*((Imax*(c-Fi))/((KM)+(c-Fi)))
if f1<0:
    f1=area1*S*Fi
return f1
if esp=='Ca':
    area1=2*np.pi*a1
    f1=area1*S*((Imax*(c-Fi))/((KM)+(c-Fi)))
    if f1<0:
        f1=area1*S*Fi
    return f1
if esp=='NH4':
    area1=2*np.pi*a1
    f1=area1*S*((Imax*(c-Fi))/((KM)+(c-Fi)))
    if f1<0:
        f1=area1*S*Fi
    return f1
if esp=='SO4':
    area1=2*np.pi*a1
    f1=area1*S*((Imax*(c-Fi))/((KM)+(c-Fi)))
    if f1<0:
        f1=area1*S*Fi
    return f1
if esp=='H':
    area1=2*np.pi*a1
    FOMP1=area1*S*(((1.88e-11/10000)*86400)*(c))/((1e-4*1e-6)+(c))
    FOMP2=area1*S*(((1.83e-11/10000)*86400)*(c))/((1.35e-4*1e-6)+(c))
    F0HP3=area1*S*(((3.34e-11/10000)*86400)*(c))/((4.3e-5*1e-6)+(c))
    F0HP9=area1*S*(((3.01e-12/10000)*86400)*(c))/((3.74e-4*1e-6)+(c))
    F0HP12=area1*S*(((1.53e-11/10000)*86400)*(c))/((3.61e-4*1e-6)+(c))
    F0HP13=area1*S*(((2.84e-12/10000)*86400)*(c))/((1.12e-4*1e-6)+(c))
    F0PCB7=area1*S*(((1.05e-11/10000)*86400)*(c))/((4.7e-5*1e-6)+(c))
    F046492T=area1*S*(((3.57e-11/10000)*86400)*(c))/((3.9e-5*1e-6)+(c))

f1=(FOMP1+FOMP2+F0HP3+F0HP9+F0HP12+F0HP13+F0PCB7+F046492T)*area1
return f1
else:
    f1=0
return f1

#ECUACIÓN APORTE FASE SOLIDA
def fS1(S,c,z,t):
    if esp=='N':
        f2=Df*fi*d*(c/S)*t*(1/As)*0.01

```

```

elif esp=='P':
    f2=Df*fi*d*(c/S)*t*(1/As)*0.01
elif esp=='K':
    f2=Df*fi*d*(c/S)*t*(1/As)*0.01
elif esp=='Ca':
    f2=-Df*fi*d*(c/S)*t*(1/As)
elif esp=='Mg':
    f2=-Df*fi*d*(c/S)*t*(1/As)
elif esp=='NH4':
    f2=-Df*fi*d*(c/S)*t*(1/As)
elif esp=='SO4':
    f2=-Df*fi*d*(c/S)*t*(1/As)
elif esp=='H':
    f2=Df*fi*d*(c/S)*t*(1/As)*0.1841
else:
    f2=0
return f2
#ECUACIÓN PARA CONDICIÓN DE FRONTERA INFERIOR
def out(S,z,t):
    f3=((50+(0.8*(1+(239*((1-S)*fi))/(1))-50)*np.exp(0.8*t))/10
    return f3

#ECUACIÓN PARA EL APOORTE DEL BIOCHAR
def Fbio(S,z,t,c):
    if z<=L0:
        if esp=='N':
            f4=(417.69*(math.exp(-0.341*t)))*((1e-6/62)) #(-4e-9*t**3 + 4e-7*t**2 - 8e-6*t +5e-5)*0.1 #3e-05*np.power(t,-0.531)*0.1
            if c>=2e-6:
                f4=0#-3e-05*np.power(t,-0.531)*0.1#(-4e-9*t**3 + 4e-7*t**2 - 8e-6*t -5e-5)*0.1
            return f4
        elif esp=='P':
            f4=(0.1394*(math.exp(-0.141*t)))*((1e-6/31)) #1e-06*np.power(t,-1.808)*0.1
        elif esp=='K':
            f4=(31.173*(math.exp(-0.12*t)))*((1e-6/39))#(17.18*(math.exp(-0.027*t)))*((1e-6/39))#(3e-6*(math.exp(-0.025*t)))*(-3e-10*t**3 + 3e-8*t**2 - 8e-7*t +6e-6)*0.1 #5e-06*np.power(t,-0.511)
            if c>=7e-7:
                f4=0 #-5e-06*np.power(t,-0.511)*0.1#(-3e-10*t**3 + 3e-8*t**2 - 8e-7*t - 6e-6)*0.1
            return f4
        elif esp=='H':
            f4=-Df*fi*d*(c/S)*t*(1/As)*0.35

```

```
if c>=1.27835e-06:
    f4=0
    return f4
else:
    f4=0
    return f4
else:
    f4=0
    return f4
```

#### #ECUACIÓN PARA LIXIVIACIÓN

```
def Flix(S,c,t,z):
```

```
    if z>L1:
        if esp=='N':
            f5=4e-06*np.power(t,-1.29)
        elif esp=='P'and t<=50:
            f5=(-2e-12*t**2 + 9e-12*t + 6e-09 ) #(-2e-12*(t**2) + 9e-12*t +6e-09)*0.1
        elif esp=='K':
            f5=6e-07*np.power(t,-0.475)
        # elif esp=='Ca':
        # f5= -6e-07*t*np.exp(-0.475)
        # elif esp=='Mg':
        # f5= -6e-07*t*np.exp(-0.475)
        # elif esp=='SO4':
        # f5= -6e-07*t*np.exp(-0.475)
        else:
            f5=0
        return f5
    else:
        f5=0
    return f5
```

#### #ECUACIÓN OXIGENO

```
def fG1(S,c,z,t):
```

```
    if esp=='O' and z>lb:
        f6=1e-5*fi*d*(c/S)*t*(1000000/AG)*0.1
    elif esp=='O' and z<lb:
        f6=2.6e-5*fi*d*(c/S)*t*(1000000/AG)*0.1
    else:
        f6=0
    return f6
```

#### #ECUACIÓN NO LINEAR DE RICHARDS

```
def Frichards(S):
```

```

f=np.zeros(n)
Fw_table=Fw(S)
Fw_node=np.zeros(n)
Fw_spline=interpolate.interp1d(Fw_table[0],Fw_table[1])
for i in range(n):
    if zcoo[i]<=L0:
        Fw_node[i]=Fw_spline(zcoo[i])
    else:
        Fw_node[i]=0
for i in range(n):
    if i in set2:
        dS=(S[i+1]-S[i-1])/(2*dx)
        mu=D0*dD(S[i])*dS-Ks*dk(S[i])
        if -mu>=0: #simple upwind
            dS=(S[i]-S[i-1])/dx

        else:
            dS=(S[i+1]-S[i])/dx
            f[i]=fi/dt*(S[i]-S0[i])-D0*D(S[i])*(S[i+1]-2*S[i]+S[i-1])/dx**2-\
            mu*dS+Fw_node[i]
    if i in set1:
        f[i]=-D0*D(S[i])/dx*(S[i+1]-S[i])+Ks*k(S[i])-Wdim #cm/h
    if i in set3:
        f[i]=-D0*D(S[i])/dx*(S[i]-S[i-1])+Ks*k(S[i])-out(S[i],zcoo[i],t) #cm/h CONDICIONES
DE FRONTERA PARTE PROFUNDA DEL SUELO
return f

#ECUACIÓN CONCENTRACIONES
def Fconcent(c,*args):
    f=np.zeros(n)
    Fw_node=np.zeros(n)
    Fw_spline=interpolate.interp1d(Fw_table[0],Fw_table[1])
    for i in range(n):
        if zcoo[i]<=L0:
            Fw_node[i]=Fw_spline(zcoo[i])
        else:
            Fw_node[i]=0
    for i in range(n):
        if i in set2:
            #llamado ecuación raiz
            Fctot=(Fc0(S[i],c[i],zcoo[i],t)+\
            psi1(zcoo[i])*fc1(S[i],c[i],zcoo[i],t))/(np.pi*(a0+K1*np.cos(beta))**2)

```

```

#llamado ecuacion fase solida
FS=fS1(S[i],c[i],zcoo[i],t)
#llamado ecuación biochar
FB=Fbio(S[i],zcoo[i],t,c[i])
#llamado termino lixiviación
FL=Flix(S[i],c[i],t,zcoo[i])
#llamado oxigeno
FO=fG1(S[i],c[i],zcoo[i],t)

dS=(S[i+1]-S[i-1])/(2*dx)
mu=D0*D(S[i])*dS+Df*fi**(d+1)*(d+1)*S[i]**d*dS-Ks*k(S[i])
if -mu>=0: #upwind
    dc=(c[i]-c0[i])/dx
else:
    dc=(c[i]-c0[i])/dx
f[i]=(fi*S[i])*(c[i]-c0[i])/dt-\
Df*fi**(d+1)*S[i]**(d+1)*(c[i+1]-2*c[i]+c[i-1])/dx**2-mu*dc\
-c[i]*Fw_node[i]+(Fctot*sw4)-(FS*sw2)-(FB*sw1)+(FL*sw3)+(FO*sw6)
if i in set1:
    f[i]=-Df*fi**(1+d)*S[i]**(1+d)*(c[i]-c0[i])/dx+\
Wdim*c[i]-rhodim
if i in set3:
    f[i]=(c[i]-c[i-1])/dx
return f
#SOLUCIÓN PARA ECUACIÓN DE RICHARDS
S0[:]=0.90
X0[:]=0.5 #Importante para la convergencia
Smat[:,0]=S0

for esp in especies:
    rhodim=dict_rhodim[esp]
    Df=dict_Df[esp]
    Fi=dict_Fi[esp]
    lmax=dict_lmax[esp]
    KM=dict_KM[esp]
    b=dict_b[esp]

dict_c0={}
dict_c={}

dict_c0['P']=(0.00089419)*1e-5*np.ones(n) #mol/cm3 0.66
dict_c0['N']=(0.002963475)*1e-5*np.ones(n) #mol/cm3 0.66
dict_c0['K']=(0.0334)*1e-5*np.ones(n) #mol/cm3 0.1

```



```

dict_c0['O']=(0.482)*1e-5*np.ones(n)    #mol/cm3 0.1
dict_c0['Ca']=(0.1364)*1e-5*np.ones(n)  #mol/cm3 0.1
dict_c0['Mg']=(0.0443)*1e-5*np.ones(n)  #mol/cm3 0.1
dict_c0['NH4']=(0.034423)*1e-5*np.ones(n) #mol/cm3 0.1
dict_c0['SO4']=(0.02)*1e-5*np.ones(n)   #mol/cm3 0.1
dict_c0['H']=(0.11)*1e-5*np.ones(n)     #mol/cm3 0.1

for j in range(ntsteps):
    t=j*dt
    print('Time= ', t)
    L0=l00+K0*(1-np.exp(-r0*t/K0))
    tau=-((K0/r0)*np.log(1-lb/K0))
    if t>=tau:
        L1=K1*(1-np.exp(-r1*(t-tau)/K1))
#Guardar solución
    res=fsolve(Frichards,X0,xtol=1e-4,full_output=1,col_deriv=1,\
    band=(1,1),epsfcn=1e-6)
    print('Solution code for Richards equation',res[2],res[3])
    F_residual=np.linalg.norm(res[1]['fvec'])
    print('fvec_norm=',F_residual)
    S=res[0]
#Editar valores negativos
    for i in range(n):
        if S[i]<=0.01 : S[i]=0.01
    S0=S
    X0=S0
    Smat[:,j+1]=S
# reinicio valor de velocidad
    for i in range(n):
        u[i]=-D0*D(S[i])*(S[i]-S[i-1])/dx+Ks*k(S[i])
#recuperar valores para nodos de la raiz
    Fw_table=Fw(S)
#solucion de concentración por especies

    for esp in especies:
        c0=dict_c0[esp]
        dict_cmat[esp][:,0]=dict_c0[esp][:]
        res=fsolve(Fconcent,c0,args=(t),full_output=1,col_deriv=1,band=(1,1))
        print('Solution code for concentration equation',esp,res[2],res[3])
        print('=====')
        dict_c[esp]=res[0]
        for i in range(n):

```

```
if dict_c[esp][i]<=0 : dict_c[esp][i]=0 #edit negative values
#CICLO DE PHREEQC
dict_c0[esp]=dict_c[esp]
dict_cmat[esp][:,j+1]=dict_c[esp]
```

```
if t<=(tfinal-1):
for i in range(n):
```

```
SALIDA1=funciontotal(dict_c['P'][i],dict_c['N'][i],dict_c['K'][i],dict_c['O'][i],dict_c['Ca'][i],dict_
c['Mg'][i],dict_c['NH4'][i],dict_c['SO4'][i],dict_c['H'][i])
dict_c0['P'][i]=SALIDA1[0]/1000
dict_c0['N'][i]=SALIDA1[1]/1000
dict_c0['K'][i]=SALIDA1[2]/1000
dict_c0['O'][i]=SALIDA1[3]/1000
dict_c0['Ca'][i]=SALIDA1[4]/1000
dict_c0['Mg'][i]=SALIDA1[5]/1000
dict_c0['NH4'][i]=SALIDA1[6]/1000
dict_c0['SO4'][i]=SALIDA1[7]/1000
dict_c0['H'][i]=SALIDA1[8]/1000
```

```
#guardar y presentar resultados
if not os.path.exists('resultados_richards_multispecie'):
os.mkdir('resultados_richards_multispecie')

np.savetxt('resultados_richards_multispecie/S.txt',Smat)
np.savetxt('resultados_richards_multispecie/t.txt',times)

for esp in especies:
file='resultados_richards_multispecie/c['+esp+'].txt'
np.savetxt(file,dict_cmat[esp])
```

```
#PESO MOLECULAR
```

```
dict_Pm={}
```

```
dict_Pm['P']=30.9 #g/mol
dict_Pm['N']=14 #g/mol
dict_Pm['K']=39.1 #g/mol
dict_Pm['O']=15.9 #g/mol
dict_Pm['Ca']=40.1 #g/mol
dict_Pm['Mg']=24.3 #g/mol
```

```

dict_Pm['NH4']=132.1 #g/mol
dict_Pm['SO4']=96.1 #g/mol
dict_Pm['H']=1 #g/mol

for esp in especies:
    plt.figure()
    for i in range(0,ntsteps,1):
        plt.plot(zcoo,((dict_cmat[esp])[:,i])*1e6*dict_Pm[esp])
    plt.ylabel('c ['+esp+')')
    plt.xlabel('y profundidad en cm')

Noi=30
res1=[(((dict_cmat['P'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['P']),(((dict_cmat['N'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['N']+(40*sw1)),((dict_cmat['K'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['K'],((dict_cmat['O'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['O'],((dict_cmat['Ca'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['Ca'],((dict_cmat['Mg'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['Mg'],((dict_cmat['NH4'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['NH4'],((dict_cmat['SO4'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['SO4'],((dict_cmat['H'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['H']]
PHT=-np.log((dict_cmat['H'])*1e3)
graficoph=(PHT)(Noi,:)

plt.figure()
for i in range(0,ntsteps,1):
    plt.plot(zcoo,Smats[:,i])
plt.ylabel('% S')
plt.xlabel('y profundidad en cm')

#Grafico un solo perfil en el tiempo
plt.show()
plt.figure()
plt.plot(np.arange(0, tfinal + dt, dt),((dict_cmat['P'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['P'])
plt.ylabel('c [P] (mg/l) ') #mol/cm3
plt.xlabel('Tiempo (días)')

plt.show()
plt.figure()
plt.plot(np.arange(0, tfinal + dt, dt),((dict_cmat['N'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['N']+(40*sw1))
plt.ylabel('c [N] (mg/l) ')
plt.xlabel('Tiempo (días)')

plt.show()
plt.figure()

```

```
plt.plot(np.arange(0, tfinal + dt, dt),((dict_cmat['K'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['K'])
plt.ylabel('c [K] (mg/l) ') #mol/cm3
plt.xlabel('Tiempo (días)')
```

```
plt.show()
plt.figure()
plt.plot(np.arange(0, tfinal + dt, dt),((dict_cmat['O'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['O'])
plt.ylabel('c [O] (mg/l) ') #mol/cm3
plt.xlabel('Tiempo (días)')
```

```
plt.show()
plt.figure()
plt.plot(np.arange(0, tfinal + dt, dt),((dict_cmat['Ca'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['Ca'])
plt.ylabel('c [Ca] (mg/l) ') #mol/cm3
plt.xlabel('Tiempo (días)')
```

```
plt.show()
plt.figure()
plt.plot(np.arange(0, tfinal + dt, dt),((dict_cmat['Mg'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['Mg'])
plt.ylabel('c [Mg] (mg/l) ') #mol/cm3
plt.xlabel('Tiempo (días)')
```

```
plt.show()
plt.figure()
plt.plot(np.arange(0, tfinal + dt, dt),((dict_cmat['NH4'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['NH4'])
plt.ylabel('c [NH4] (mg/l) ') #mol/cm3
plt.xlabel('Tiempo (días)')
```

```
plt.show()
plt.figure()
plt.plot(np.arange(0, tfinal + dt, dt),((dict_cmat['SO4'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['SO4'])
plt.ylabel('c [SO4] (mg/l) ') #mol/cm3
plt.xlabel('Tiempo (días)')
```

```
plt.show()
plt.figure()
plt.plot(np.arange(0, tfinal + dt, dt),((dict_cmat['H'])(Noi,:))*1e6*dict_Pm['H'])
plt.ylabel('c [H] (mg/l) ') #mol/cm3
plt.xlabel('Tiempo (días)')
```

```
plt.show()
plt.figure()
plt.plot(np.arange(0, tfinal + dt, dt),(PHT)(Noi,:))
```

```

plt.ylabel('pH ')
plt.xlabel('Tiempo (días)')

plt.show()
plt.figure()
plt.plot(np.arange(0, tfinal + dt, dt),(Smat)[(Noi)])
plt.ylabel('Saturación ')
plt.xlabel('Tiempo (días)')

# #=====
#           #GRAFICAS 3D
# #=====
# #FOSFORO
# fig = plt.figure(figsize=(8,6))
# ax3d = plt.axes(projection="3d")
# xdata = np.arange(0, zmax, dx)
# ydata = np.arange(0, tfinal + dt, dt)
# X,Y = np.meshgrid(xdata,ydata)
# Z = dict_cmat["P"]*1e6*dict_Pm["P"]
# Z = Z.T
# ax3d = plt.axes(projection='3d')
# ax3d.plot_surface(X, Y, Z,cmap='terrain')
# ax3d.set_title('Fosforo')
# ax3d.set_xlabel('Profundidad cm')
# ax3d.set_ylabel('Tiempo dias')
# ax3d.set_zlabel('Concentración ppm')
# plt.show()

# #NITROGENO
# fig = plt.figure(figsize=(8,6))
# ax3d = plt.axes(projection="3d")
# xdata = np.arange(0, zmax, dx)
# ydata = np.arange(0, tfinal + dt, dt)
# X,Y = np.meshgrid(xdata,ydata)
# Z = dict_cmat["N"]*1e6*dict_Pm["N"]
# Z = Z.T
# ax3d = plt.axes(projection='3d')
# ax3d.plot_surface(X, Y, Z,cmap='terrain')
# ax3d.set_title('Nitrogeno')
# ax3d.set_xlabel('Profundidad cm')
# ax3d.set_ylabel('Tiempo dias')
# ax3d.set_zlabel('Concentración ppm')

```

```
# plt.show()

# #POTASIO
# fig = plt.figure(figsize=(8,6))
# ax3d = plt.axes(projection="3d")
# xdata = np.arange(0, zmax, dx)
# ydata = np.arange(0, tfinal + dt, dt)
# X,Y = np.meshgrid(xdata,ydata)
# Z = dict_cmat["K"]*1e6*dict_Pm['K']
# Z = Z.T
# ax3d = plt.axes(projection='3d')
# ax3d.plot_surface(X, Y, Z,cmap='terrain')
# ax3d.set_title('Potasio')
# ax3d.set_xlabel('Profundidad cm')
# ax3d.set_ylabel('Tiempo dias')
# ax3d.set_zlabel('Concentración ppm')
# plt.show()

# #OXIGENO
# fig = plt.figure(figsize=(8,6))
# ax3d = plt.axes(projection="3d")
# xdata = np.arange(0, zmax, dx)
# ydata = np.arange(0, tfinal + dt, dt)
# X,Y = np.meshgrid(xdata,ydata)
# Z = dict_cmat["O"]*1e6*dict_Pm['O']
# Z = Z.T
# ax3d = plt.axes(projection='3d')
# ax3d.plot_surface(X, Y, Z,cmap='terrain')
# ax3d.set_title('Oxigeno')
# ax3d.set_xlabel('Profundidad cm')
# ax3d.set_ylabel('Tiempo dias')
# ax3d.set_zlabel('Concentración ppm')
# plt.show()

# #CALCIO
# fig = plt.figure(figsize=(8,6))
# ax3d = plt.axes(projection="3d")
# xdata = np.arange(0, zmax, dx)
# ydata = np.arange(0, tfinal + dt, dt)
# X,Y = np.meshgrid(xdata,ydata)
# Z = dict_cmat["Ca"]*1e6*dict_Pm['Ca']
# Z = Z.T
# ax3d = plt.axes(projection='3d')
```

```
# ax3d.plot_surface(X, Y, Z,cmap='terrain')
# ax3d.set_title('Calcio')
# ax3d.set_xlabel('Profundidad cm')
# ax3d.set_ylabel('Tiempo dias')
# ax3d.set_zlabel('Concentración ppm')
# plt.show()
```

```
# #MAGNESIO
# fig = plt.figure(figsize=(8,6))
# ax3d = plt.axes(projection="3d")
# xdata = np.arange(0, zmax, dx)
# ydata = np.arange(0, tfinal + dt, dt)
# X,Y = np.meshgrid(xdata,ydata)
# Z = dict_cmat["Mg"]*1e6*dict_Pm['Mg']
# Z = Z.T
# ax3d = plt.axes(projection='3d')
# ax3d.plot_surface(X, Y, Z,cmap='terrain')
# ax3d.set_title('Magnesio')
# ax3d.set_xlabel('Profundidad cm')
# ax3d.set_ylabel('Tiempo dias')
# ax3d.set_zlabel('Concentración ppm')
# plt.show()
```

```
# #AMONIO
# fig = plt.figure(figsize=(8,6))
# ax3d = plt.axes(projection="3d")
# xdata = np.arange(0, zmax, dx)
# ydata = np.arange(0, tfinal + dt, dt)
# X,Y = np.meshgrid(xdata,ydata)
# Z = dict_cmat["NH4"]*1e6*dict_Pm['NH4']
# Z = Z.T
# ax3d = plt.axes(projection='3d')
# ax3d.plot_surface(X, Y, Z,cmap='terrain')
# ax3d.set_title('Amonio')
# ax3d.set_xlabel('Profundidad cm')
# ax3d.set_ylabel('Tiempo dias')
# ax3d.set_zlabel('Concentración ppm')
# plt.show()
```

```
# #SULFATO
# fig = plt.figure(figsize=(8,6))
# ax3d = plt.axes(projection="3d")
```

```
# xdata = np.arange(0, zmax, dx)
# ydata = np.arange(0, tfinal + dt, dt)
# X,Y = np.meshgrid(xdata,ydata)
# Z = dict_cmat["SO4"]*1e6*dict_Pm['SO4']
# Z = Z.T
# ax3d = plt.axes(projection='3d')
# ax3d.plot_surface(X, Y, Z,cmap='terrain')
# ax3d.set_title('Sulfato')
# ax3d.set_xlabel('Profundidad cm')
# ax3d.set_ylabel('Tiempo dias')
# ax3d.set_zlabel('Concentración ppm')
# plt.show()

# #HIDROGENO
# fig = plt.figure(figsize=(8,6))
# ax3d = plt.axes(projection="3d")
# xdata = np.arange(0, zmax, dx)
# ydata = np.arange(0, tfinal + dt, dt)
# X,Y = np.meshgrid(xdata,ydata)
# Z = dict_cmat["H"]*1e6*dict_Pm['H']
# Z = Z.T
# ax3d = plt.axes(projection='3d')
# ax3d.plot_surface(X, Y, Z,cmap='terrain')
# ax3d.set_title('Hidrogeno')
# ax3d.set_xlabel('Profundidad cm')
# ax3d.set_ylabel('Tiempo dias')
# ax3d.set_zlabel('Concentración ppm')
# plt.show()
```

## Anexo 2 Modelo de equilibrio químico

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
```

Created on Thu Sep 23 09:44:17 2021

```
@author: nevis
"""
```

```
import phreeqpy.iphreeqc.phreeqc_dll as phreeqc_mod
```

```
P=0.00089419
```



N=0.002963475

K=0.0334

O=0.182

Ca=0.1364

Mg=0.0443

NH4=0.034423

SO4=0.02

H=0.11

def funciontotal(P , N , K , O , Ca , Mg , NH4 , SO4,H):

P1=P

NITRITO1=N

K1=K

O1=O

Ca1=Ca

Mg1=Mg

NH41=NH4

SO41=SO4

H1=H

ESPECIES={'pH':6.32,'pe':12.5,'CO2':0.0711,'TOT\_H':H1,'TOT\_O':O1,'NO3-':NITRITO1,\

'NH4+':NH41,'K':K1,'O(0)':12,'Ca':Ca1,'Mg':Mg1,'P':P1,'S':SO41,\

'Fe':0.0129,'Cl-':0.003,'CH4':0.005, 'CO':0.00011107,'Al':3}

def GASEOSA(species):

textinput='TITLE QUIMICA DEL SUELO FASE GASEOSA. \n'

textinput+='SOLUTION 1 \n'

textinput+='units mol/kgw \n'

textinput+='temp 25.0 \n'

textinput+='pH '+str(ESPECIES['pH'])+' charge \n'

textinput+='pe '+str(ESPECIES['pe'])+' O2(g) -0.68 \n'

textinput+='N(+5) '+str(ESPECIES['NO3-'])+'\n'

textinput+='N(-3) '+str(ESPECIES['NH4+'])+'\n'

textinput+='CO2(g) '+str(ESPECIES['CO2'])+'\n'

textinput+='TOT\_H '+str(ESPECIES['TOT\_H'])+'\n'

textinput+='TOT\_O '+str(ESPECIES['TOT\_O'])+'\n'

textinput+='CH4 '+str(ESPECIES['CH4'])+'\n'

textinput+='CO '+str(ESPECIES['CO'])+'\n'

textinput+='Al '+str(ESPECIES['Al'])+'\n'

textinput+='REACTION 1+'\n'

textinput+='H2O -1+'\n'

textinput+='52.73 moles+'\n'

```

textinput+='MIX      1'\n'
textinput+='1 20'\n'
textinput+='SELECTED_OUTPUT'\n'
textinput+='-reset      false'\n'
textinput+='-step'\n'
textinput+='-high_precision      true'\n'
textinput+='-ph      true'\n'
textinput+='USER_PUNCH '+'\n'
textinput+='-headings charge H O N(g) CO2(g) H+ OH- N(+5) N(-3) pH'\n'
textinput+='10 PUNCH charge_balance'\n'
textinput+='20 PUNCH TOT("H"), TOT("O"),TOTMOLE("N(g)")'\n'
textinput+='30 PUNCH TOTMOLE("CO2(g)"),TOTMOLE("OH-
"),TOTMOLE("H+")'\n'
textinput+='40 PUNCH TOTMOLE("N(+5)"), TOTMOLE("N(+3)"), -LA("H+")'\n'
textinput+='END'\n'

#Initialize IPhreeqc module
phreeqc = phreeqc_mod.IPhreeqc()
phreeqc.load_database(r"phreeqc.dat")
phreeqc.run_string(textinput)
components = phreeqc.get_component_list()
# phc_string = 'RUN_CELLS; -cells 1\n'
# phreeqc.run_string(phc_string)
output = phreeqc.get_selected_output_array()

return output

output1=GASEOSA(ESPECIES)

ESPECIES1=output1[2]
PH1=ESPECIES1[1]
TOT_H1=ESPECIES1[3]
TOT_O1=ESPECIES1[4]
AMONIO=ESPECIES1[10]

ESPECIES2={'pH':PH1,'TOT_H':TOT_H1,'TOT_O':TOT_O1}

def SOLIDA(ESPECIES2):
textinput='TITULO QUIMICA DEL SUELO FASE SOLIDA. \n'
textinput+='SOLUTION      1 \n'
textinput+='units      mol/kgw \n'
textinput+='temp      25.0 \n'
textinput+='pH      '+str(ESPECIES2['pH'])+' charge \n'
textinput+='pe      '+str(ESPECIES2['pe'])+' O2(g) -0.68 \n'

```

```

textinput+='TOT_H      '+str(ESPECIES2['TOT_H'])+'\n'
textinput+='TOT_O      '+str(ESPECIES2['TOT_O'])+'\n'
textinput+='K          '+str(ESPECIES['K'])+'\n'
textinput+='Ca          '+str(ESPECIES['Ca'])+'\n'
textinput+='Mg          '+str(ESPECIES['Mg'])+'\n'
textinput+='P           '+str(ESPECIES['P'])+'\n'
textinput+='CH4         '+str(ESPECIES['CH4'])+'\n'
textinput+='CO          '+str(ESPECIES['CO'])+'\n'
textinput+='Al          '+str(ESPECIES['Al'])+'\n'
textinput+='EQUILIBRIUM_PHASES 1'+'\n'
textinput+='Illite 0.0 1.0'+'\n'
textinput+='K-mica 0.0 1.0'+'\n'
textinput+='K-feldspar 0.0 1.0'+'\n'
textinput+='Calcite 0.0 1.0'+'\n'
textinput+='Dolomite 0.0 1.0'+'\n'
textinput+='Gypsum 0.0 1.0'+'\n'
textinput+='Hydroxyapatite 0.0 1.0'+'\n'
textinput+='Anorthite 0.0 1.0'+'\n'
textinput+='SELECTED_OUTPUT'+'\n'
textinput+='-reset      false'+'\n'
textinput+='-step'+'\n'
textinput+='-high_precision true'+'\n'
textinput+='-ph          true'+'\n'
textinput+='USER_PUNCH '+'\n'
textinput+='-headings charge H2(g) H2O O2 OH- H+ H2O K Ca Mg P PH'+'\n'
textinput+='10 PUNCH charge_balance'+'\n'
textinput+='20 PUNCH SI("H2(g)", SI("H2O(g)",SI("O2(g)"))'+'\n'
textinput+='30 PUNCH TOT("O"),TOT("H+"),TOTMOLE("H2O")'+'\n'
textinput+='40 PUNCH
TOTMOLE("K"),TOTMOLE("Ca"),TOTMOLE("Mg"),TOTMOLE("P")'+'\n'
textinput+='50 PUNCH -LA("H+")'+'\n'
textinput+='END'+'\n'

#Initialize IPhreeqc module
phreeqc = phreeqc_mod.IPhreeqc()
phreeqc.load_database(r"phreeqc.dat")
phreeqc.run_string(textinput)
components = phreeqc.get_component_list()
# phc_string = 'RUN_CELLS; -cells 1\n'
# phreeqc.run_string(phc_string)
output2 = phreeqc.get_selected_output_array()

```

```
return output2
output2=SOLIDA(ESPECIES2)
ESPECIES2=output2[2]
PH2=ESPECIES2[1]
TOT_H2=ESPECIES2[3]
TOT_O2=ESPECIES2[5]
K2=ESPECIES2[8]
Ca2=ESPECIES2[9]
Mg2=ESPECIES2[10]
P2=ESPECIES2[11]
```

```
ESPECIES3={'pH':PH2,'TOT_H':TOT_H2,'TOT_O':TOT_O2,'Ca':Ca2,'Mg':Mg2,'P':P2,'K':
K2}
```

```
def REDOX(ESPECIES3):
    textinput='TITULO QUIMICA DEL SUELO REACCIONES REDOX. \n'
    textinput+='SOLUTION      1 \n'
    textinput+='units        mol/kgw \n'
    textinput+='temp         25.0 \n'
    textinput+='pH           '+str(ESPECIES3['pH'])+' charge \n'
    textinput+='pe           '+str(ESPECIES3['pe'])+' O2(g) -0.68 \n'
    textinput+='TOT_H        '+str(ESPECIES3['TOT_H'])+'\n'
    textinput+='TOT_O        '+str(ESPECIES3['TOT_O'])+'\n'
    textinput+='S           '+str(ESPECIES3['S'])+'\n'
    textinput+='Fe           '+str(ESPECIES3['Fe'])+'\n'
    textinput+='K           '+str(ESPECIES3['K'])+'\n'
    textinput+='Ca           '+str(ESPECIES3['Ca'])+'\n'
    textinput+='Mg           '+str(ESPECIES3['Mg'])+'\n'
    textinput+='P           '+str(ESPECIES3['P'])+'\n'
    textinput+='CH4          '+str(ESPECIES3['CH4'])+'\n'
    textinput+='CO           '+str(ESPECIES3['CO'])+'\n'
    textinput+='Al           '+str(ESPECIES3['Al'])+'\n'
    textinput+='REACTION 1'+'\n'
    textinput+='Fe 0.0129'+'\n'
    textinput+='Mn 0.0012'+'\n'
    textinput+='Cu 1.0'+'\n'
    textinput+='S 0.02'+'\n'
    textinput+='H+ 1.0'+'\n'
    textinput+='SELECTED_OUTPUT'+'\n'
    textinput+='-reset      false'+'\n'
    textinput+='-step'+'\n'
    textinput+='-high_precision  true'+'\n'
    textinput+='-ph         true'+'\n'
```

```
textinput+='USER_PUNCH '+'\n'
textinput+='-headings charge Fe Mn Cu S K Ca Mg P H O pH'+'\n'
textinput+='10 PUNCH charge_balance'+'\n'
textinput+='20 PUNCH
TOTMOLE("Fe"),TOTMOLE("Mn"),TOTMOLE("Cu"),TOTMOLE("S")+'\n'
textinput+='30 PUNCH
TOTMOLE("K"),TOTMOLE("Ca"),TOTMOLE("Mg"),TOTMOLE("P")+'\n'
textinput+='40 PUNCH TOT("H"),TOT("O"),-LA("H")+'\n'
textinput+='END'+'\n'
```

```
    #Initialize IPhreeqc module
    phreeqc = phreeqc_mod.IPhreeqc()
    phreeqc.load_database(r"phreeqc.dat")
    phreeqc.run_string(textinput)
    components = phreeqc.get_component_list()
    # phc_string = 'RUN_CELLS; -cells 1\n'
    # phreeqc.run_string(phc_string)
    output3 = phreeqc.get_selected_output_array()
```

```
return output3
```

```
output3=REDOX(ESPECIES3)
```

```
ESPECIES2=output2[2]
K2=ESPECIES2[8]
Ca2=ESPECIES2[9]
Mg2=ESPECIES2[10]
P2=ESPECIES2[11]
```

```
ESPECIES3=output3[2]
PH3=ESPECIES3[1]
Fe3=ESPECIES3[3]
S3=ESPECIES3[6]
TOT_H3=ESPECIES3[11]
TOT_O3=ESPECIES3[12]
K3=ESPECIES3[7]
Ca3=ESPECIES3[8]
Mg3=ESPECIES3[9]
P3=ESPECIES3[10]
```

```
K4=K2+K3+ESPECIES['K']
Ca4=Ca2+Ca3+ESPECIES['Ca']
```

Mg4=Mg2+Mg3+ESPECIES['Mg']

P4=P2+P3+ESPECIES['P']

NO34=ESPECIES['NO3-']+AMONIO

ESPECIES4={ 'pH':PH3, 'pe':12.5, 'TOT\_H':TOT\_H3, 'TOT\_O':TOT\_O3, 'K':K4, \
 'Ca':Ca4, 'Mg':Mg4, 'P':P4, 'S':S3, 'Fe':Fe3, 'NO3-':NO34 }

def EQUILIBRIO(ESPECIES4):

textinput='QUIMICA DEL SUELO EQUILIBRIO. \n'

textinput+='SOLUTION 1 \n'

textinput+='units mol/kgw \n'

textinput+='temp 25.0 \n'

textinput+='pH '+str(ESPECIES4['pH'])+' charge \n'

textinput+='N(+5) '+str(ESPECIES4['NO3-'])+'\n'

textinput+='N(-3) '+str(ESPECIES4['NH4+'])+'\n'

textinput+='K '+str(ESPECIES4['K'])+'\n'

textinput+='O(0) '+str(ESPECIES4['O(0)'])+'\n'

textinput+='Ca '+str(ESPECIES4['Ca'])+'\n'

textinput+='Mg '+str(ESPECIES4['Mg'])+'\n'

textinput+='P '+str(ESPECIES4['P'])+'\n'

textinput+='S '+str(ESPECIES4['S'])+'\n'

textinput+='Fe '+str(ESPECIES4['Fe'])+'\n'

textinput+='Cl '+str(ESPECIES4['Cl-'])+'\n'

textinput+='TOT\_H '+str(ESPECIES4['TOT\_H'])+'\n'

textinput+='TOT\_O '+str(ESPECIES4['TOT\_O'])+'\n'

textinput+='CH4 '+str(ESPECIES4['CH4'])+'\n'

textinput+='CO '+str(ESPECIES4['CO'])+'\n'

textinput+='Al '+str(ESPECIES4['Al'])+'\n'

textinput+='EXCHANGE 1+\n'

textinput+='-equilibrate 1+\n'

textinput+='X 0.011+\n'

textinput+='SELECTED\_OUTPUT'+\n'

textinput+='-reset false'+\n'

textinput+='-step'+\n'

textinput+='-high\_precision true'+\n'

textinput+='-ph true'+\n'

textinput+='USER\_PUNCH '+\n'

textinput+='-headings charge N(+5) N(-3) K O(-2) Ca Mg P S Fe Cl PH'+\n'

textinput+='10 PUNCH charge\_balance'+\n'

textinput+='20 PUNCH TOTMOLE("N(5)"), TOTMOLE("N(-3)"),TOTMOLE("K")'+\n'

textinput+='30 PUNCH

TOT("O"),TOTMOLE("Ca"),TOTMOLE("Mg"),TOTMOLE("P")'+\n'

textinput+='40 PUNCH TOT("S"),TOT("H"),TOTMOLE("Fe"),TOTMOLE("Cl"),-

LA("H+")'+\n'

```
textinput+='END'+'\n'

    #Initialize IPhreeqc module
    phreeqc = phreeqc_mod.IPhreeqc()
    phreeqc.load_database(r"phreeqc.dat")
    phreeqc.run_string(textinput)
    components = phreeqc.get_component_list()
    # phc_string = 'RUN_CELLS; -cells 1\n'
    # phreeqc.run_string(phc_string)
    output4 = phreeqc.get_selected_output_array()

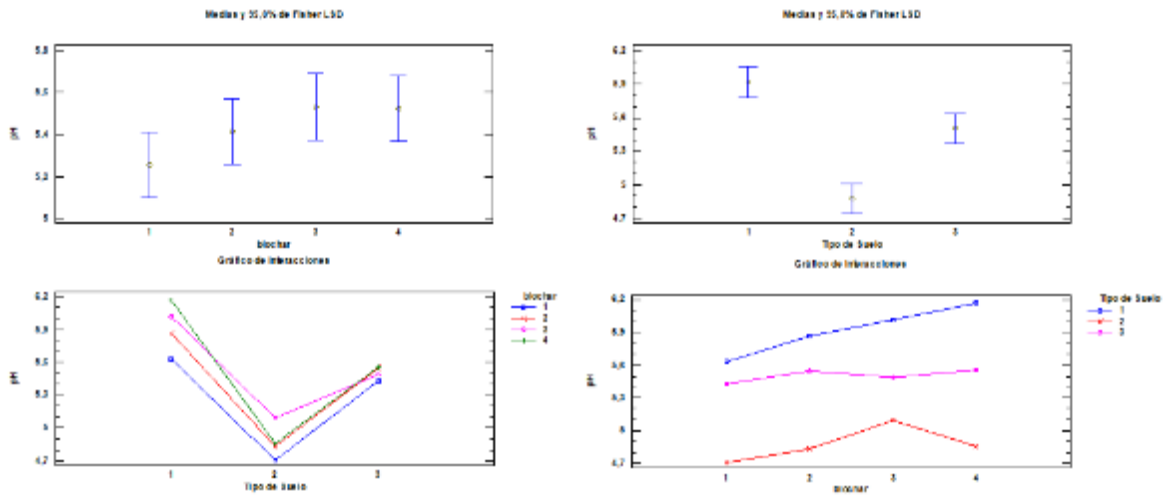
    return output4

output4=EQUILIBRIO(ESPECIES4)
ESPECIES5=output4[2]
P2=ESPECIES5[9]
K2=ESPECIES5[5]
NO32=ESPECIES5[3]
O2=ESPECIES5[6]
Ca2=ESPECIES5[7]
Mg2=ESPECIES5[8]
NH42=ESPECIES5[2]
SO42=ESPECIES5[10]
H2=ESPECIES5[11]
PH=ESPECIES5[1]
output5=[P2, K2, NO32, O2, Ca2,Mg2, NH42, SO42,H2]
return output5
resultado_final=funciontotal(P,N,K,O, Ca, Mg, NH4, SO4, H2)
```

## Anexo 3 Análisis estadístico

### Análisis pH

El análisis de varianza se obtuvo un valor de p de 0.0000 para el efecto del tipo de suelo mientras que para las dosificaciones de biochar el valor p fue de 0.2616, por lo tanto por medio del análisis estadístico realizado, por lo tanto teniendo en cuenta que se escogió la suma de cuadrados tipo III como método de análisis, la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores, por lo que un valor p inferior a 0.05 tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el pH con un nivel de confianza de 95%



### Análisis permeabilidad

El valor P para el biochar y el tipo de suelo fue en ambos casos 0.0000 teniendo esto en cuenta y considerando sé que ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 3 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre PERM con un 95,0% de nivel de confianza; Es decir tanto el biochar como el tipo de suelo son factores estadísticamente significativos con un nivel de confianza de 95%.



