

**EVALUACIÓN DE UN PROCESO DE FITORREMEDIACIÓN EN SUELO  
PROVENIENTE DEL MUNICIPIO DE GUAMAL, META, CONTAMINADO POR  
DESECHOS DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA CON ALTOS  
CONTENIDOS DE METALES PESADOS**

**KIMBERLY ESTEFANIA JÍMENEZ SILVA  
MANUEL FELIPE MÁRQUEZ GÓMEZ**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERÍA QUÍMICA  
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**

**ORIENTADOR:  
YATNIELAH PIRELA ROPERO  
Ingeniera de Petróleos**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA INGENIERÍA QUÍMICA, INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BOGOTÁ D.C.,**

**2022**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

Nombre del Director

Firma del Director

---

Nombre del Presidente

Firma del presidente de jurado

---

Nombre del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., marzo 2022

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de ingenierías

Dra. Alexandra Mejía Guzmán (E)

Directora Programa de Ingeniería Química

Dra. Nubia Liliana Becerra Ospina

Director Programa de Ingeniería de Petróleos

Dr. Juan Carlos Rodríguez Esparza

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo Docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente Documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## AGRADECIMIENTOS

A nuestros tutores YATNIELAH PIRELA ROPERO, DIANA MORALES FONSECA y NELSON FERNANDEZ BARRERO. Agradecemos su paciencia y constancia en el desarrollo de este trabajo, gracias a su colaboración y sus consejos, que fueron siempre útiles, hoy se ha logrado culminar esta investigación. Ustedes formaron parte importante de esta iniciativa, con sus aportes profesionales, cuando más se necesitaron; por estar allí cuando las horas de trabajo se hacían confusas. Gracias por sus orientaciones.

A los docentes, sus palabras fueron sabias, sus conocimientos rigurosos y precisos, a ustedes, les debo mis conocimientos. Donde quiera que vaya, los llevaré conmigo en mí transitar profesional. Su semilla de conocimientos, germinó en el alma y el espíritu. Gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación perseverancia y tolerancia.

A mis padres, mi hermano y mis familiares, ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a mi lado en los días y noches más difíciles durante mis horas de estudio. Siempre han sido mis mejores guías de vida. Hoy cuando concluyo mis estudios, les dedico a ustedes este logro, como una meta más conquistada. Orgulloso de haberlos elegido como mi familia y que estén a mi lado en este momento tan importante. A mi padre todo el amor y la admiración, aunque hoy continúa guiándome desde el cielo.

A mi compañero de tesis, hoy culmina esta maravillosa aventura y no puedo dejar de recordar cuantas tardes y horas de trabajo nos juntamos a lo largo de nuestra formación. Hoy nos toca cerrar un capítulo maravilloso en esta historia de vida y no puedo dejar de agradecerle por su apoyo y constancia, al estar en las horas más difíciles, por compartir horas de estudio. Gracias por estar siempre allí.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>pág.</b>
<b>RESUMEN</b>	10
<b>INTRODUCCIÓN</b>	11
<b>OBJETIVOS</b>	12
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	13
1.1. Fluido de perforación	13
1.2. Propiedades fisicoquímicas del fluido de perforación	13
1.2.1. <i>Potencial de hidrógeno (pH)</i>	13
1.2.2. <i>Viscosidad</i>	13
1.2.3. <i>Densidad</i>	14
1.2.4. <i>Reología</i>	14
1.2.5. <i>Capacidad azul de Metileno</i>	14
1.2.6. <i>Alcalinidad del filtrado</i>	14
1.2.7. <i>Dureza total</i>	14
1.2.8. <i>Contenido de sólidos</i>	14
1.3 Fitorremediación	15
1.3.1. <i>Procesos de fitorremediación</i>	15
1.4. Mecanismos de absorción de metales pesados en las plantas	16
1.4.1. <i>Fitoquelatinas</i>	16
1.4.2. <i>Aminoácidos</i>	17
1.5. <i>Brassica juncea</i>	17
1.6. Metales pesados	18
1.6.1. <i>Contaminación del suelo por metales pesados</i>	18
1.7. Suelo Guamal Meta	20
<b>2. METODOLOGÍA Y DATOS</b>	22
2.1. Tipo de investigación	22
2.2. Métodos de investigación	22
2.3. Elaboración de un fluido de perforación base agua (Lodo no disperso)	22
2.3.1. <i>Pasos para la caracterización del fluido de perforación</i>	23

2.4. Metales pesados cadmio (Cd) y cromo (Cr) en el fluido de perforación	25
2.5. Características del suelo	28
2.5.1. <i>Ubicación geográfica del suelo</i>	29
2.5.2. <i>Pasos para la extracción del suelo</i>	30
2.5.3. <i>Entorno de las muestras de suelo</i>	31
2.5.4. <i>Textura del suelo</i>	31
2.5.5. <i>Caracterización de cadmio (Cd) y Cromo (Cr) en el suelo</i>	33
2.5.6. <i>pH</i>	34
2.6. Contaminación del suelo	34
2.6.1. <i>Procedimiento para contaminar el suelo</i>	35
2.7. Proceso de Fitorremediación en el suelo contaminado	36
2.7.1. <i>Seguimiento del proceso de fitorremediación</i>	36
2.8. Comparación del suelo después del tratamiento	37
2.8.1. <i>Contenido de metal pesado</i>	37
2.8.2. <i>pH en el suelo</i>	37
2.8.3. <i>Diseño experimental</i>	38
<b>3. RESULTADOS, ANÁLISIS</b>	39
3.1. Parámetros a evaluar en el suelo	41
3.1.1. <i>Textura del suelo proveniente de Guamal Meta</i>	41
3.2. Comportamiento de la planta en un entorno contaminado	45
3.3 Suelo después del proceso de Fitorremediación	52
3.3.1 Comparación del pH antes y después del proceso de fitorremediación	54
<b>4. CONCLUSIONES</b>	59
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	61
<b>ANEXOS</b>	70

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1: Estado físico de los contaminantes	20
Figura 2: Susceptibilidad por la variable Suelos Edáficos.	21
Figura 3: Mapa de susceptibilidad por la variable Cobertura de la Tierra	22
Figura 4: Cantidad de CdO y CrO <sub>3</sub> , para contaminar cada muestra del nivel 1 del tratamiento	28
Figura 5: Cantidad de CdO y CrO <sub>3</sub> , para contaminar cada muestra del nivel 2 del tratamiento	29
Figura 6: Coordenadas toma de muestras del suelo	30
Figura 7: Toma de muestra de suelo	31
Figura 8: Triángulo textural	34
Figura 9: Figura de la escala de los pH en cada una de las muestras analizadas	43
Figura 10: Figura de la concentración de cadmio (Cd) y cromo (Cr), en las muestras	44
Figura 11: Figura de Humedad vs Tiempo	47
Figura 12: Figura de temperatura ambiente vs tiempo	48
Figura 13: Luz en la planta vs tiempo	49
Figura 14: Número de hojas con respecto al tiempo	50
Figura 15: Figura de la escala de los pH en cada una de las muestras analizadas	53
Figura 16: Figura de la concentración de cadmio (Cd) y cromo (Cr), en los tratamientos	54
Figura 17: Figura de comparación de pH antes y después del proceso de fitorremediación	55
Figura 18: Concentraciones de cadmio (Cd) en el Nivel 1 y Nivel 2	56
Figura 19: Concentraciones de cromo (Cr) en el Nivel 1 y Nivel 2	58

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1: Taxonomía de la brassica juncea	18
Tabla 2: Rango de concentraciones de metales pesados	20
Tabla 3: Concentraciones y productos en el fluido de perforación	24
Tabla 4: Concentración máxima permisible de metales pesados	27
Tabla 5: Resultados del fluido de perforación	40
Tabla 6: Porcentaje de arena, limo y arcilla del suelo	42
Tabla 7: Resultados de suelo, pH, cadmio TOTAL, cromo TOTAL	43
Tabla 8: Número de hojas en los tratamientos con respecto al tiempo	50
Tabla 9: Resultados de suelo después del proceso de fitorremediación, pH, cadmio total, cromo total.	53
Tabla 10: Concentraciones de cadmio (Cd) en el Nivel 1 y Nivel 2	56
Tabla 11: Estadísticas de las Muestras emparejadas de cadmio	57
Tabla 12: Correlación de las muestras emparejadas de cadmio	57
Tabla 13: Prueba de muestras emparejadas	57
Tabla 14: Concentraciones de cromo (Cr) en el Nivel 1 y Nivel 2	58
Tabla 15: Estadísticas de las Muestras emparejadas de cromo	59

## RESUMEN

El presente trabajo es desarrollado desde una escala experimental realizada en laboratorios, con un enfoque en el área de biorremediación del suelo, por medio de la planta *Brassica Juncea*, sometiéndose al suelo proveniente de Guamal, Meta debido a la cercanía con el campo Castilla siendo contaminado con un fluido de perforación que tiene contenido de metales pesados, teniendo un enfoque en los metales cadmio (Cd) y cromo (Cr) que provienen de la fricción generada por la sarta de perforación, cuantificando los por medio del método de digestión HF en frío - cuantificación absorción atómica, para determinar la concentración de cadmio (Cd) y cromo (Cr) presentes en el suelo antes y después del proceso de fitorremediación.

En los resultados obtenidos no se encuentran diferencias significativas en cambio de la concentración de metales pesados en el suelo antes y después del proceso de fitorremediación en el que afectan características como la concentración de Bentonita del fluido de perforación, el pH del suelo que es considerado extremadamente ácido y el tipo de suelo franco - arcilloso del municipio de Guamal, Meta.

El mayor aporte que tiene este estudio es la evaluación de un proceso de fitorremediación en un suelo al ser contaminado con fluido de perforación base agua con contenido de metales pesados enfocado en dos metales cadmio (Cd) y cromo (Cr).

Palabras claves: Fitorremediación, Fluido, Perforación, Metales Pesados, Contaminación, Suelo.

## INTRODUCCIÓN

El proceso de la perforación da como resultados residuos contaminantes, como el fluido de perforación usado para la perforación de pozos, trayendo consigo a la superficie cortes, que tiene contenido de metales pesados como el cadmio y el cromo que al entrar en contacto con el suelo lo contaminan, afectando directamente a la fauna y flora de la zona [1], [3].

La fitorremediación es una alternativa que ayuda a la reparación de suelos contaminados por metales pesados, teniendo como ventaja el aprovechamiento de procesos naturales de las plantas para mitigar el impacto negativo de los contaminantes [3], utilizando la planta *Brassica Juncea* que es considerada una especie hiperacumuladora que posee una captación sustancial intracelular en la punta de sus raíces, con la capacidad de desarrollarse en ambientes por debajo de los 24 °C, y un pH entre los 4.4 – 8.3 ayudando a disminuir la concentración de metales pesados en el suelo [4].

Este estudio tiene como objetivo evaluar el proceso de fitorremediación en un suelo contaminado por desechos de fluidos de perforación base agua contaminado con metales pesados, donde se realiza la caracterización del suelo, el cultivo de la planta y los respectivos análisis de las concentraciones de metales pesados antes y después de la implementación de la tecnología biorremediadora.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Evaluar un proceso de fitorremediación en suelo proveniente del Municipio de Guamal contaminado por desechos de fluidos de perforación base agua con altos contenidos de metales pesados.

### **Objetivos específicos**

- Diseñar un fluido de perforación base agua, que tenga como contenido metales pesados.
- Caracterizar el suelo proveniente del Municipio de Guamal analizando sus componentes de metales pesados antes y después de contaminarlo.
- Implementar un proceso insitu de fitorremediación en suelo contaminado con fluidos de perforación con alto contenido de metales pesados.
- Realizar el análisis de los resultados obtenidos en el suelo después del proceso de fitorremediación, comparando los resultados de las concentraciones de metales pesados antes y después del proceso.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Fluido de perforación

El fluido de perforación es una sustancia que tiene características químicas y físicas que cumple con las funciones de controlar la presión de formación, transportar los recortes hasta la superficie, lubricar la broca, minimizar los daños a la formación, mantener la estabilidad del pozo, permitir el ingreso y cementación de la tubería de revestimiento, como también garantizar un nivel de corrosión aceptable por medio del control de pH [5].

Se compone de una fase continua de agua, aceite o gas, una parte coloidal como arcillas, otra parte inerte que contiene materiales densificantes y una fase dispersa que contiene sólidos [6].

### 1.2 Propiedades fisicoquímicas del fluido de perforación

#### 1.2.1 *Potencial de hidrógeno (pH)*

Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución, su escala es de 0 a 14, siendo ácido valores inferiores a 7 y básicos los mayores de 7. Los fluidos de perforación base agua el pH debe estar en un rango de 9 y 9.5 para evitar corrosión y conservar las propiedades reológicas estables [6].

#### 1.2.2 *Viscosidad*

Expresa la facilidad que tiene un fluido para fluir cuando se le aplica una fuerza externa. Entre mayor sea la viscosidad del lodo mejor es el transporte de los recortes [7].

### **1.2.3 Densidad**

Se define como la masa por unidad de volumen de un sólido, líquido, o gas. Los fluidos de perforación con alta densidad permiten una mejor limpieza del pozo, sin embargo, no se puede exceder debido a que afecta directamente a la presión de la formación impidiendo una correcta operación de perforación [8].

### **1.2.4 Reología**

Estudia los principios físicos que regulan el movimiento y la deformación de la materia cuando se ejercen esfuerzos externos, ayuda controlar la suspensión de sólidos, las caídas de presiones en la sarta y se ajusta con aditivos o dilución [9].

### **1.2.5 Capacidad azul de Metileno**

Determina la concentración total de sólidos reactivos presentes en el fluido [10].

### **1.2.6 Alcalinidad del filtrado**

Tiene la capacidad de determinar la concentración de Cal que es necesaria para retener los gases ácidos que puedan presentarse durante la perforación del pozo [11].

### **1.2.7 Dureza total**

Es una medida de los iones de calcio en un lodo base agua que define la concentración de carbonato de calcio que es la concentración total de todos los cationes y ayudan a evitar alta pérdida de fluido, mal revoque y floculaciones de contenido de arcilla [12].

### **1.2.8 Contenido de sólidos**

Nos indica la cantidad de proporción de porcentaje que tiene un fluido de perforación entre líquidos y sólidos, que ayuda a que el fluido de perforación tenga un buen rendimiento, siendo relativamente proporcional a la viscosidad [13].

## **1.3 Fitorremediación**

Es una tecnología que se basa en la implementación de plantas para reducir la concentración de contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua, suelo y aire a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas asociados a la capacidad de sus raíces que conducen a la reducción, mineralización, degradación, volatilización y estabilización de los diversos tipos de contaminantes [14].

La fitorremediación en la actualidad por la falta de conocimientos no es una tecnología disponible de forma comercial, debido a que los progresos en el campo son limitados por la complejidad de los mecanismos de las plantas hiperacumuladoras que disminuyen la concentración de metales pesados [14].

### **1.3.1 *Procesos de fitorremediación***

**Fitoextracción:** Se basa en el uso de plantas para degradar contaminantes orgánicos como hidrocarburos, compuestos clorados, insecticidas, fungicidas explosivos y detergentes por medio de reacciones enzimáticas que lleva a cabo la planta en la zona del suelo donde se encuentran sus raíces [15].

**Fitoestimulación:** Las plantas por medio de su metabolismo procesan azúcares simples, aminoácidos, compuestos alifáticos y aromáticos, nutrientes, enzimas y oxígeno que se transportan hasta sus raíces estimulando el crecimiento de microorganismos que degradan contaminantes orgánicos [15].

**Fitovolatilización:** Las plantas son capaces de absorber los contaminantes, metabolizarlos y transportarlos desde sus raíces hasta la parte superior y liberarlos a la atmósfera [15].

Fitoestabilización: La planta desarrolla un denso sistema de raíces limitando la biodisponibilidad de metales por medio de mecanismos de secuestro, lignificación o humidificación, evitando la emigración de los contaminantes [16].

Rizofiltración: Se basa en cultivos hidropónicos en el que se usa plantas terrestres con alta tasa de área superficial para absorber y precipitar metales pesados de aguas residuales contaminadas [16].

#### **1.4 Mecanismos de absorción de metales pesados en las plantas**

«Las plantas asimilan los metales pesados por medio de la forma intercambiable, la cual consiste en que un ion esencial que utiliza la planta es inhibido por otro no esencial que lo sustituya, resisten por medio de dos estrategias, la primera es la evasión en el que la planta tiene la capacidad prevenir altas concentraciones de metales en su organismo, la segunda es en la que tiene un nivel de tolerancia excesiva de metales en su cuerpo.

La planta realiza la absorción de metales pesados en sus raíces por medio de intercambio catiónico, debido posee cargas negativas en sus células, debido a la presencia de grupos carboxilo, que interaccionan con las positivas de los metales pesados, creando un equilibrio dinámico facilitando la entrada hacia el interior celular, una vez adentro los quelantes producidos por planta se encargan de unir los iones metálicos evitando la precipitación de estos compuestos dañinos. Por último, el organismo realiza una detoxificación el cual el complejo ligando- metal se retiene en la vacuola.»[17].

##### **1.4.1 Fitoquelatinas**

Están constituidas por cisteína, el cual enlaza al metal con péptidos. Tiene el rol constitutivo del nivel de tolerancia que tienen las plantas híper acumuladoras [18].

### 1.4.2 Aminoácidos

Histidina: Aminoácido encargado de capturar al metal a través de enlaces de sus grupos carboxilo, importante en la tolerancia de metales pesados de las hiperacumuladoras [18].

Prolina: Funciona como osmolito, supresor de electrones, importante en la ligación de metales [18].

### 1.5 *Brassica juncea*

Es una planta de la familia de las brasicáceas, su tamaño promedio es entre 30 y 100 centímetros, sus flores son en racimos terminales alargados, con pétalos obovados color amarillo y sus semillas de color marrón oscuro.

La planta *Brassica Juncea* es considerada una especie hiperacumuladora que posee una captación sustancial y predominante intracelular en la punta de la raíz, previniendo la erosión del suelo y así evitando la contaminación. La composición química de la *Brassica Juncea* está compuesta por: proteína, grasas glicolípidos, isotiocinatos, minerales, vitaminas y ácido oxálico [18].

**Tabla 1.**

*Taxonomía de la BRASSICA JUNCEA*

Subclase	Familia	Género	Especie
Dicotiledónea	Brassicaceae	Brassica	Brassica Juncea

**Nota.** Esta Tabla muestra la taxonomía de la planta *Brassica Juncea*. Tomado de: D. Larios Cardenas, “Efectos en los Primeros Estadios Fenológicos de la *Brassica Juncea* Cultivado en un Suelo Contaminado por Plomo”, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur [Trabajo de grado]. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.untels.edu.pe//handle/123456789/171> [Acceso: nov.1, 2021].

## 1.6 Metales pesados

Es un elemento químico en el que la densidad supera a  $4 \text{ g/cm}^3$ , en masa y un peso atómico por encima de 20, son considerados tóxicos desde una concentración baja, causando problemas de salud, en esta categoría se encuentran elementos como el aluminio (Al), bario (Ba), berilio (Be), cobalto (Co), cobre (Cu), estaño (Sn), hierro (Fe), manganeso (Mn), **cadmio (Cd)**, mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), **chromo (Cr)**, molibdeno (Mo), níquel (Ni), plata (Ag), selenio (Se), talio (Tl), vanadio (Va), oro (Au) y zinc (Zn) [20].

Existe una cantidad de metales pesados que son esenciales para la naturaleza proporcionando micronutriente, siendo vitales para el desarrollo del ecosistema, tienen un rango de concentraciones que al ser superado, llegan a ser tóxicos y considerados como anómalas, siendo representadas en la **Tabla 2** [21].

### 1.6.1 Contaminación del suelo por metales pesados

El suelo es un recurso natural no renovable, que está formado por materia inorgánica como arena, limo y partículas arcillosas, materia orgánica, agua, gases y organismos vivos, el cual uno de los contaminantes más perjudiciales son las altas concentraciones por metales pesados, son capaces de contaminar el medio ambiente generando efectos negativos sobre la salud humana, migración de especies, cambio de la capacidad productiva del suelo, en los que se encuentran componentes como el arsénico, cadmio, cobalto, cromo, cobre, hierro, mercurio, manganeso, molibdeno, níquel, plomo y zinc [19].

Las principales actividades industriales de contaminación de metales pesados en el suelo son la combustión de carbón, manufactura de hierro, acero y baterías pueden ser fuente de Pb, Ni y V, también la explotación de metales invade las capas del suelo con altas concentraciones de Cu, Cd, Se, Ni, Se, entre otros [21].

**Tabla 2.**

*Rango de concentraciones de metales pesados*

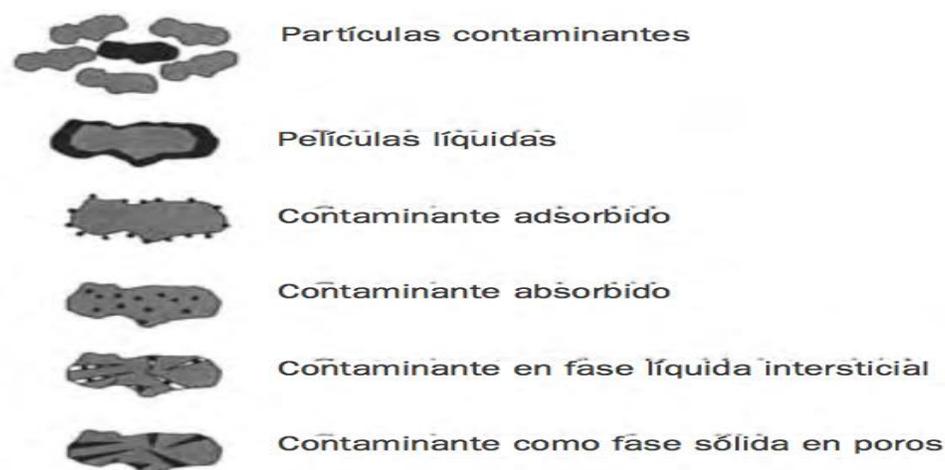
<b>Elemento</b>	<b>Rango normal (ppm)</b>	<b>Concentraciones anómalas (ppm)</b>
As	<5-40	Hasta 2500
Cd	<1-2	Hasta 30
Cu	feb-60	Hasta 2000
Mo	<1-5	10-100
Ni	2-100	Hasta 8000
Pb	10-150	10000 o más
Se	<1-2	hasta 500
Zn	25-200	10000 o más

**Nota.** Esta Tabla muestra concentraciones químicas normales y anómalas de algunos elementos de trazas en el suelo. Tomado de: E. Galán y A. Romero “Contaminación de suelos por metales pesados”, s.f. [En línea]. Disponible: [http://www.ehu.eus/sem/macla\\_pdf/macla10/Macla10\\_48.pdf](http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf). [Acceso: nov.2,2021].

Los contaminantes en el suelo se pueden encontrar en 6 tipos de estados físicos como se muestra en la **Figura 1**.

**Figura 1.**

*Estado físico de los contaminantes*



**Nota.** La Figura muestra los estados físicos de los contaminantes en suelos y sedimentos. Tomado de: E. Galán y A. Romero “Contaminacion de suelos por metales pesados”, s.f. [En línea]. Disponible: [http://www.ehu.eus/sem/macla\\_pdf/macla10/Macla10\\_48.pdf](http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf) [Acceso: nov.2, 2021].

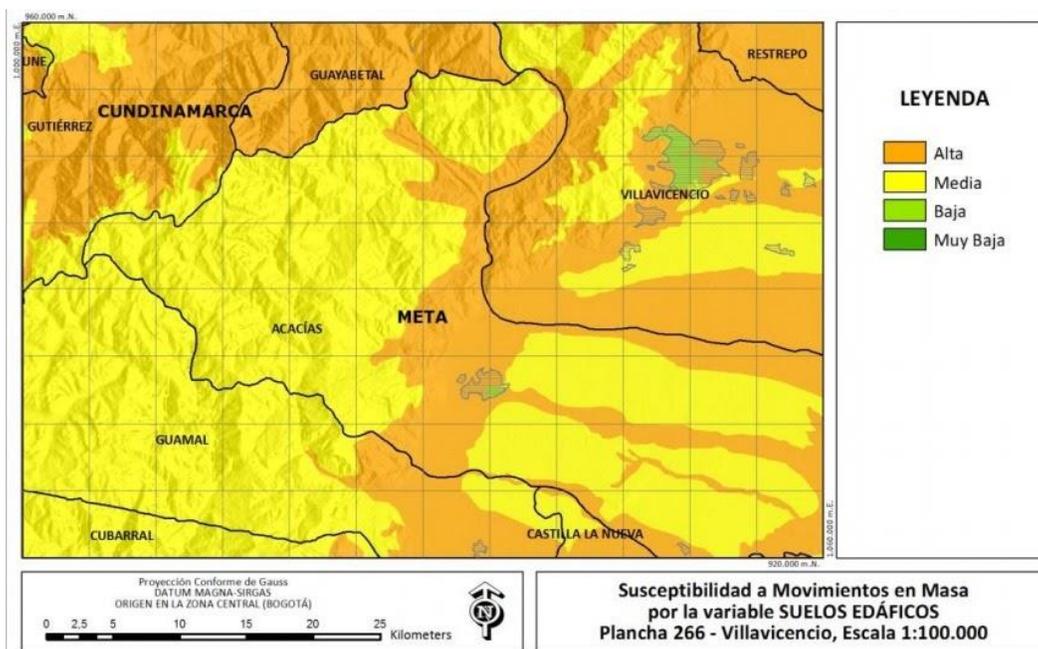
## 1.7 Suelo Guamal Meta

Los suelos de la susceptibilidad media son fundamentalmente entisoles, inceptisoles y oxisoles, en climas húmedos, con gran variedad de arcillas tipo caolinita, illita, muscovita, vermiculita y montmorillonita, texturas predominantemente franco-arenosas y un buen drenaje natural.

La susceptibilidad media se ubica con predominio en la zona central-occidental y suroccidental, perteneciente a los municipios de Acacías, Guamal y Cubarral [22].

**Figura 2.**

*Susceptibilidad por la variable Suelos Edáficos.*



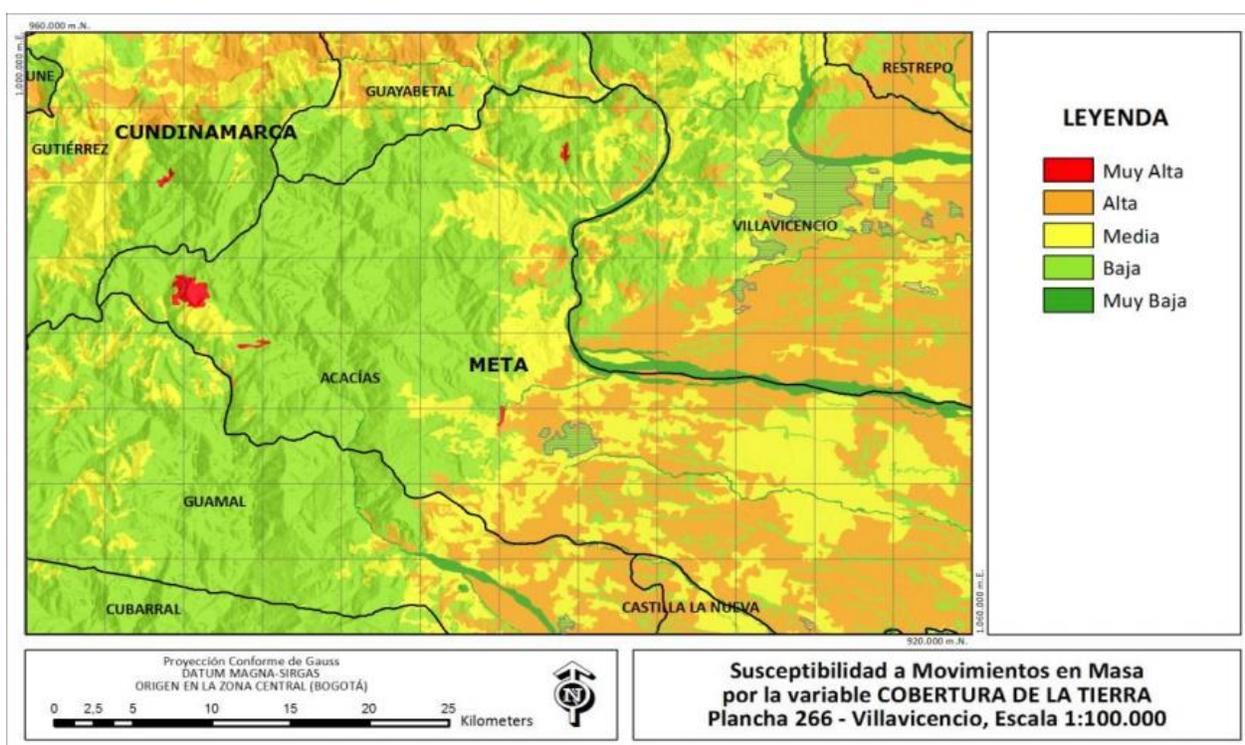
**Nota.** La Figura muestra la susceptibilidad por la variable de suelos edificadas del departamento del Meta. Tomado de "Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM Servicio Geológico Colombiano - SGC GEOLOGIA GUAMAL", [En línea]. Disponible: [http://recordcenter.sgc.gov.co/B22/481\\_17AmeMM266\\_Villavicencio/Documento/Pdf/MemoAme266.pdf](http://recordcenter.sgc.gov.co/B22/481_17AmeMM266_Villavicencio/Documento/Pdf/MemoAme266.pdf) [Acceso: nov.2,2021].

### 1.8 Susceptibilidad por cobertura de la tierra

“La susceptibilidad media está relacionada con coberturas de tipo mosaicos con cultivos, pastos y espacios naturales, cultivos de palma de aceite, bosques fragmentados, arbustales densos y abiertos, algunos herbazales y la vegetación secundaria o en transición”[22], La categoría se distribuye por el sur de Castilla La Nueva y Guamal.

**Figura 3.**

*Mapa de susceptibilidad por la variable Cobertura de la Tierra*



**Nota.** La Figura muestra la susceptibilidad por la variable cobertura de la tierra del departamento del Meta. Tomado de “Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM Servicio Geológico Colombiano - SGC GEOLOGIA GUAMAL”, [En línea]. Disponible: [http://recordcenter.sgc.gov.co/B22/481\\_17AmeMM266\\_Villavicencio/Documento/Pdf/MemoAme266.pdf](http://recordcenter.sgc.gov.co/B22/481_17AmeMM266_Villavicencio/Documento/Pdf/MemoAme266.pdf) [Acceso: nov.2, 2021].

## 2. METODOLOGÍA Y DATOS

### 2.1 Tipo de investigación

Se desarrolló una investigación a escala experimental de la contaminación de un suelo con fluido de perforación con concentración de metales pesados y someterlo a un proceso de fitorremediación e identificar las concentraciones de metales pesados en el suelo antes y después de cumplir con todas las fases del presente piloto.

### 2.2 Métodos de investigación

Se realizó un estudio del suelo contaminado con el fluido de perforación y alta concentración de metales pesados por medio de resultados de laboratorios, identificando las características que tiene el fluido de perforación base agua, determinando la concentración máxima permisible por las normas de Luisiana [23], y garantizar una alta presencia de metales pesados en cada tratamiento, para someter la tierra a un proceso de fitorremediación por medio de la planta *Brassica Juncea* recolectando información en forma de bitácora del comportamiento visual que tuvo la planta durante el tiempo que tardó el tratamiento para estudiar la concentración de metales pesados en el suelo después del proceso de fitorremediación.

### 2.3 Elaboración de un fluido de perforación base agua (Lodo no disperso)

Se elaboró un fluido de perforación base agua con bentonita, benEX, barita y agua determinando las concentraciones para el diseño del fluido de perforación representada en la **Tabla 3**, caracterizando factores como la densidad, viscosidad de embudo, reología, filtrado API, contenido de sólidos, contenido de arena, capacidad de azul de metileno, alcalinidad del lodo, pH, cloruros y dureza total, para determinar el funcionamiento del fluido de perforación al perforar un pozo.

**Tabla 3.**

*Concentraciones y productos en el fluido de perforación*

Bentonita (gr)	BenEX (lpb)	pH	Densificante	Peso (plg)
28	0.02	9.5	Barita	9.5

**Nota.** La Tabla presenta las características y concentraciones para la elaboración del fluido de perforación

### **2.3.1 Pasos para la caracterización del fluido de perforación**

Para caracterizar del fluido de perforación se sigue la metodología brindada por el laboratorio de lodos [24].

- **Paso 1:** Para la elaboración del fluido de perforación se involucraron cinco procedimientos: Determinar las concentraciones y productos que se usarán para la elaboración de un fluido de perforación base agua. Adicionar la concentración de Bentonita, con 700 ml de agua para posteriormente adicionar la concentración de BenEX. Identificar el pH para adicionar soda cáustica hasta obtener un pH de 9.5. Obtener el peso del lodo por medio de una balanza y adicionarle material densificante hasta obtener un peso del lodo de 9.5 lpg.
- **Paso 2:** Se caracteriza el fluido de perforación base agua mediante procesos como pruebas como la densidad, viscosidad, reología, filtrado API, contenido de sólidos, contenido de arena, capacidad de azul de metileno, pH, alcalinidad del lodo, cloruros y dureza total, en los que se siguieron procedimientos como:
  - Medir la viscosidad con el proceso de Viscosidad de Embudo por medio de un embudo Marchal al obstruir la parte inferior del embudo para evitar el derrame, adicionado el fluido de perforaciones al embudo por el filtro para evitar los sólidos renuentes que puedan afectar al tiempo de la prueba y obtener una lectura del tiempo en el proceso.
  - Para determinar la reología se tomó con un viscosímetro de lectura directa el cual consta de un motor eléctrico, vertiendo el fluido en el recipiente de medición el

cual se instala hasta que esté ajustado con la camisa del ratón y la muestra cubra los dos puntos de indicación, calentando el fluido hasta que esté en una lectura de 120 F para poder tomar las muestras y poder tomar las medidas cuando la lectura esté estabilizada a 600 RPM, 300 RPM, 200 RPM, 100 RPM, 6 RPM y 3 RPM.

- Para determinar la resistencia al gel se usa la misma máquina que la reología, agitando la muestra de lodo durante 10 segundos a una revolución de 600 RPM después de 10 segundos se ajusta el viscosímetro a 3 RPM y se registra la máxima lectura.
- Para determinar el contenido de sólidos se usa el equipo de Retorta llenando la celda inferior hasta que se rebose el lodo verificando que el lodo no tenga contenido de aire, colocando una esponja metálica en la celda superior con el objetivo de que cuando se caliente sea fácil poder removerlos y colocar las celdas en el horno junto con una probeta en la salida del condensador y conectar el horno para que se caliente y transcurrido los 30 min determinar la cantidad de ml que se encuentran en la probeta, dando un porcentaje de sólidos, y líquidos.
- Para determinar el contenido de arenas se usa un Tubo Zanahoria graduado que nos da una lectura en porcentaje llenándolo hasta la marca Mud to Here, y agua hasta la marca Water to Here obstruyendo la parte superior del tubo Zanahoria y agitar el Tubo, desocupando el contenido del Tubo por medio de un tamiz y repetir el proceso hasta que el agua del en el Tubo de Zanahoria sea clara, después se coloca el embudo boca a cabo y recolectar la arena que se quedó en el tamiz vertiéndose en el tubo de zanahoria para determinar el contenido de arena.
- Para poder determinar la alcalinidad del lodo considerada como Pm se toma un mililitro de lodo y diluir con agua destilada en un recipiente de titulación. Después se agrega entre 3 a 4 gotas de fenolftaleína y se mezcla hasta que se homogenice y por último se adiciona ácido sulfúrico 0.02N hasta que la mezcla regrese a un color transparente para poder determinar la cantidad de ácido sulfúrico usado Pm.

- Para determinar la alcalinidad del filtrado Pf y Mf usan indicadores como fenolftaleína y naranja de metileno por medio un mililitro de filtrado diluido con agua en el recipiente de titulación, después se adiciona de 2 a 3 gotas de fenolftaleína y se agita hasta que se homogenice generando un color rosado luego se adiciona ácido sulfúrico hasta que desapareció el color rosado de la muestra y se repite el proceso para el naranja de metileno.
- Para determinar cloruros realizar una titulación donde el indicador era cromato de potasio y como titulador nitrato de plata, tomando un ml de filtrado y diluido con agua destilada en un recipiente de titulación para adicionar de 2 a 3 gotas de cromato de potasio y agitarlo hasta que se homogenice, después se agrega nitrato de plata hasta que el color amarillo se vuelva color rojo.
- Para determinar el calcio específico se usa un indicador de calcio y un titulador EDTA 0.02N, tomando un mililitro del filtrado y un mililitro de solución Buffer de Dureza junto con una cucharada de indicador de calcio específico, después agitarlo hasta que se homogenice dándonos un color rosado y adicionar titulante EDTA hasta que el color rosado se vuelva morado.
- Para determinar la dureza total se realiza una titulación usando indicador de dureza y como titulador EDTA, Tomando un ml de filtrado y adicionar un ml de solución estabilizadora en un recipiente de titulación, después se agrega una cucharada de indicador de dureza y agitar hasta homogeneizar y finalmente agregar EDTA 0.02 N hasta que el color morado se vuelva color azul.

#### **2.4 Metales pesados cadmio (Cd) y cromo (Cr) en el fluido de perforación**

Para poder determinar la concentración que se debe adicionar al fluido de perforación para contaminarlo con alto contenido de metales pesados se tomó en cuenta las normas de concentración de metales pesados máximas permisibles por LUISIANA [23], representados en la **Tabla 4**.

La cantidad de óxido de cromo y óxido de cadmio que se utiliza para contaminar el fluido de perforación de 650 ml, es medido con respecto a la cantidad de tierra en el recipiente que es 2.6 kg.

**Tabla 4.**

*Concentración máxima permisible de metales pesados*

Parámetros	Limite (ppm)
Arsénico	10
Bario	-
zona de humedales sumergidos	20.000
Área de humedales elevados	20.000
Zona de tierras	40
Cadmio	10
Cromo	500
Mercurio	10
Selenio	10
Plata	200
Zinc	500

**Nota.** La Tabla presenta concentración máxima permisible de los metales pesados en el suelo. Tomado de: NATURAL RESOURCES Louisiana Administrative Code December 2005 i, Part XIX. Office of Conservation—General Operations [PDF]

Para aumentar la concentración de metales pesados en el suelo y cumpla con las características de tener alto contenido de metal pesado se debe pasar la norma máxima permisible de 10 ppm para el cadmio (Cd) y 500 ppm para el cromo (Cr) representados en la **Tabla 4**, realizando una variación en las concentraciones de los dos metales pesados que se van a analizar, contaminando dos muestras con 0.06 gr de óxido de cadmio y 1.63 gr de óxido de cromo VI, las cuales son denominadas como el nivel 1 del tratamiento como se evidencia en la **Figura 4**.

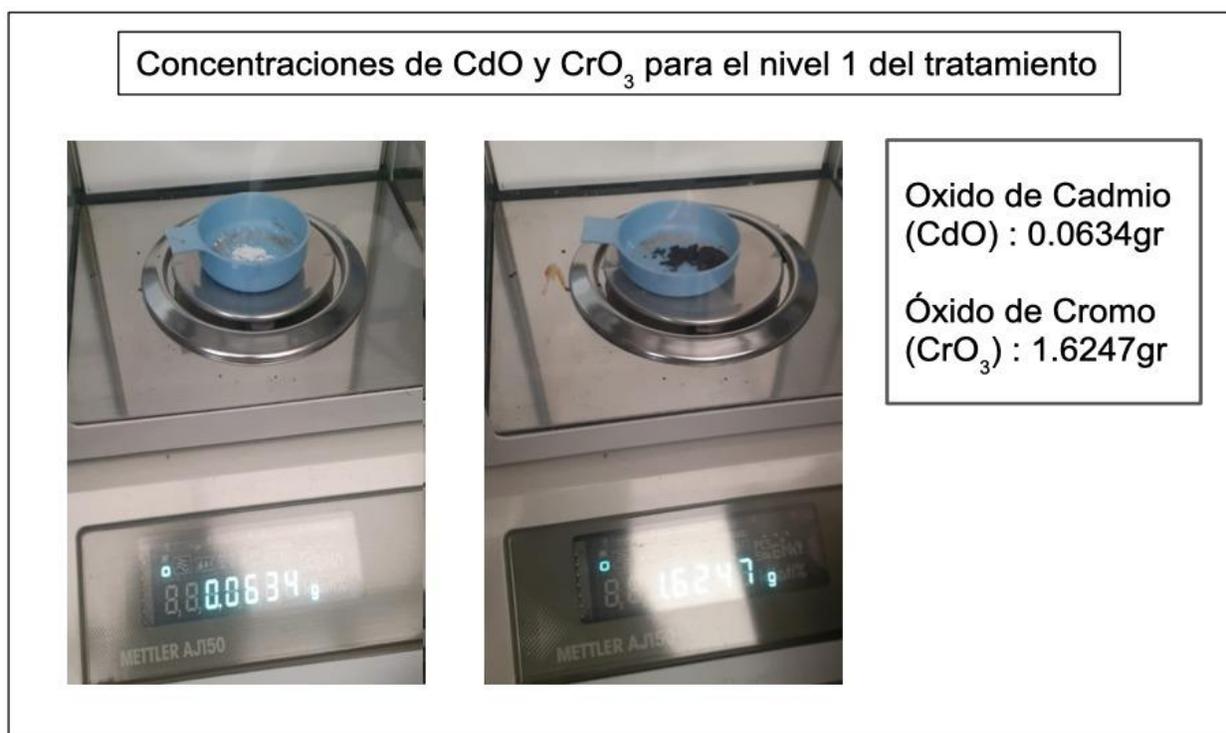
La concentración máxima permisible de cromo según la norma Luisiana [23], es igual a 500 ppm, lo que equivale a 0.5 gr/kg de suelo, teniendo en cuenta que la concentración total de tierra es igual 16 kg, la cual se dividirá en 6 muestras, dando un resultado de 2.6 kg a de tierra por cada muestra, en el que la concentración máxima permisible es de 1.3

gr de cromo para cada muestra. Para efectos de esta investigación fue necesario incrementar este valor en un 20% para genera un margen de contaminación alto, manejando 1.62 gr de Cromo.

La concentración máxima permisible de cadmio según la norma Luisiana [23], es igual a 10 ppm, lo que equivale a 0.01 gr/kg de suelo, teniendo en cuenta que la concentración total de tierra es igual 16 kg, la cual se dividirá en 6 muestras, dando un resultado de 2.6 kg a de tierra por cada muestra, en el que la concentración máxima permisible es de 0.026 gr de cadmio para cada muestra. Para efectos de esta investigación fue necesario incrementar este valor en más del doble de la norma permitida para genera un margen de contaminación más alto, manejando 0.06 gr de cadmio.

**Figura 4.**

*Cantidad de CdO y CrO<sub>3</sub>, para contaminar cada muestra del nivel 1 del tratamiento*

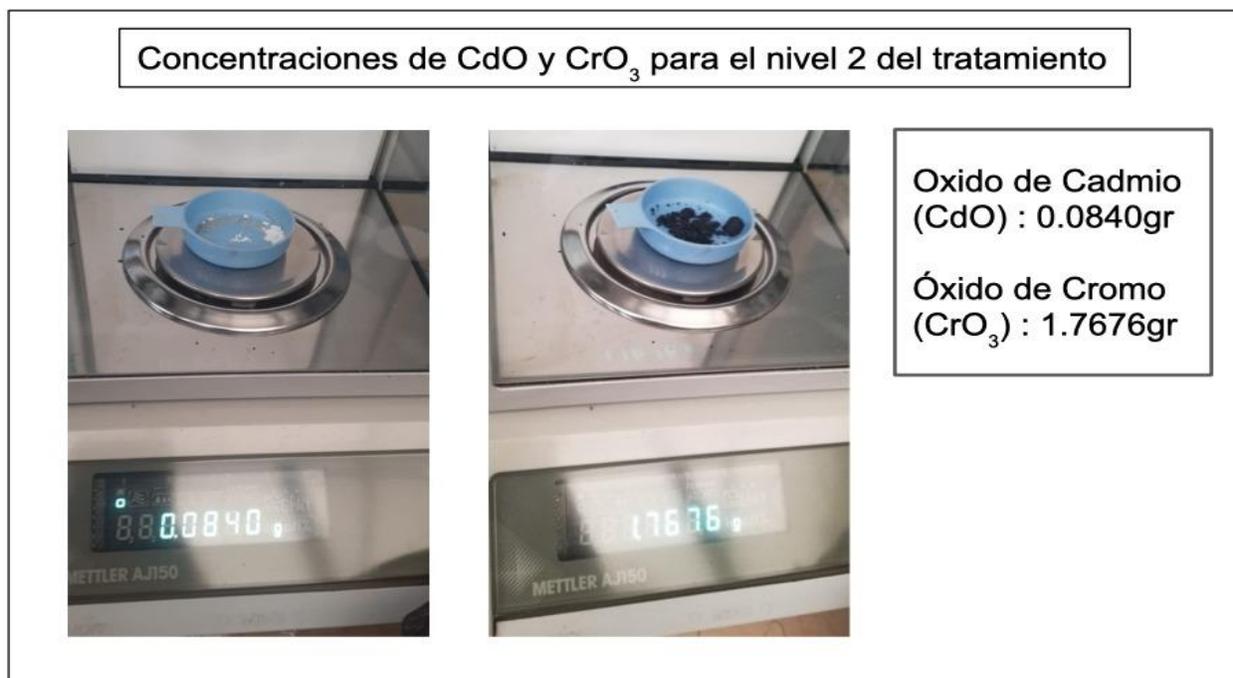


**Nota.** La Figura demuestra la cantidad de Oxido de Cromo (CrO<sub>3</sub>) y de Óxido de cadmio (Cd) utilizados en las muestras de nivel 1 del tratamiento

Para obtener una variación en la concentración de metales pesados se varía la cantidad de óxido de cadmio (Cd) adicionado al fluido de perforación a 0.08 gr, cambiando también la cantidad de óxido de cromo vi a 1.76 gr, siendo denominadas las muestras con esta concentración de metales pesados como nivel 2 del tratamiento, como se puede evidenciar en la **Figura 5**.

**Figura 5.**

*Cantidad de CdO y CrO<sub>3</sub>, para contaminar cada muestra del nivel 2 del tratamiento*



**Nota.** La Figura demuestra la cantidad de óxido de cromo (CrO<sub>3</sub>) y de óxido de cadmio (Cd) utilizados en las muestras de nivel 2 del tratamiento.

Para determinar que la planta es capaz de crecer en el suelo proveniente del Guamal, Meta se tiene dos muestras sin contaminar denominadas como (P3.1 y P3.2), en los que no se le adicionara ningún contaminante.

## 2.5 Características del suelo

Para la caracterización del suelo que será sometido a un proceso de fitorremediación es necesario determinar la ubicación, textura y concentración de metales pesados presentes en el suelo sin contaminar para determinar si hay concentración de metales

pesados en el suelo, determinando una adaptabilidad óptima en la planta al ser trasplantada en el suelo.

### 2.5.1 Ubicación geográfica del suelo

Se identifica la posición del tipo de suelo franco en el municipio de Guamal, debido a que la planta tiene un buen proceso de adaptación en este tipo de suelo [22], por lo que se realizó una expedición a la parte sur del municipio de Guamal meta ubicada cerca del río de Guamal como se puede evidenciar en la **Figura 6**, con coordenadas de 3°52'25.56" N 73°46'23.66" O.

**Figura 6.**

*Coordenadas toma de muestras del suelo*



**Nota:** La Figura representa las coordenadas 3°52'25.56" N 73°46'23.66" O Guamal, Meta de la toma de muestra del suelo. Tomado de: "Fotos capturadas por medio de la aplicación Google Earth 2013".

### 2.5.2 Pasos para la extracción del suelo

Para poder obtener el suelo ubicado en la zona de interés se realizaron procedimientos y mediciones de la concentración de suelo que se evaluará, por medio del seguimiento de los siguientes pasos.

- **Paso 1:** Para determinar la ubicación de suelo que se desea extraer del lugar de interés se cumplen con tres procedimientos: Localizar la muestra de manera aleatoria dentro del área de estudio. Eliminar la superficie del suelo incluyendo factores como la vegetación. El muestreo se debe realizar por muestra simple.
- **Paso 2:** Para la extracción del suelo se cavó con una pala hasta 15 cm de profundidad y para poder empezar a recolectar la muestra de suelo hasta tener 16 kg y almacenarlos en un balde limpio

**Figura 7.**

*Toma de muestra de suelo*



**Nota.** La Figura representa la toma de muestra del suelo.

### **2.5.3 Entorno de las muestras de suelo**

Se adquirieron 6 macetas con dimensiones de 22.5 cm de largo, 18 cm de diámetro superior y 10 cm de diámetro inferior, siendo divididas por colores para cada tipo de muestra, en el que se va a realizar una simulación de contaminación con el fluido de perforación con contenido de metales pesados.

- **Macetas grises:** Son el primer nivel de las muestras, en las que se utilizaron 0.06 gr de óxido de cadmio y 1.63 gr de óxido de cromo 6 para contaminar el fluido de perforación utilizado en cada muestra, las cuales son denominadas como el nivel 1 del tratamiento y son representadas como P1.1 y P1.2.
- **Macetas naranjas:** Son el segundo nivel de las muestras, en las que se utilizaron 0.08 gr de óxido de cadmio y 1.76 gr de óxido de cromo 6 para contaminar el fluido de perforación utilizado en cada muestra, las cuales son denominadas como el nivel 2 del tratamiento y son representadas como P2.1 y P2.2.
- **Macetas negras:** Son las muestras sin contaminar, que solo tiene 2.6 Kg de tierra proveniente del municipio de Guamal Meta, las cuales son denominadas como el suelo sin contaminar y son representadas como P3.1 y P3.2.

### **2.5.4 Textura del suelo**

Se realiza una caracterización de las concentraciones porcentuales con respecto a la formación del suelo evaluado, y saber el comportamiento de los parámetros que se controlarán en el mismo, como el crecimiento de la planta y la concentración de metales pesados contenido en el fluido de perforación, por lo que para lograr la caracterización se siguieron los procedimientos al tomar 500 gr del suelo y determinar la textura por medio del método de Bouyoucos según el libro métodos analíticos del laboratorio de suelos. [25], el cual brinda los siguientes pasos a seguir para poder determinar la textura del suelo.

- Paso 1:** Para realizar este proceso se deben seguir ocho procedimientos: Se debe secar la muestra a temperatura ambiente y tamizar con una malla que tenga 2 mm de abertura. Se pesan 50 g de muestra el cual se pasa a un frasco tetero de 8 oz adicionando agua sin destilar hasta completar dos tercios del frasco. En un balón aforado de 1 L, se agregan 35.7 gr de hexametafosfato de sodio, 7.94 gr de carbonato de sodio, con constante y con agua se completa el volumen de 1 L. Se agregan 10 ml de la solución anteriormente descrita al frasco tetero, se cierra el frasco y con un agitador recíproco agitar por 2 horas. En un cilindro aforado de 1 L se vierte la muestra y se agrega agua hasta completar el volumen de 1 L, durante 30 s se agitó la suspensión con un agitador manual. Retirar el agitador, anotar el tiempo de inicio y poner el hidrómetro en la suspensión evitando el contacto con las paredes del cilindro (Si se forma espuma agregar un poco de alcohol etílico para eliminarlas), se tomó la lectura del menisco superior del hidrómetro a los 40 s. Durante 2 horas dejar en reposo la suspensión, luego de pasar las 2 horas se coloca el hidrómetro en la suspensión, y toma la lectura por último Lavar y Secar los equipos.
- Paso 2:** Para determinar el porcentaje de arena, limo y arcilla se realizó el siguiente procedimiento.

Determinación de porcentaje de Arena, Arcilla y Limo.

**Ecuación 1.**

$$\% \text{ Arena } (2 \text{ a } 0.05\text{mm}) = \frac{100 - \text{lectura a los } 40 \text{ s } (100 + pw)}{50 \text{ gr}}$$

**Ecuación 2.**

$$\% \text{ Arcilla } (< 0,002) = \frac{\text{Lectura a las } 2 \text{ h } (100 + pw)}{50 \text{ gr}}$$

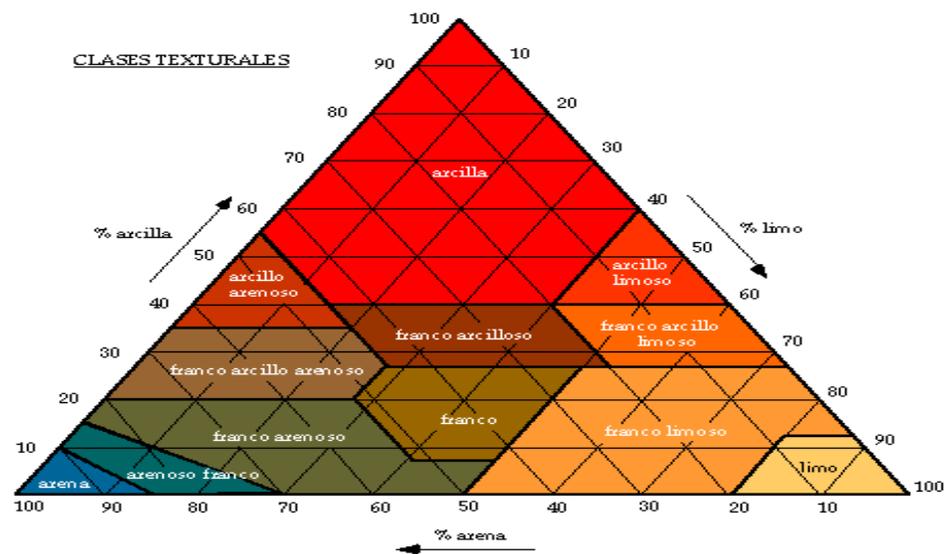
**Ecuación 3.**

$$\% \text{ Limo } (0,05 \text{ a } 0,002\text{mm}) = 100 - (\% \text{ arena } + \% \text{ arcilla})$$

- **Paso 3:** Para determinar la clase textural del suelo, con los porcentajes ya calculados se utilizó el triángulo textural representado en la **Figura 8**.

**Figura 8.**

*Triángulo textural*



**Nota.** La Figura representa el triángulo textural. Tomado de triangulo-textural-  
USDA [EnLinea]. Disponible: <https://es.scribd.com/document/493672443/377541256-Triangulo-Textural-USDA> [Acceso: Nov. 1, 2021].

### 2.5.5 Caracterización de cadmio (Cd) y Cromo (Cr) en el suelo

Para poder determinar la cantidad de cadmio (Cd) y de cromo (Cr) presentes en el suelo sin contaminar se siguieron los pasos del método digestión HF en frío- cuantificación absorción atómica según la metodología del libro Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos [25].

- **Paso 1:** Secar la muestra de suelo a temperatura ambiente para tamizar la muestra con una malla que tenga 2 mm de abertura, ya para el proceso de digestión con HF en frío, pesar 0.1 gr de muestra y colocarlo en un frasco de polietileno de 250 ml.

- **Paso 2:** Llevar una muestra del control y blanco de proceso, en la cámara de extracción agregando 3 ml de ácido fluorhídrico en el que simultáneamente se tiene un blanco de reactivos, cubrir herméticamente el frasco y agitar con cuidado, dejar en reposo la muestra durante 24 horas, después preparar una solución saturada de ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) en agua destilada, adicionando 25.3 gr de cloruro de cesio ( $CsCl$ ) agitando bien hasta que se disuelva, agregando 50 ml de la solución  $H_3BO_3$ - $CsCl$  y agitar de nuevo, esperar 1 hora para que reaccione, luego Agregar 47 ml de agua destilada, cubrir y agitar.
- **Paso 3:** Realizar el proceso de filtración en un envase plástico de 100 ml con papel filtro para posteriormente cuantificar los metales cadmio (Cd) y cromo (Cr) en el espectrofotómetro de absorción atómica.

### **2.5.6 pH**

Para determinar el pH se realizó por medio del pH metro el cual se hizo relación 2:2, Pesar 2 g de suelo Muestra de suelo y colocarlo en un vaso precipitado de 25 ml, Agregar 20 ml de agua destilada, Agitar y dejar reposar 10 minutos y Medir pH con el potenciómetro.

## **2.6 Contaminación del suelo**

Para la contaminación del suelo se tiene en cuenta la concentración de metales pesados presentes en el fluido de perforación base agua, junto con las características sedimentarias del fluido de perforación.

Para contaminar el suelo se tomó en cuenta la norma de Luisiana [23], el cual brinda la concentración máxima permisible de metales pesados, constando el cadmio de 10 ppm y el cromo de 500 ppm, por lo que se le adiciona el fluido de perforación contaminado con los metales pesados, siguiendo las observaciones para la contaminación.

- **Observación 1:** Para el nivel uno de la muestra se tuvo como objetivo duplicar la concentración máxima permisible de cadmio con 20 ppm y llegar a la concentración máxima de cromo que consta de 500 ppm, este procedimiento se hizo para dos muestras de suelo y poder tener una réplica con el fin de determinar la exactitud de los resultados.
- **Observación 2:** Para el nivel dos, se varió la concentración de cadmio y cromo presentes en la muestra uno, aumentando una concentración del 25% para el cadmio y un 15% para el cromo, este procedimiento se hizo para dos muestras de suelo y poder tener una réplica con el fin de determinar la exactitud de los resultados.

### **2.6.1 Procedimiento para contaminar el suelo**

Para la contaminación del suelo con el fluido de perforación se siguieron 4 procedimientos:

- **Paso 1:** Se dividió el fluido de perforación base agua en 4 recipientes, llenándolos con 650 mililitros de lodo y poder contaminar cada uno con la concentración determinada de contaminantes para cada nivel.
- **Paso 2:** En el nivel uno se tomaron los dos recipientes de 650 mililitros de fluido de perforación base agua y a cada uno se le agregó 0.0634 gr de cadmio y 1.624 gr de cromo.
- **Paso 3:** En el segundo nivel se tomaron los dos recipientes de 650 mililitros de fluido de perforación base agua y a cada uno se le agregó 0.084 gr de cadmio y 1.76 gr de cromo
- **Paso 4:** Se pesaron 2.6 Kg de suelo para cada una de las macetas, el cual fue mezclada cada uno por individual con 650 ml de fluido de perforación contaminado, de cada maceta se tomaron 500 gr de suelo para realizar los respectivos análisis de

suelo contaminado para poder obtener una caracterización, sometiéndose a las mismas pruebas de concentraciones de cadmio total y cromo total en el suelo no contaminado.

## **2.7 Proceso de Fitorremediación en el suelo contaminado**

Se obtuvieron plantas *Brassica Juncea* con una edad de vida de 20 días en el cual ya cumplía con los parámetros mínimos para poder soportar el tratamiento de fitorremediación con 25 días de duración.

### **2.7.1 Seguimiento del proceso de fitorremediación**

Se realiza un seguimiento del comportamiento de la planta durante el proceso, recolectando información en forma de bitácora del comportamiento visual que tuvo la planta durante el tiempo que tardó el tratamiento. Teniendo en cuenta los siguientes pasos

- **Paso 1:** Se trasplantaron 6 plántulas en 6 macetas diferentes, cada maceta con una plántula, de las cuales 4 macetas estaban con tierra contaminada y dos estaban con tierra fértil.
- **Paso 2:** Para hacer un seguimiento de la adaptación de la planta se realizó un reporte visual cada 3 días en el que se observan características como el tallo, las hojas, el color y la inclinación de cada una de las plantas hasta completar los 20 días de ser plantadas, registrando 7 reportes por cada tratamiento, también se hizo un seguimiento diario en el que se registró la humedad y la luminosidad con el equipo Three Way Meter Soil Tester el cual consiste de dos sondas, que al introducirse en la tierra mide la humedad y un sensor de luz en la parte superior para la luminosidad.

## **2.8 Comparación del suelo después del tratamiento**

Para la caracterización del suelo después del proceso de fitorremediación, se analizó el contenido de cadmio (Cd) y de cromo (Cr) en el suelo de cada uno de los tratamientos contaminados (F1.1, F1.2, F2.1 y F2.2), los cuales se realizaron por el método digestión HF en frío- cuantificación absorción atómica según el libro métodos analíticos del laboratorio de suelos. [25], Siguiendo los mismos pasos que la Caracterización de cadmio (Cd) y cromo (Cr) en los suelos contaminados y suelo sin contaminar, comparando también las lecturas de pH del suelo contaminado (P1.1, P1.2, P2.1 y P2.2) con las lecturas obtenidas del suelo después del proceso de fitorremediación (F1.1, F1.2, F2.1 y F2.2) para determinar el cambio en su categoría antes y después del tratamiento.

- F1.1 : es la muestra representada como P1.1 después del proceso de fitorremediación
- F1.2 : es la muestra representada como P1.2 después del proceso de fitorremediación
- F2.1 : es la muestra representada como P2.1 después del proceso de fitorremediación
- F2.2 : es la muestra representada como P2.2 después del proceso de fitorremediación

### **2.8.1 Contenido de metal pesado**

Para determinar el cambio de las concentraciones de cadmio (Cd) y de cromo (Cr), se realizó un análisis de los resultados obtenidos en los tratamientos contaminados, comparándolos con las concentraciones de cadmio (Cd) y cromo (Cr) en los suelos contaminados antes y después del proceso de fitorremediación.

### **2.8.2 pH en el suelo**

Para identificar si hubo un cambio en el pH después del proceso de fitorremediación (F1.1, F1.2, F2.1 y F2.2), es necesario compararlo con las lecturas obtenidas en el suelo contaminado antes de ser sometido al proceso (P1.1, P1.2, P2.1 y P2.2), y determinar si tuvo una tendencia a convertirse en ácido o básico.

### **2.8.3 Diseño experimental**

Para analizar los resultados del experimento, se plantearon dos diseños experimentales, uno para el cadmio (Cd) y el otro para el cromo (Cr), que constan de un factor y dos niveles cada uno, en el cual se tiene como factor la concentración de metales pesados presentes en el suelo, antes y después del proceso de fitorremediación, en el que los dos niveles constan de la variación de la concentración de los contaminantes, teniendo una diferencia en el segundo nivel con un 32 % más de cadmio (Cd) y un 8.3 % más de cromo (Cr) que en el primer nivel.

- **Diseño experimental (Cd):**

Nivel 1: Antes del proceso de fitorremediación (P1.1, P2.1), después del proceso de fitorremediación (F1.1, F2.1).

Nivel 2: Antes del proceso de fitorremediación (P1.2, P2.2), después del proceso de fitorremediación (F1.2, F2.2).

- **Diseño experimental (Cr):**

Nivel 1: Antes del proceso de fitorremediación (P1.1, P2.1), después del proceso de fitorremediación (F1.1, F2.1).

Nivel 2: Antes del proceso de fitorremediación (P1.2, P2.2), después del proceso de fitorremediación (F1.2, F2.2).

### 3. RESULTADOS, ANÁLISIS

**Tabla 5.**

*Resultados del fluido de perforación*

Tipo de lodo	base agua	pH	10.5
Densidad (lpg)	9.6	Pm (cc/cc)	0.3
Temperatura (°F)	120	Pf / Mf	0.25 / 0.2
Ø600/Ø300	28/17	Cl-(mg/L)	150
Ø200/Ø100	13/12	DT/Ca++ (mg/L)	236
Ø6/Ø3	5/4	MBT (lb/bbl eq)	15
PV (cP)	11	Filtrado API (cc/30 min)	69/30
Yp (lb/100ft <sup>2</sup> )	6	Agua (%)	96 %
Resistencia gel (lb/100ft <sup>2</sup> )	4	Sólidos (%)	0 %
Viscosidad embudo (seg)	54.32	Aceite/Lubricante (%)	0 %

**Nota.** Esta Tabla muestra los resultados de los análisis del fluido de perforación

- **Densidad:** La densidad del lodo base agua (no disperso) es mayor al promedio (8.4 - 8.5) al adicionar el material densificante como la barita, dando un resultado final de 9.6 lpg dando a entender la existencia de exceso de sólidos en el fluido de perforación.
- **Viscosidad embudo:** La Viscosidad de embudo se encuentra ligeramente por encima del rango que oscila entre los 40 - 45 segundos, dando una lectura de 54.32 que se interpreta como una dificultad para que el lodo pueda ser bombeable [26]
- **Reología:** Determinar la viscosidad del lodo mediante dos resultados, siendo el primero la viscosidad plástica (VP), el cual es relativo a la concentración de sólidos que hay en el fluido de perforación, siendo relevante para alcanzar altos promedios en la penetración de la formación, y el segundo es el punto cedente (YP), el cual es consecuente con la capacidad de limpieza del fluido en condiciones dinámicas,

igualmente reflejado en la relación de sólidos, dando un resultado de 6 lb/100 ft<sup>2</sup>, estando en el rango establecido (5-20), el cual tiene una baja probabilidad a formar floculaciones en el lodo [27].

- **pH:** Al medir el pH del fluido de perforación indicó un valor de 10.5, lo cual es favorable para la estabilidad del lodo debido a que interviene en el comportamiento de las arcillas, para que tengan cargas negativas haciendo que las interacciones electrostáticas sean mínimas, y no haya cercanía entre cara y borde evitando un taponamiento [28].
- **Resistencia en gel:** Nos permite conocer el cambio de viscosidad que tiene el fluido con respecto al tiempo, el cual dio un valor de 4 en 10 segundos estando dentro del rango apropiado de 3 - 9 [4], siendo importante para que genere buen rendimiento en las bombas, y mitigue el efecto de succión por la tubería [26].
- **Contenido de arena:** Es óptimo que el porcentaje de arena sea bajo, para evitar abrasión en los equipos, desgaste en las tuberías y bombas, el cual dio un valor de 2 % adecuado para que el proceso sea eficaz y no genere retrasos por daños [26].
- **Filtrado API:** Se usa para determinar la resistencia interna que tiene el fluido para poder fluir, estando determinado por dos factores, el revoque del cual tenemos una medida de 0.6 cm, siendo un revoque por encima de los parámetros óptimos (0.07 cm) lo que se interpreta como una alta probabilidad de que el fluido pueda obturar formaciones permeables, y el segundo en la cantidad total de fluido que se perdió, teniendo un valor de 69 ml en un transcurso de 30 minutos lo que nos da a entender que es necesario un controlador de filtrado.
- **Contenido de sólidos:** Debido a la importancia de que el fluido de perforación no cambie las propiedades de sólidos entre las concentraciones que tiene y las que hay en la perforación es necesario mantener este porcentaje controlado, el cual nos dio

un porcentaje de 96 % del cual no representa ningún sólido por lo que se le considera como un rango óptimo [26].

### 3.1 Parámetros a evaluar en el suelo

#### 3.1.1 Textura del suelo proveniente de Guamal Meta

En el análisis para la determinación de textura de suelo se identificó un 42.7 % de arena, 24.6 % de limo y 32.7 % de arcilla como se muestra en la **Tabla 6**, el cual con el triángulo textural de la **Figura 8**, dio como resultado que es un suelo franco arcilloso es decir que es un tipo de suelo pesado, en el que su estructura se suele presentar en forma de bloques con espacios porosos, tiene una permeabilidad moderadamente lenta lo que ocasiona que retenga muy bien los fluidos, al humedecerse su consistencia es adherente y plástica [29]; favoreciendo a la bentonita que se encuentra en el fluido de perforación a ocupar los espacios porosos presentes en la tierra

**Tabla 6.**

*Porcentaje de arena, limo y arcilla del suelo*

Gravas (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural
0.0	42.7	24.6	32.7	F Ar

**Nota.** La Tabla representa la proporción de arena, limo y arcilla para determinar la textura del suelo.

Para la Textura obtenida del municipio de Guamal Meta representado en la **Tabla 6**, debido a que es un suelo franco arcilloso la planta tiene registros de una óptima adaptación en este tipo de suelos, por lo que la textura del suelo no tendría una afectación negativa lo bastante relevante para evitar el desarrollo de la planta en los tratamientos [41].

**Tabla 7.**

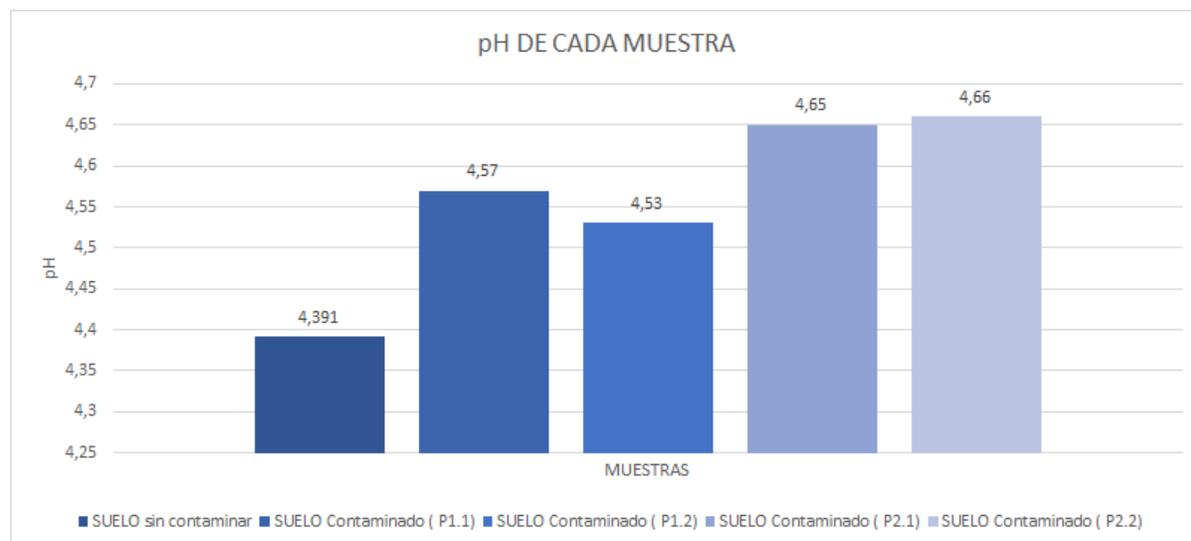
*Resultados de suelo, pH, cadmio total, cromo total.*

Características	SUELO sin contaminar	SUELO Contaminado ( P1.1)	SUELO Contaminado ( P1.2)	SUELO Contaminado ( P2.1)	SUELO Contaminado ( P2.2)
pH	4.39	4.57	4.53	4.65	4.66
Cd total mg/kg	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Cr total mg/kg	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02

**Nota.** La Tabla representa la lectura obtenida de pH junto con la concentración de cadmio (Cd) total y cromo (Cr) total presente en el suelo sin contaminar y en cada una de las muestras contaminadas

**Figura 9.**

*Figura de la escala de los pH en cada una de las muestras analizadas*



**Nota.** La Figura representa la lectura obtenida de pH, en el suelo sin contaminar y en cada una de las muestras contaminadas

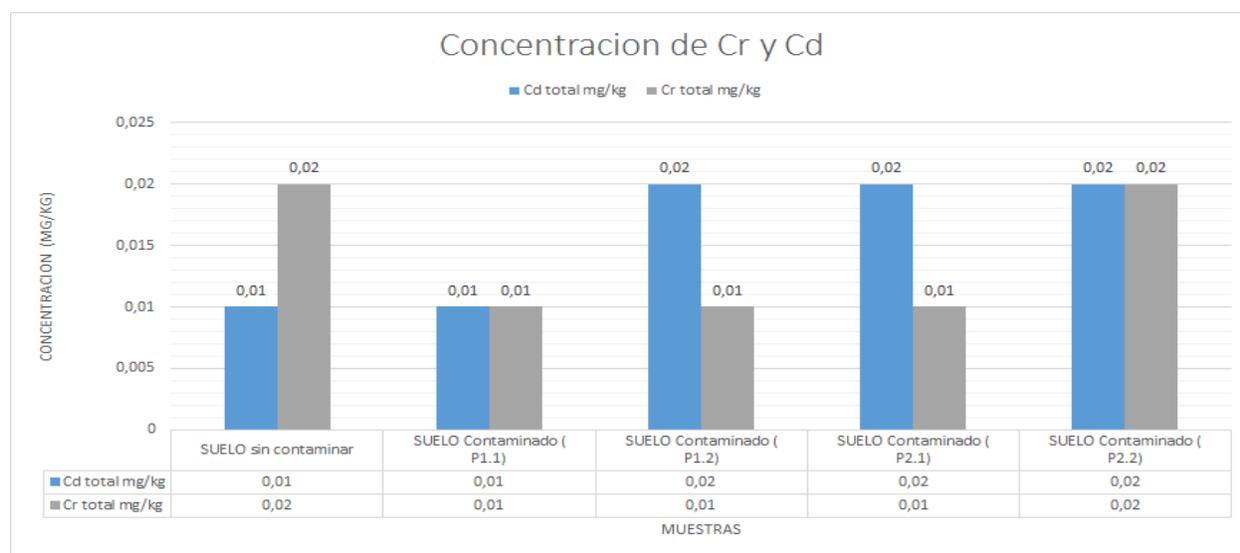
Como se muestra en la **Figura 9** indica una lectura de pH por debajo de 4.5 lo que equivale a un pH con características extremadamente ácidas en el suelo sin contaminar dando una lectura de 4.39, en el cual los metales pesados tienden a estar más disponibles debido a la acidez del suelo, afectando también a las raíces de las plantas [30].

El bajo pH que se evidencia en los resultados obtenidos de la muestra P1.1, P1.2, P2.1, y P2.2 representados en la **Figura 9**, muestran estar en un rango de 4.53 a 4.66, estando dentro del rango de pH de 4.5 a 5.5, el cual es catalogado como extremadamente ácido, en este tipo de suelos el cadmio es móvil por lo que los metales pesados se trasladan de un punto a otro en el recipiente que los contiene, y pueden ser absorbidos por la planta con mayor facilidad a comparación de estar en un suelo alcalino [30], [31]. Por otra parte, el pH afecta directamente al cromo al estar en una muestra por debajo de 5.5 siendo catalogado como fuertemente ácido, y de igual manera tiene una alta tendencia a ser móvil y precipitarse en el recipiente [30].

Debido a que se usó óxido de cromo ( $\text{CrO}_3$ ) y óxido de cadmio (Cd) se tiene registros que los óxidos tienen poca relevancia con respecto a otros metales pesados en suelos ácidos [30], siendo afectada la absorción por un aumento en el pH, la cual disminuye proporcionalmente, dando como resultado un análisis en el que se refleja un aumento de la lectura de pH siendo más fácil la transferencia del cromo presente en el suelo a organismos como plantas y lodos [32].

**Figura 10.**

*Figura de la concentración de cadmio (Cd) y cromo (Cr), en las muestras*



**Nota.** La Figura representa la concentración de cadmio (Cd) TOTAL y cromo (Cr) TOTAL presente en la muestra sin contaminar y en las muestras contaminadas.

Se puede evidenciar en la **Figura 10** los resultados obtenidos por el laboratorio de suelos del INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC), los cuales presentan una baja concentración de los metales pesados de cadmio (Cd) y Cromo (Cr) en mg/kg, objetando la cantidad de gramos agregados en cada una de las muestras contaminadas en la metodología.

La presencia de la bentonita que se encuentra en el fluido de perforación proporcionando un encapsulamiento de las concentraciones de metales pesados como el cadmio (Cd) y el cromo (Cr), más el contenido en arcilla presente en la tierra por lo que tiene la capacidad de hinchamiento el cual es causado porque las arcillas forman un enlace covalente generando un intercambio de iones y precipitación superficial [33], [34]. Que proporcionan una zona permeable por el cual fluye el fluido con contenido de metales pesados, los que tienen den a precipitarse en el fondo del recipiente que los contiene.

Debido al contenido de arcilla presente en el suelo y la Bentonita en el fluido de perforación las partículas de metales pesados son acumuladas en los bordes y las capas, según la fuerza iónica, el pH y los aniones presentes en la solución. [33], [35] dando como resultado una variación en la concentración y ubicación de los metales pesados en el recipiente, en el caso de las 4 muestras contaminadas (P1.1, P1.2, P2.1 y P2.2), se tiene un registro pH inferior a 7.5 el cual es representado como el límite que permite la movilidad y la precipitación de los metales pesados [36], lo que causo una variabilidad en las lecturas obtenidas en la concentración de cadmio (Cd) y cromo (Cr), para cada una de las muestras contaminadas (P1.1, P1.2, P2.1 y P2.2),

Debido a los registros existentes que afirman la sedimentación y la movilidad de los metales pesados en el área que lo contiene se afirma la precipitación de los metales pesados debido a las características que forman el fluido de perforación base agua en el que está presente la bentonita, que tiene la cualidad de retenerlos, debido a que es una arcilla [37].

Los metales pesados presentes en el suelo sin contaminar son superiores que en el suelo contaminado, demostrando el desplazamiento ocasionado por la acidez del suelo que tiene un valor de 4.53 aproximadamente, siendo catalogado como extremadamente ácido, por lo que las concentraciones de cromo de las muestras, se evidencia la disminución de la concentración del metal pesado en los tratamientos contaminados (P1.1, P1.2, P2.1 y P2.2), que constan de una concentración de 0.01 ppm, mientras que el suelo sin contaminar tiene 0.02 ppm.

Los resultados obtenidos en la **Figura 10**, presentan una concentración baja de metales pesados en las muestras contaminadas, en el que afecto el tipo de suelo arcilloso que mueve las concentraciones de metales pesados hacia los bordes, junto con la presencia de la bentonita en el fluido de perforación que encapsula los metales pesados, moviéndose hacia el fondo y las paredes del recipiente [33], [35], también afectando una mala homogenización del fluido de perforación con concentraciones de metales pesados al ser mezclado con la tierra, afectando la ubicación drásticamente de los contenidos de cadmio (Cd) y de cromo (Cr), presentes en cada una de las muestras contaminadas, otro factor que afecto la variación de las concentraciones de metales pesados es el tiempo de contaminación en el que transcurrieron 2 días para obtener los 500 gr que se obtuvieron de la parte superior de la muestra, dando tiempo para que las concentraciones se muevan hacia la parte inferior del recipiente para llevarlo a los laboratorios, más el tiempo de recepción de la muestra en el laboratorio de (IGAC) en el que transcurrieron 44 días hasta la realización de los análisis, dando tiempo para que la bentonita retenga los metales pesados y se precipiten.

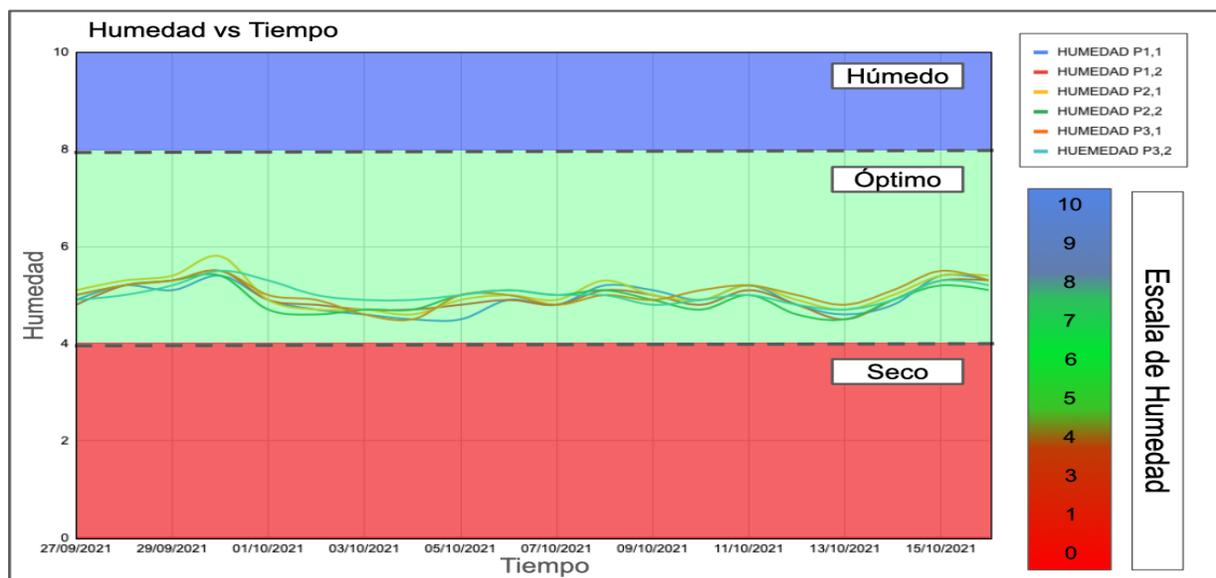
### **3.2 Comportamiento de la planta en un entorno contaminado**

El estudio que se obtuvo del seguimiento de las plantas fue en un ambiente controlado y no bajo condiciones de campo, brindando el comportamiento visual que tuvo la planta al transcurrir 20 días desde el momento en que fueron plantadas en las muestras contaminadas (P1.1, P1.2, P2.1 y P2.2), controlando aspectos como la humedad y la luminosidad, también se registró la temperatura ambiente en la que se encuentran.

Para la lectura de la humedad y la luminosidad que afectaban al suelo y a la planta de cada uno de los tratamientos se utilizó el equipo Three-Way Meter [38].

**Figura 11.**

*Figura de Humedad vs Tiempo*



**Nota.** La Figura presenta la lectura de Humedad contenida en el suelo con respecto al tiempo transcurrido en el proceso de fitorremediación

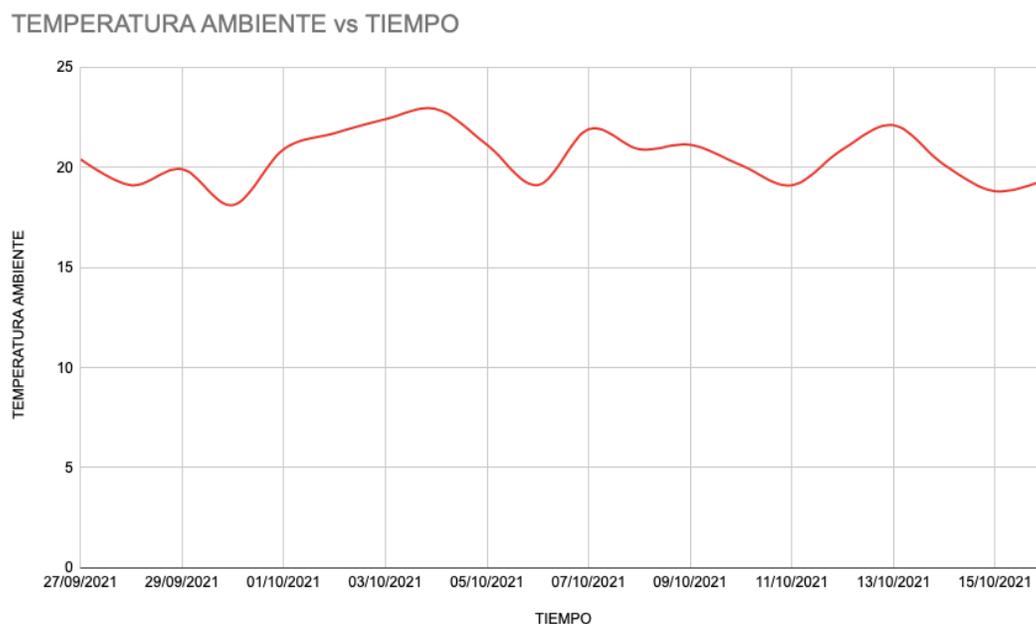
La **Figura 11**, representa la humedad en el que su escala se divide en tres fases, de 0 a 4 se denomina seco, el cual es una condición no apta para el desarrollo de la planta, de 4 a 8 representa un rango óptimo en el que la planta se encuentre en buenas condiciones y de 8 a 10 en el que el medio está con humedad con demasiado exceso de agua.

Como se puede evidenciar en el proceso de fitorremediación de las muestras (P1.1, P1.2, P2.1, P2.2, P3.1 y P3.2), las muestras no presentaron inconvenientes con respecto a la humedad presente en la tierra, estando dentro del rango óptimo que consta de una lectura entre 4 y 8 de humedad, presentando el punto máximo de humedad la muestra P2.1 el día 30 de septiembre y la lectura más baja el día 5 de octubre para la muestra P1.1.

Por lo que la planta para un suelo que no está contaminado con fluido de perforación si tiene un buen desarrollo como se puede evidenciar en los tratamientos P3.1 y P3.2, demostrados en la **Tabla 56 y Tabla 57**, en que las plantas tienen un óptimo crecimiento en “Suelo húmedo y ambiente seco con un buen drenaje del suelo, teniendo un sistema de raíces que le permiten aprovechar muy bien todos los nutrientes de suelos francos o arenosos que permiten retener la humedad con un pH superior a 6” [39].

**Figura 12.**

*Figura de temperatura ambiente vs tiempo*



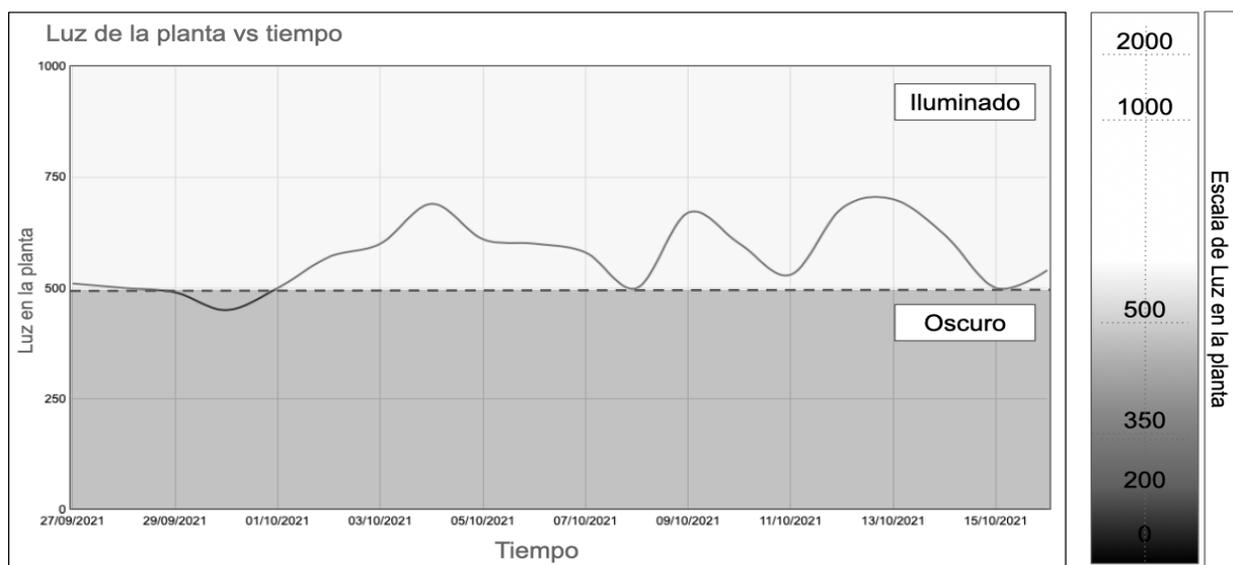
**Nota.** La Figura presenta la lectura de Temperatura en grados Celsius con respecto al tiempo transcurrido en el proceso de fitorremediación.

Como se puede observar en la **Figura 12**, la temperatura es inversamente proporcional a la humedad demostrando que en el momento en que existe una tendencia en aumento para la temperatura al mismo tiempo hay una tendencia a la disminución de la humedad en las muestras (P1.1, P1.2, P2.1, P2.2, P3.1 y P3.2), logrando evidenciar esta relación el día 30 de septiembre, en el que se registra la temperatura más baja de 18,11°C, y obteniendo la humedad más alta con una relación de 5.8 para la muestra P2.1.

Por lo que se tiene un registro de que las plantas de la familia *Brassicaceae*, puede tolerar climas fríos inferiores a 24 °C, y favorecer su crecimiento en temperatura templadas, que ayudan a la obtención de nutrientes [39], [40]. Como se ve representado en los tratamientos sin contaminar P3.1 y P3.2, que se evidenció un crecimiento en sus hojas y vitalidad en su estructura.

**Figura 13.**

*Luz en la planta vs tiempo*



**Nota.** La Figura presenta la cantidad de luminosidad en Lumen con respecto al tiempo transcurrido en el proceso de fitorremediación

Se observa en la **Figura 13**, la escala de luminosidad se divide en dos rangos los cuales se encuentran dentro de los parámetros de 0 a 2000 lumen, en los que de 0 a 500 lumen se denomina como oscura, en que se encuentran dos datos, (del día 29 de septiembre al 30 de septiembre), y con una lectura de 500 a 2000 lumen se denomina iluminado, en el que se encuentran 18 datos.

La luminosidad es independiente a parámetros como la temperatura y la humedad, como se puede evidenciar en la **Figura 13 y Figura 12**, la temperatura no garantiza una buena iluminación, debido a que se presentaron días en los que existía una temperatura relativamente alta con respecto a los datos registrados para el proceso de

fitorremediación en el que la luminosidad no correspondía con la misma inclinación en la Figura, debido a la presencia de nubes que obstruían el sol de forma directa.

Las plantas de los tratamientos al estar sometidos en un ambiente con una lectura de luminosidad relativamente baja estando en el rango establecido para ser considerado iluminado, logran tener un buen desarrollo, creciendo en un ambiente soleado o semi-soleado [39], dando paso a que puedan absorber los nutrientes de la tierra y cumplan con el proceso de fotosíntesis.

**Tabla 8.**

*Número de hojas en los tratamientos con respecto al tiempo*

Hojas en las plantas						
Fechas	P1.1	P1.2	P2.1	P2.2	P3.1	P3.2
27/09/2021	5	5	6	5	6	5
30/09/2021	5	5	6	5	6	5
03/10/2021	5	5	5	5	6	5
06/10/2021	4	5	5	5	5	6
09/10/2021	4	5	5	5	5	6
12/10/2021	3	4	5	5	5	6
16/10/2021	1	3	3	5	6	5

**Nota.** La Tabla, presenta la cantidad de hojas con respecto al tiempo de cada tratamiento durante el proceso de fitorremediación.

**Figura 14.**

*Número de hojas con respecto al tiempo*



**Nota.** La Figura, presenta la variedad de las hojas en cada uno de los tratamientos de fitorremediación con respecto al tiempo

Como se puede evidenciar en la **Figura 14** y en la **Tabla 8**, se evidencia que en los primeros tres días desde que inició el proceso de fitorremediación no existió ninguna pérdida de hojas en los tratamientos, a partir del sexto se observa una variación en el número de hojas con respecto al tiempo en cada recipiente evaluado.

Durante el proceso de fitorremediación el número de hojas representó la salud de las plantas y el cómo estaban siendo afectadas por los contaminantes agregados al suelo de cada muestra, concluyendo que el tratamiento que tuvo una mayor afectación fue el P1.1, en el que se observa una pérdida en la cantidad de sus hojas desde el noveno día en que empezó el proceso de fitorremediación, dando un resultado de 4 hojas, y terminando el proceso con 1 hoja viva, siendo el resultado con el menor número de hojas en todos los tratamientos. También hubo un tratamiento con el número de hojas constante con respecto al tiempo, siendo afectada en la humedad de su estructura y clorosis en sus hojas, que se tornaron de un color amarillo y verde pálido.

Los tratamientos sin contaminar mostraron una aceptación positiva al suelo aumentando el número de hojas y en su totalidad se mantuvieron en un verde oscuro, aunque durante el proceso el tratamiento P3.1 al noveno día se disminuyó 1 hoja, aumentado al final, en cambio, al tratamiento P3.2 sucedió lo contrario aumentó el número de hojas al noveno día y al final se cayó.

Como se puede evidenciar desde la **Tabla 16** hasta la **Tabla 57**, en el que representan el seguimiento de las plantas. Los primeros tres días, todos los tratamientos se encuentran en buenas condiciones, pero en la gran mayoría de las plantas al menos una de sus hojas se torna de un color verde más claro debido a que el cadmio tiende a causar clorosis en las plantas. Principalmente en hojas jóvenes [41], este efecto en los tratamientos sin contaminantes no se observó.

Al transcurrir el sexto día las hojas de los tratamientos se empiezan a tornar amarillo y en uno de los tratamientos sin contaminar una de sus hojas se tornó totalmente amarilla,

en el noveno día empieza aumentar el número de hojas de color verde claro en todos los tratamientos contaminados y una leve inclinación hacia abajo de las hojas.

En los tres días posteriores se identifica una debilidad estructural, resequedad en las plantas, el grosor del tallo empezó a disminuir y todas las hojas y tallos de los tratamientos se ven con una decoloración en su pigmentación, al transcurrir los 15 días la planta del tratamiento P1.1 es la que se observa con mayor debilidad en toda su estructura, los otros tratamientos también tienden estar afectados en la inclinación hacia abajo de su tallo, todo lo contrario a las plantas que están en el suelo sin contaminar evidenciando su buena adaptación en el suelo y su óptimo desarrollo, en cuanto a la pigmentación de sus hojas, estructura y rigidez.

Al final del proceso de fitorremediación los tratamientos con el suelo contaminado se refleja cómo afectan los contaminantes absorbidos por las plantas en el que causaron la muerte progresivamente del tratamiento P1.1 y en las otras plantas una debilidad estructural, clorosis y resequedad, algo que en ningún momento sucedió con las plantas del suelo sin contaminar, ellas durante todo el proceso de fitorremediación se desarrollaron de manera óptima en el que al transcurrir el tiempo demostraron mejorar su fortaleza estructural.

El suelo al que fue sometido es franco-arcilloso el cual es considerado como blando y friable que da una sensación de aspereza, siendo ligeramente plástico y al ser combinado con un fluido de perforación el cual tiene como material densificante la barita por lo que al estar en contacto con la tierra la vuelve rígida y difícil de penetrar para las raíces, esto se puede evidenciar al ser comparado con el suelo fértil el cual demostró una gran aceptación del suelo en su desarrollo.

### 3.3 Suelo después del proceso de Fitorremediación

. **Tabla 9.**

*Resultados de suelo después del proceso de fitorremediación, pH, cadmio TOTAL, cromo TOTAL*

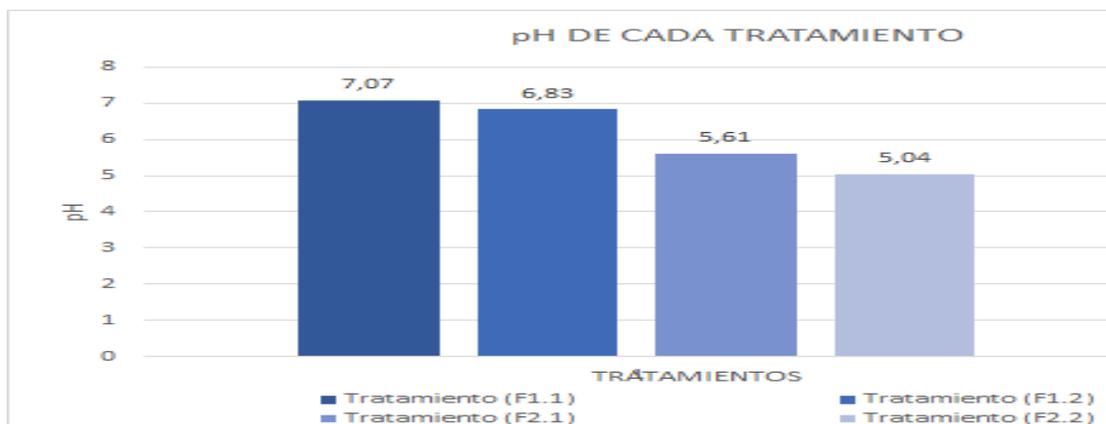
Características	Tratamiento (F 1.1)	Tratamiento (F 1.2)	Tratamiento (F 2.1)	Tratamiento (F 2.2)
pH	7.07	6.83	5.61	5.04
Cd total mg/kg	0.01	0.01	0.01	0.01
Cr total mg/kg	0.01	0.01	0.01	0.02

**Nota.** La Tabla representa la lectura obtenida de pH junto con la concentración de cadmio (Cd) TOTAL y cromo (Cr) TOTAL presente en el suelo sin contaminar y en cada una de las muestras contaminadas.

Como se evidencia en la **Tabla 9** la variación de las concentraciones de cadmio (Cd) y de cromo (Cr) presentes en las muestras después del proceso de fitorremediación (F1.1, F1.2, F2.1 y F2.2), no logro tener una variación significativa en los resultados de las muestras contaminadas (P1.1, P1.2, P2.1 y P2.2) representadas en la **Tabla 7**, por lo que es evidente afirmar que el proceso de fitorremediación no logro cumplir una disminución en la concentración de los metales pesados cadmio (Cd) y cromo (Cr) presentes en la muestra.

**Figura 15.**

*Figura de la escala de los pH en cada una de las muestras analizadas*



**Nota.** La Figura representa la lectura obtenida de pH, en el suelo después del proceso de fitorremediación.

Se puede observar en la **Figura 15** un pH que va con una lectura de 5.04, hasta 7.07 lo que nos da un rango de categoría entre extremadamente ácido y neutro.

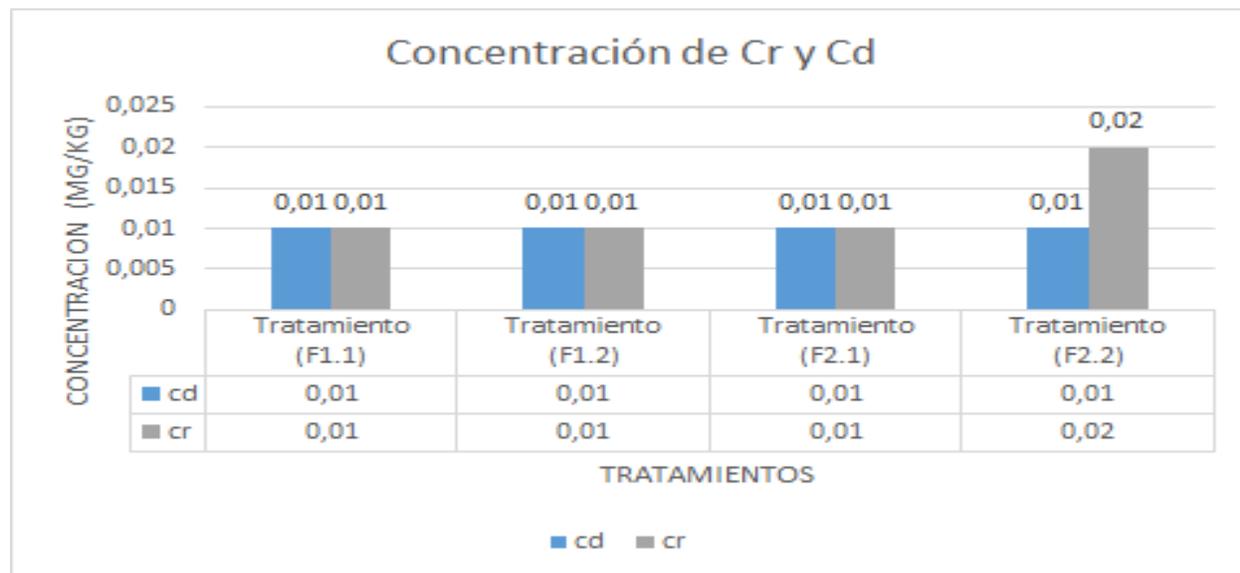
Los resultados obtenidos en la **Figura 15**, representan el pH del suelo después del proceso de fitorremediación el cual muestra un aumento de pH a comparación de los resultados mostrados en la **Figura 9**, representando el pH del suelo antes del proceso de fitorremediación, en las que presentaron un mayor deterioro.

La muestra P1.1 demostró un aumento de pH en un 54 %, cambiando su categoría de extremadamente ácido a neutro [43].

Según la **Figura 15** El suelo después del tratamiento de fitorremediación presentó una mejora en el pH volverlo básico, el cual es un pH óptimo para que la tierra pueda ser utilizada en cultivos de tipo granos como lo son el arroz y el maíz, y otros cultivo como la Alfalfa, Remolacha y la Avena [44].

**Figura 16.**

*Figura de la concentración de cadmio (Cd) y cromo (Cr), en los tratamientos*



**Nota.** La Figura representa la concentración de cadmio (Cd) TOTAL y cromo (Cr) TOTAL presente en los tratamientos después del proceso de fitorremediación.

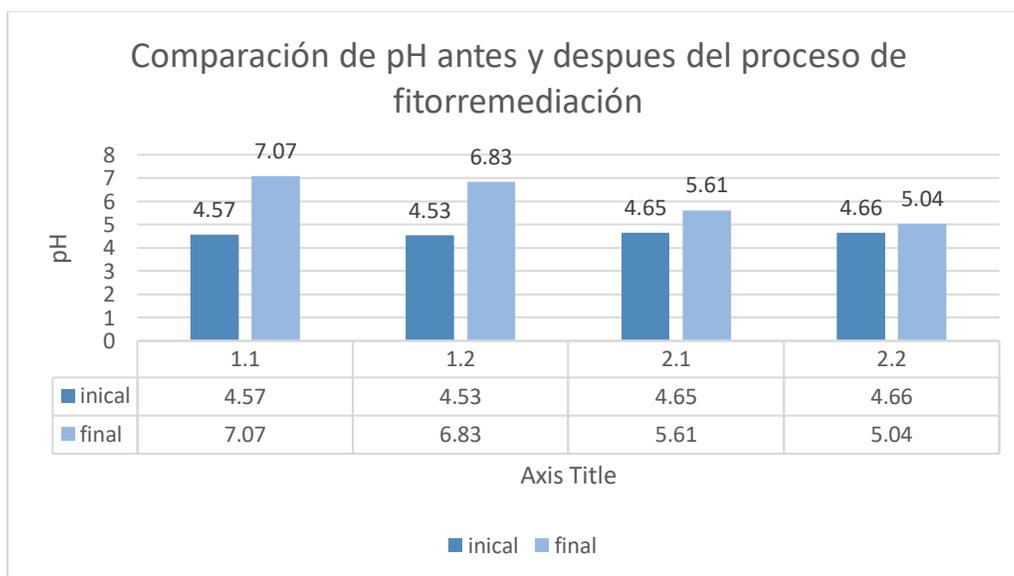
Analizando los resultados obtenidos en la **Figura 16**, se evidencia una disminución de la concentración de cadmio y una lectura constante en la concentración de cromo, lo que representa una afinidad en la planta *Brassica Juncea* para la disminución de la concentración de cadmio presente en el suelo en las muestras (F1.1, F1.2, F2.1 y F2.2).

Los resultados de las concentraciones después del proceso de fitorremediación demostraron no tener una variación significativa por lo que se afirma que el proceso de fitorremediación sometido a un suelo arcilloso contaminado con fluido de perforación base agua no tuvo los resultados esperados debido a circunstancias como el pH en el que se encontraban las muestras, las cuales ocasionaron una variedad en las lecturas de la concentración de sus metales pesados, por lo que los resultados del proceso de fitorremediación no fueron favorables, sin embargo, el pH registrado en las muestras después del proceso de fitorremediación tuvo un aumento, logrando estar en ligeramente ácido y neutro, por lo que está en el rango de óptimo de ser utilizado para cultivos [44].

### 3.3.1 Comparación del pH antes y después del proceso de fitorremediación

**Figura 17.**

*Figura de comparación de pH antes y después del proceso de fitorremediación*



**Nota.** La Figura representa la comparación de pH antes y después del proceso de fitorremediación.

Como se evidencia en la **Figura 17**, se puede observar una comparación en el pH de cada una de las muestras antes y después del proceso de fitorremediación, demostrando un aumento en el pH, para las muestras después del proceso de fitorremediación.

El aumento de pH evidenciado en las muestras después del proceso de fitorremediación es causado debido a que las plantas absorben los nutrientes en forma de iones, manteniendo una carga neutra en sus raíces haciendo que la zona de su alrededor se neutralice hasta llegar al pH en el que la planta pueda absorber los nutrientes [42].

### 3.4 Diseño experimental

El diseño experimental se planteó de un factor y dos niveles en el que se evaluó el cambio de concentración de cadmio (cd) antes y después del proceso de fitorremediación.

**Tabla 10.**

*Concentraciones de cadmio (Cd) en el Nivel 1 y Nivel 2*

Cd mg/kg	Nivel 1		Nivel 2		Media tratamientos
	1.1	1.2	2.1	2.2	
Inicial	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Final	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Media	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01

**Nota.** La Tabla demuestra las concentraciones de cadmio en el suelo antes y después del tratamiento de fitorremediación

**Figura 18.**

*Concentraciones de cadmio (Cd) en el Nivel 1 y Nivel 2*



**Nota.** La Figura demuestra las concentraciones de cadmio en el suelo antes y después del tratamiento de fitorremediación

Se planteó una hipótesis nula en la que él no tuvo diferencia significativa en el cambio de concentración antes y después del proceso de fitorremediación para el cadmio (Cd) y Una hipótesis alternativa en el que tuvo una diferencia significativa en el cambio de las concentraciones antes y después del proceso de fitorremediación para el cadmio (Cd).

**Tabla 11.**

*Estadísticas de las Muestras emparejadas de cadmio*

Muestra	Media	N	Desv. estándar	Media de error estándar
inicial	0.0175	4	0.00500	0.00250
final	0.0125	4	0.00500	0.00250

**Nota.** La Tabla demuestra estadísticas de las Muestras emparejadas de cadmio

**Tabla 12.**

*Correlación de las muestras emparejadas de cadmio*

Muestra	N	Correlación	Significación	
			P de un factor	P de dos factores
inicial & final	4	0.333	0.333	0.667

**Nota.** La Tabla demuestra la correlación de las muestras emparejadas de cadmio

**Tabla 13.**

*Prueba de muestras emparejadas*

Muestra	Diferencias emparejadas					t	gl	Significación	
	Media	Desv. estándar	Media de error estándar	intervalo de confianza				P de un factor	P de dos factores
				Inferior	Superior				
inicial - final	0.00500	0.00577	0.00289	-0.00419	0.01419	1.732	3	0.091	0.182

**Nota.** La Tabla demuestra la prueba de muestras emparejadas

La **Tabla 13** muestra el resultado de la prueba de muestras emparejadas en el que determina si hay diferencia significativa entre las medias, por medio de la significancia dando un P- valor de 0.091, aprobando la hipótesis nula en el que no hay diferencia

significativa en las medias de la concentración de cadmio(Cd) antes y después del proceso de fitorremediación, ya que es mayor al valor del nivel del error que es de 0.05, es decir, no hay efectos significativos en el cambio de la concentración de cadmio.

El diseño experimental se planteó de un factor y dos niveles en el que se evaluó el cambio de concentración de cromo (Cr) antes y después del proceso de fitorremediación.

**Tabla 14.**

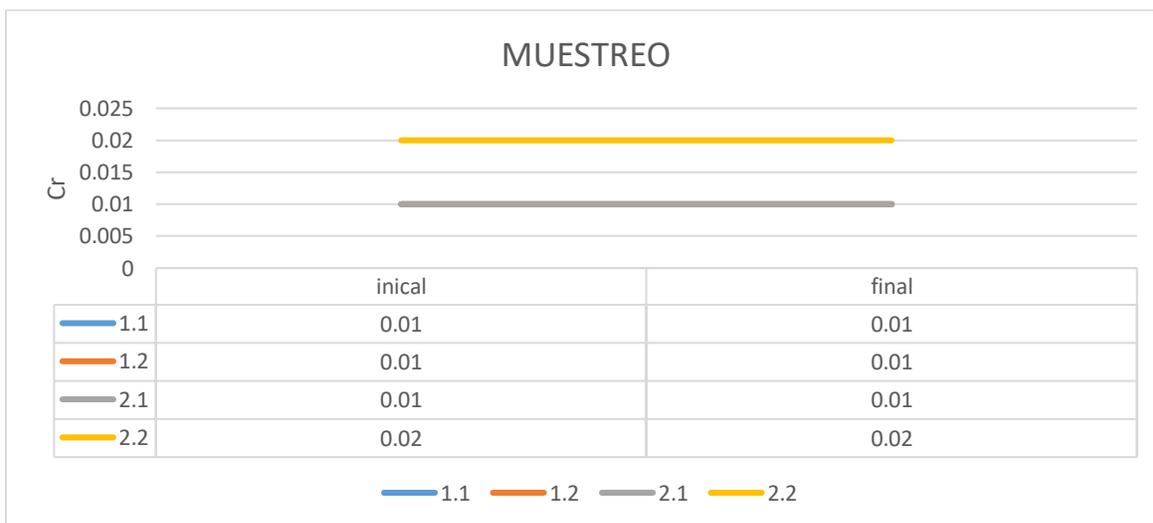
*Concentraciones de cromo (Cr) en el Nivel 1 y Nivel 2*

Cr mg/kg	Nivel 1		Nivel 2		Media tratamientos
	1.1	1.2	2.1	2.2	
Inicial	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Final	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Media	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01

**Nota.** La Tabla demuestra las concentraciones de cromo en el suelo antes y después del tratamiento de fitorremediación

**Figura 19.**

*Concentraciones de cromo (Cr) en el Nivel 1 y Nivel 2*



**Nota.** La Figura demuestra las concentraciones de cromo en el suelo antes y después del tratamiento de fitorremediación

Se planteó una hipótesis nula en la que él no tuvo diferencia significativa en el cambio de concentración antes y después del proceso de fitorremediación para el cromo (Cr) y Una hipótesis alternativa en el que tuvo una diferencia significativa en el cambio de las concentraciones antes y después del proceso de fitorremediación para el cromo (Cr).

**Tabla 15.**

*Estadísticas de las Muestras emparejadas de cromo*

<b>Muestra</b>	<b>Media</b>	<b>N</b>	<b>Desv. estándar</b>	<b>Media de error estándar</b>
inicial	0,0125	4	0.00500	0.00250
final	0.0125	4	0.00500	0.00250

**Nota.** La Tabla demuestra estadísticas de las Muestras emparejadas de cromo

La Correlación de las muestras emparejadas de y la Prueba de muestras emparejadas del cromo no se pueden calcular debido a que el valor estándar de la diferencia es 0, sin embargo, es evidente por los resultados que no existe ninguna diferencia significativa en el cambio de la concentración de cromo antes y después del proceso de fitorremediación por lo que se aprueba la hipótesis nula.

#### 4. CONCLUSIONES

Debido a que se agregaron las concentraciones de metales pesados en el fluido de perforación, la Bentonita presente en el fluido, tiene la capacidad de encapsular los metales pesados, y como se sedimenta genera una traslación de las concentraciones en las muestras sin contaminar con valores de 0.01 ppm de cadmio y 0.02 ppm de cromo, y en las muestras contaminadas dando valores para el cadmio de P1.1: 0.01 ppm, P1.2: 0.02 ppm, P2.1: 0.02 ppm, y P2.2: 0.02 ppm y valores para el cromo de P1.1: 0.01 ppm, P1.2: 0.01 ppm, P2.1: 0.01 ppm, y P2.2: 0.02 ppm

La cuantificación metales pesados cadmio (Cd) y Cromo (Cr), en las muestras antes y después del proceso de fitorremediación, no presento una variación significativa para determinar que el proceso de fitorremediación cumpla con la disminución de los metales pesados, por lo que no se obtuvo una eficiencia.

En los dos diseños de experimentos de cadmio y cromo dieron como resultado que no tienen una diferencia estadísticamente significativa aceptando la hipótesis nula en la que indica no tuvo diferencia en el cambio de concentración antes y después del proceso de fitorremediación.

Debido a que el fluido de perforación tenía presencia de Bentonita, tuvo efectos negativos en el suelo proveniente del municipio de Guamal Meta, ocasionando que las plantas no puedan tener un buen desarrollo, siendo causado por la mezcla del fluido de perforación con el suelo, generando un endurecimiento en la contextura del suelo y evitando que las plantas puedan absorber con facilidad los nutrientes de la tierra, representado en de degradación de las plantas utilizadas en los tratamientos.

El suelo tiene características favorables al no ser contaminada con fluido de perforación, teniendo una textura franco - arcilloso y presentando una escala de pH extremadamente ácida de 4.39, ocasionando que los metales pesados tengan una mayor disposición a ser absorbidos por las plantas que cumplan el proceso de fitorremediación.

Se demuestra que por medio de los 4 tratamientos de fitorremediación las plantas no tuvieron una buena aceptación en el suelo contaminado con el fluido de perforación, ocasionando una pérdida en sus hojas y una resequedad en su estructura.

Los valores de pH obtenidos en las muestras contaminadas después del proceso de fitorremediación presentaron un aumento de pH, obteniendo valores que van de 5.04 a 7.07, con respecto a las muestras contaminadas antes del proceso de fitorremediación que presentaron lecturas entre 4.53 a 4.66, logrando pasar el pH de una escala de extremadamente ácida a neutro, permitiendo al suelo poder ser utilizado para cultivos de tipo grano.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Delgado-Ramos “Petróleo, Medio ambiente, Cambio climático y Seguridad: macondo, otra advertencia más” *Critical Journal of Social and Juridical Sciences Euro-Mediterranean University Institute Roma, Italia*. Vol. 30, no. 2, 2011 [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/181/18120143001.pdf> [Acceso: 18 septiembre 2021].
- [2]. A. Delgadillo et al., “Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación”, *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, Universidad Autónoma de Yucatán Mérida, Yucatán, México. Vol. 14, no. 2, Ago 2011, pp. 597-612. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/939/93918231023.pdf> [Acceso: 18 septiembre 2021].
- [3] A, Avellaneda, “Petróleo e impacto ambiental en Colombia”, *Revista Universidad Nacional* Vol. 6 no. 24. Jun 1990. [En línea]. Disponible: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/revistaun/issue/view/1340> [Acceso: 18 septiembre 2021].
- [4] R, Núñez et al..., “Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones”, *Academia Mexicana de Ciencias* Vol. 55 no. 3, Sep 2004, pp. 69-83. [En línea]. Disponible: [http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55\\_3/Fitorremediación.pdf](http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediación.pdf) [Acceso: 18 septiembre 2021].
- [5]. J. Williams, “Fundamentos de los fluidos de perforación”. traducción del artículo publicado en *Oilfield Review Primavera* Vol 25 no. 1, 2013, pp. 67-69 [En línea]. Disponible: <http://www.paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/4676/Asignaturas/1458/Archivo2.3223.pdf> [Acceso: 15 septiembre de 2021].
- [6]. A. Patiño-Gómez, *Diseño del fluido de perforación mitigando el daño de formación en la zona de interés del pozo o224 en el campo orit*. [Trabajo de grado]. Fundación

Universidad de América, Facultad de ingenierías, Bogotá Colombia, 2017. Repositorio Institucional Lumieres. [En línea]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6407/1/5101388-2017-2-IP.pdf> [Acceso: 15 septiembre de 2021].

[7] R. Escalante, *Estudio experimental de la variación de la viscosidad en un fluido de perforación utilizando el mangle como aditivo*. [Trabajo de grado]. Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería, Geología, Minas y Petróleos, Guayaquil Ecuador 1976. [En línea]. Disponible: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/3412> [Acceso: 18 septiembre 2021].

[8] L. Hernandez, *Diseño y puesta en marcha de un procedimiento para certificación de líquidos como patrones de densidad mediante el empleo del método de pesados hidráulicos, utilizando un sólido patrón de masa y volumen conocidos*. [Trabajo de grado]. Universidad de Costa Rica, Facultad de ingeniería química, San Jose Costa Rica, 2014. [ En línea]. Disponible: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/2321/1/37232.pdf> [Acceso: 18 septiembre 2021].

[9] J. Esterlin y M. Gomez, *Metodología para el cálculo de reología e hidráulica para pozos estratégicos profundos, usando una herramienta software (compass y well plan*. [Trabajo de grado]. Facultad de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga Colombia, 2011. [En línea]. Disponible: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/138994.pdf> [Acceso: 18 septiembre 2021].

[10] J. Hernández-García, *Evaluación de efectividad de inhibidores base amina – phpa en el lodo utilizado en campo opón*. [Trabajo de grado]. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales - U.D.C.A Faculta de Ciencia y Tecnología, Bogotá Colombia, 2014. [ En línea].

Disponible:<https://repository.udca.edu.co/bitstream/handle/11158/2020/TRABAJO%20DE%20GRADO%20LISTO.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Acceso: 18 septiembre 2021].

[11] Manual de fluidos de perforación, Energy API. Instituto Americano de petróleo. Dallas Texas. 2014. [En Línea]. Disponible: <https://www.udocz.com/co/apuntes/31885/manual-fluidos-de-perforacion-energy-api-1> [Acceso: 23 octubre 2021].

[12] F. Calderón y A. García, *Evaluación técnica de un fluido de perforación base agua*. [Trabajo de grado]. Fundación Universidad de América, Facultad Ingeniería de petróleos, Bogotá, 2017. Repositorio Institucional Lumieres. [En línea]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6404/1/5121369-2017-2-IP.pdf> [Acceso: 18 septiembre 2021].

[13] A. Maldonado, *Formulación y evaluación de fluidos de perforación de base agua de alto rendimiento aplicado al campo balcón como sustitutos de lodo base aceite*. [Trabajo de grado]. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingeniería de Petróleos, Bucaramanga Colombia, 2006. [En línea]. Disponible: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2006/121946.pdf> [Acceso: 18 septiembre 2021].

14. M. Vigil, *Sistema de ayuda a la decisión para el diseño de proyectos de fitorremediación de suelos industriales*. [Tesis doctoral]. Universidad de Oviedo, Programa doctorado en minería, 2017. Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo. [En línea]. Disponible: <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/43858> [Acceso: 18 septiembre 2021].

[15] M.Gonzales, *Mejoramiento de la fitoextracción en plantas nativas en suelos contaminados por actividades mineras en Puchancavi y Quintero*. [Trabajo de

- grado]. Facultad de Geografía I Historia, Universidad de Barcelona, Barcelona España, 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.tesisenred.net/handle/10803/404215#page=3> [Acceso: 18 septiembre 2021].
- [16] K.Papuico, *Técnica de fitorremediación en la extracción de metales pesados con la planta yaluzai (senecio rudbeckiaefolius) en la relavera de quiulacocha del distrito de Simón Bolívar de Rancas*. [Trabajo de grado]. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrion, Facultad de Ingeniería, Pasco Peru, 2018. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/457/1/TESIS%20KARITO.pdf> [Acceso: 18 septiembre 2021].
- [17] N. Nungaray, *Fitorremediación del suelo de la mina La blanca, Hidalgo, con plantas de la especie Cosmos Bipinatus y el genero Dahlia*. [Trabajo de grado]. Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Facultad de estudios superiores Zaragoza, México, 2014. [En línea]. Disponible: <http://132.248.9.195/ptd2014/febrero/0708929/Index.html> [Acceso: 13 octubre 2021].
- [18] D. Larios-Cardenas, *Efectos en los Primeros Estadios Fenológicos de la Brassica Juncea Cultivado en un Suelo Contaminado por Plomo*. [Trabajo de grado]. Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Facultad de Ingeniería y Gestión, Villa el Salvador, 2019. [En línea]. Disponible: [http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/bitstream/123456789/171/1/Larios\\_Dayana\\_Trabajo\\_Suficiencia\\_2019.pdf](http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/bitstream/123456789/171/1/Larios_Dayana_Trabajo_Suficiencia_2019.pdf) [Acceso: 13 octubre 2021].
- [19]. P. Salamanca et al, "Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso heliconia psittacorum (heliconiaceae)", Rev. Acad. Colomb. Cienc. Vol.37 no. 145. pp 469-481, 2013. DOI: <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v37n145/v37n145a04.pdf> [Acceso: 13 octubre 2021].

- [20] L. Londoño-Franco, P. Londoño-Muñoz y F. Muñoz-Gracia “Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal” *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* Vol 14 no. 2. pp 145-153, Dic 2016. DOI: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf> [Acceso: 13 octubre 2021].
- [21] E.Galan-Huertos y A.Romero-Baena, “ Contaminacion de suelos por metales pesados” *Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Facultad de Química*, Vol 553. Universidad de Sevilla. Sevilla 41071,pp 48-60, 2008. [En línea]. Disponible: [http://www.ehu.eus/sem/macla\\_pdf/macla10/Macla10\\_48.pdf](http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf) [Acceso: 13 octubre 2021].
- [22] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM Servicio Geológico Colombiano – SGC, Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 plancha 266 – Villavicencio, Bogotá, Dic 2016. [En línea]. Disponible: [http://recordcenter.sgc.gov.co/B22/481\\_17AmeMM266\\_Villavicencio/Documento/Pdf/MemoAme266.pdf](http://recordcenter.sgc.gov.co/B22/481_17AmeMM266_Villavicencio/Documento/Pdf/MemoAme266.pdf) [Acceso: 20 octubre 2021].
- [23] Louisiana Administrative Code, Natural Resources i Part XIX. Office of Conservation—General Operations Subpart 1. Statewide Order No. 29-B, dic 2005. [PDF].
- [24] D. Serrano-Cubillos y N. Fernadez, *Guia Laboratorio Lodos y Cementos*, Facultad ingeniería de petróleos, Fundación Universidad de América, 2019. [PDF]
- [25] A.Zumudio-Sanches et al; . *Metodos Analíticos del laboratorio de suelos*, 6 °. Ed. Bogota Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2006

26. M.Hernandez y A.Manrique, *Formulacion de un fluido de perforación de alto rendimiento polimerico en base agua para el bloque cpo-05 de la cuenca de los llanos orientales*. [Trabajo de grado]. Fundacion Universidad de America, Bogota, Colombia, 2018.[En línea]. Disponible: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6721/1/6112774-2018-1-IQ.pdf>. [Acceso: 20 octubre 2021].
- [27] C. Cardenas-Medina et al;. “Análisis reológico para predecir y mejorar el comportamiento hidráulico durante la perforación de un pozo” *Revista Fuentes, el reventón energético*, Vol. 11 no. 1 pp 14, Nov 2013. [En línea]. Disponible: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/3613>[Acceso: 23 octubre 2021].
- [28] Manual de fluidos de perforación, Energy API. Instituto Americano de petróleo.Dallas Texas. 2014. [En Línea]. Disponible: <https://www.udocz.com/co/apuntes/31885/manual-fluidos-de-perforacion-energy-api-1> [Acceso: 23 octubre 2021].
- [29] W. Huiza-Matamoros y J. Quispe-Torres, *Evaluación de las propiedades físicas y químicas del suelo de los tipos de pastizal del centro de investigación de camélidos sudamericanos – lachocc*. [Trabajo de grado]. Facultad de Ciencias Ingenieria, Universidad Nacional Huancavelica, Huancavelica Peru, 2017. [ En línea]. Disponible: <https://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/UNH/1171/TP%20-%20UNH%20ZOOT.%200131.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Acceso: 3 noviembre 2021].
- [30] A. Kabata, *Trace elements in soils and plants*, 3°. Ed. Polonia. [En Línea ]. Disponible: <http://base.dnsgb.com.ua/files/book/Agriculture/Soil/Trace-Elements-in-Soils-and-Plants.pdf> [Acceso: 3 noviembre 2021].

- [31] X. Zhang et al;. Change of the Extractability of Cadmium Added to Different Soils: Aging Effect and Modeling, National Soil Fertility and Fertilizer Effects Long-Term Monitoring Network, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China, 2018.
- [32] A. Borona y F. Romero, "Distribution of metals in soils and relationships among fractions by principal component analysis", *El Sevier Soil Technology* Vol 8, no. 4, pp 303-319, March 1996. [ En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0933363095000291> [Acceso: 3 noviembre 2021].
- [33] D. Carbonel-Ramos, "Cadmium, Copper and Lead Adsorption on Natural and Modified Bentonite, Kaolin and Zeolite: A Review of Process Parameters, Isotherms and Kinetics" *Ingeniería*, Vol. 23, no. 3, pp 252-273, Sep, 2018, DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.13418> [Acceso: 5 noviembre 2021].
- [34] S. Ismadji, F. Soetaredjo y A. Ayucitra, *Materiales arcillosos para la remediación ambiental*, 1°. Ed. Springer, 2015
- [35] F. Bergaya y G. Lagaly, *Handbook of Clay Science*, 2°. Ed. Elsevier, 2013
- [36] S. Dutta y D. Singh "Sorption and desorption behavior of lead in four different soils of India" *Agricultural Sciences*, Vol. 2 no.1, pp 41-48, Feb 23, 2011, DOI: [https://www.scirp.org/pdf/AS20110100008\\_40540243.pdf](https://www.scirp.org/pdf/AS20110100008_40540243.pdf) [Acceso: 7 noviembre 2021].
- [37] P. Duncan, "Trace metal adsorption/coprecipitation on hydrous ferric oxide under realistic conditions: The role of humic substances" *Elsevier Water Research* Volume 19 no.10, pp 1229-123, 1985, DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(85\)90175-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(85)90175-7) [Acceso: 7 noviembre 2021].

- [38] Three-Way Meter, Designed and Engineered in the U.S.A. Made in China to Hydrofarm's Exacting Specifications. Distributed by Hydrofarm • Petaluma, CA U.S.A. [ En línea]. Disponible: [https://hydroponics.net/documents-hf/23577\\_MGMLP3way\\_instr.pdf](https://hydroponics.net/documents-hf/23577_MGMLP3way_instr.pdf) [Acceso: 7 noviembre 2021].
- [39] E. Chango, *Efecto de la mostaza caliente en suelo hortícola infestado por nematodos*. [Trabajo de grado]. Universidad técnica de Ambato, Facultad de ciencias Agronómicas, Cevallos Ecuador, 2015. [ En línea]. Disponible: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/18309/1/Tesis-114%20%20Ingenier%C3%ADa%20Agron%C3%B3mica%20-CD%20369.pdf> [Acceso: 8 noviembre 2021].
- [40] F. Perez et al;. "Desarrollo del cultivo de Brassica juncea L. (mostaza) en condiciones tropicales" Centro Agrícola Universidad de Pinar del Río , Vol. 31 no. 1, pp 23-25, jun, 2004. [ En línea]. Disponible: <http://cagricola.uclv.edu.cu/index.php/es/volumen-31-2004/numero-1-2004/739-desarrollo-del-cultivo-de-brasica-juncea-l-mostaza-en-condiciones-tropicales> [Acceso: 8 noviembre 2021].
- [41] A. Gabriell, C. Frías y R. Salgado " Conceptos básicos de las relaciones agua-suelo-planta", Estacion experimental agropecuaria Santiago del Estero, Vol. 1 no. 93, Octubre 2016, pp 1- 34. [En línea]. Disponible: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_conceptos\\_basicos\\_de\\_las\\_relaciones\\_agua\\_suelo\\_planta.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_conceptos_basicos_de_las_relaciones_agua_suelo_planta.pdf) [Acceso: 8 noviembre 2021].
- [42] C. Tibamoza, *Propiedades químicas del suelo, interpretación de hipótesis del nivel de fertilidad*. [Trabajo de grado]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Pamplona, Colombia, 2020. [PDF]
- [43] N.W Osorio "pH del suelo y disponibilidad de nutrientes", Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal Volumen 1 no 4. Abril 30, 2012, pp 1-4.[En línea].

Disponible:<https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/pH-del-suelo-y-nutrientes.pdf> [Acceso: 8 noviembre 2021].

[44] S.S María Desanparados, "pH del suelo", Universidad Politécnica de Valencia, Vol 1, pp 1-10.[ En línea]. Disponible: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/102382/Soriano%20-%20pHdel%20suelo.pdf?sequence=1> [Acceso: 8 noviembre 2021]

## **ANEXOS**

## ANEXO 1. SEGUIMIENTO DE LOS TRATAMIENTOS

**Tabla 16.**

*Tratamiento P1.1 (27/09/2021)*

	Fecha: 27/09/2021	Tratamiento: P1.1	N°1
	Hojas: 5 hojas vivas y de un color verde oscuro	Tallo: muestra un color verde claro con un grosor que demuestra una buena salud en la planta.	
	Observaciones generales: La planta se encuentra en buenas condiciones para empezar el proceso de fitorremediación, sus raíces son abundantes y de color blanco.		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P1.

**Tabla 17.**

*Tratamiento P1.2 (27/09/2021)*

	Fecha: 27/09/2021	Tratamiento: P1.2	N°2
	Hojas: 5 hojas vivas y de un color verde oscuro	Tallo: muestra un color verde claro con un grosor que demuestra la salud de la planta	
	Observaciones generales: La planta se encuentra en buenas condiciones para empezar el proceso de fitorremediación, sus raíces son abundantes y de color blanco.		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P1.2

**Tabla 18.***Tratamiento P2.1 (27/09/2021)*

	Fecha: 27/09/2021	Tratamiento: P2.1	N°3
	Hojas: 6 hojas vivas y de un color verde oscuro	Tallo: muestra un color verde claro con un grosor que demuestra la salud de la planta	
	Observaciones generales: La planta se encuentra en buenas condiciones para empezar el proceso de fitorremediación, sus raíces son abundantes y de color blanco.		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P2.1**Tabla 19.***Tratamiento P2.2 (27/09/2021)*

	Fecha: 27/09/2021	Tratamiento: P2.2	N°4
	Hojas: 5 hojas vivas y de un color verde oscuro	Tallo: muestra un color verde claro con un grosor que demuestra la salud de la planta	
	Observaciones generales: La planta se encuentra en buenas condiciones para empezar el proceso de fitorremediación, sus raíces son abundantes y de color blanco.		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P2.2

**Tabla 20.**

*Tratamiento P3.1 (27/09/2021)*

	Fecha: 27/09/2021	Tratamiento: P3.1	N°5
	Hojas: 6 hojas vivas y de un color verde oscuro	Tallo: muestra un color verde claro con un grosor que demuestra la salud de la planta	
	Observaciones generales: La planta se encuentra en buenas condiciones para empezar el proceso de fitorremediación, sus raíces son abundantes y de color blanco.		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P3.1

**Tabla 21.**

*Tratamiento P3.2 (27/09/2021)*

	Fecha: 27/09/2021	Tratamiento: P3.2	N°6
	Hojas: 5 hojas vivas y de un color verde oscuro	Tallo: muestra un color verde claro con un grosor que demuestra la salud de la planta	
	Observaciones generales: La planta se encuentra en buenas condiciones para empezar el proceso de fitorremediación, sus raíces son abundantes y de color blanco.		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P3.2

**Tabla 22.***Tratamiento P1.1 (30/09/2021)*

	Fecha: 30/09/2021	Tratamiento: P1.1	N°7
	Hojas: 5 hojas vivas y de un color verde oscuro		Tallo: muestra un color verde claro con un grosor que demuestra una buena salud en la planta
Observaciones generales: no muestra ninguna peculiaridad al tercer día de ser plantada en un suelo contaminado			

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P1.1**Tabla 23.***Tratamiento P1.2 (30/09/2021)*

	Fecha: 30/09/2021	Tratamiento: P1.2	N°8
	Hojas: 5 hojas vivas, variando el color entre verde oscuro y verde claro		Tallo: muestra un color verde claro con un grosor que demuestra una buena salud en la planta
Observaciones generales: demuestra una variación de color en una de sus hojas al estar las raíces en contacto con el suelo contaminado, logrando evidenciar la falta de pigmentación en una de sus hojas			

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P1.2

**Tabla 24.**

Tratamiento P2.2 (30/09/2021)

	Fecha: 30/09/2021	Tratamiento: P2.2	N°9
	Hojas: 5 hojas vivas, el color de las hojas varía entre verde claro y verde oscuro	Tallo: tiene un color verde claro con un grosor que demuestra la salud de la planta	
	Observaciones generales: las hojas de la planta se están tornando de un color verde claro pero se puede evidenciar la salud y la humedad que tiene las hojas		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P2.2

**Tabla 25.**

Tratamiento P2.1 (30/09/2021)

	Fecha: 30/09/2021	Tratamiento: P2.1	N°10
	Hojas: 5 hojas vivas, el color de las hojas varía entre verde claro y verde oscuro	Tallo: tiene un color verde claro con un grosor que demuestra la salud de la planta	
	Observaciones generales: la planta demuestra una buena adaptación al suelo contaminado		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P2.1

**Tabla 26.**

Tratamiento P3.1 (30/09/2021)

	Fecha: 30/09/2021	Tratamiento: P3.1	N°11
	Hojas: 6 hojas vivas, el color de las hojas es verde oscuro	Tallo: tiene un color verde claro con un grosor que demuestra la salud de la planta	
	Observaciones generales: la planta demuestra una buena aceptación del suelo fértil con el color de hojas más oscuras con respecto a las otras muestras		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P3.1**Tabla 27.**

Tratamiento P3.2 (30/09/2021)

	Fecha: 30/09/2021	Tratamiento: P3.2	N°12
	Hojas: 5 hojas vivas, el color de las hojas es verde oscuro	Tallo: tiene un color verde claro con un grosor que demuestra la salud de la planta	
	Observaciones generales: la planta tiene una buena adaptación al suelo fértil n2, representado por el color de sus hojas y el color de sus raíces		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P3.1

**Tabla 28.***Tratamiento P1.1 (03/10/2021)*

	Fecha: 03/10/2021	Tratamiento: P1.1	N°13
	Hojas: 5 hojas vivas, el color de las hojas es verde pálido	Tallo: presenta una debilidad en unas hojas con una leve ondulación hacia la derecha	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 6 días comienza a presentar una debilidad estructural inclinándose hacia la derecha y resequead en una de sus hojas		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P1.1**Tabla 29.***Tratamiento P1.2 (03/10/2021)*

	Fecha: 03/10/2021	Tratamiento: P1.2	N°14
	Hojas: 5 hojas vivas, el color de las hojas es verde pálido, verde oscuro y amarillo	Tallo: se tornó de un color verde pálido amarillizo, no presenta ninguna irregularidad con su inclinación	
	Observaciones generales: el tallo y las hojas se empiezan a tornar de un color amarillo sin ninguna inclinación		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P1.2

**Tabla 30.***Tratamiento P2.1 (03/10/2021)*

	Fecha: 03/10/2021	Tratamiento: P2.1	N°15
	Hojas: 5 hojas vivas, el color de las hojas es verde claro	Tallo: el tallo se tornó de un color amarillo con un buen grosor demostrando que la planta se está adecuando al suelo	
Observaciones generales: la planta al pasar los 6 días presenta en una de sus hojas una inclinación hacia abajo y un color verde claro			

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P2.1**Tabla 31.***Tratamiento P2.2 (03/10/2021)*

	Fecha: 03/10/2021	Tratamiento: P2.2	N°16
	Hojas: 6 hojas vivas, el color de las hojas es verde claro y verde oscuro	Tallo: el tallo 3 hojas se tornó de un color amarillo con un buen grosor	
Observaciones generales: la planta al pasar los 6 días presenta una inclinación hacia abajo y un color amarillo en 2 hojas, sin ninguna irregularidad en sus otras 4 hojas			

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P2.2

**Tabla 32.**

Tratamiento P3.1 (03/10/2021)

	Fecha: 03/10/2021	Tratamiento: P3.1	N°17
	Hojas: 6 hojas vivas, el color de las hojas es verde claro y verde oscuro	Tallo: tiene un color verde claro con un grosor que demuestra la salud de la planta	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 6 días presento una decoloración y resequedad en una de sus hojas tornándose amarilla con las puntas rojas he inclinándose hacia abajo		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P3.1**Tabla 33.**

Tratamiento P3.2 (03/10/2021)

	Fecha: 03/10/2021	Tratamiento: P3.2	N°18
	Hojas: 5 hojas vivas, el color de las hojas es verde oscuro	Tallo: tiene un color verde claro con un grosor que demuestra la salud de la planta	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 6 días no presentó ninguna irregularidad		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P3.2

**Tabla 34.***Tratamiento P1.1 (06/10/2021)*

	Fecha: 06/10/2021	Tratamiento: P1.1	N°19
	Hojas: 4 hojas vivas, el color de las hojas es verde claro y amarillo	Tallo: tiene un color claro presentando una debilidad en los tallos que soportan las hojas, tiene inclinación hacia la derecha	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 9 demostró una debilidad en su estructura, se le cayó una de sus hojas y en 3 hojas se presentó una resequeidad tornándose de color amarillo pálido		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P1.1**Tabla 35.***Tratamiento P1.2 (06/10/2021)*

	Fecha: 06/10/2021	Tratamiento: P1.2	N°20
	Hojas: 5 hojas vivas, el color de las hojas es verde claro y amarillo	Tallo: tiene un color claro, presenta una disminución en el grosor de dos tallos	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 9 demostró debilidad en dos de sus hojas disminuyendo el grosor del tallo, en una de sus hojas la inclinación hacia abajo hizo que la hoja tocara el suelo y en otra hoja se soporta con el borde del recipiente		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P1.2

**Tabla 36.***Tratamiento P2.1 (06/10/2021)*

	Fecha: 06/10/2021	Tratamiento: P2.1	N°21
	Hojas: 5 hojas vivas, el color de las hojas es verde claro	Tallo: el tallo se tornó de un color amarillo claro con una leve inclinación hacia atrás demostrando una debilidad en la estructura	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 9 días comienza a presentar una inclinación en la punta de sus hojas hacia abajo con una decoloración en su pigmentación, eliminando el color verde oscuro y tornándose de color amarillo y verde pálido		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P2.1**Tabla 37.***Tratamiento P2.2 (06/10/2021)*

	Fecha: 06/10/2021	Tratamiento: P2.2	N°22
	Hojas: 5 hojas vivas, el color de sus hojas es verde claro, amarillo y amarillo claro, una de las hojas presenta debilidad	Tallo: el tallo no presenta ninguna inconsistencia de inclinación, se mantiene de un color verde claro y amarillo claro	
	Observaciones generales: la planta empieza al 9 día empieza a presentar un decaimiento en una de sus hojas, volviéndose ligeramente más delgada con un color amarillo logrando ser más visible las venas secundarias de la hoja		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P2.2

**Tabla 38.**

*Tratamiento P3.1 (06/10/2021)*

	Fecha: 06/10/2021	Tratamiento: P3.1	N°23
	Hojas: 5 hojas vivas, las hojas mantiene un color verde oscuro	Tallo: el tallo presenta un buen color y un buen grosor demostrando su aceptación a la tierra sin contaminar	
	Observaciones generales: al pasar 9 días la planta presentó una pérdida en una de sus hojas		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P3.1

**Tabla 39.**

*Tratamiento P3.2 (06/10/2021)*

	Fecha: 06/10/2021	Tratamiento: P3.2	N°24
	Hojas: 6 hojas, el color de las hojas es verde oscuro con un gran tamaño	Tallo: el tallo es de color verde oscuro, presenta una buena estructura y un buen grosor	
	Observaciones generales: la planta al transcurrir los 9 días presenta una buena aceptación de la tierra		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P3.2

**Tabla 40.***Tratamiento P1.1 (09/10/2021)*

	Fecha: 09/10/2021	Tratamiento: P1.1	N°25
	Hojas: 4 hojas vivas, presentan decaimiento y falta de humedad en sus hojas	Tallo: tiene un color amarillo, presenta debilidad y inclinación hacia las paredes del recipiente	
	Observaciones generales: al pasar los 12 días la planta empezó a presentar una sequedad en sus hojas, demostrando que no puede transmitir la humedad presente en la tierra hasta sus hojas		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P1.1**Tabla 41.***Tratamiento P1.2 (09/10/2021)*

	Fecha: 09/10/2021	Tratamiento: P1.2	N°26
	Hojas: 5 hojas, presenta una falta de humedad en dos de sus hojas, las hojas presentan un color verde oscuro, verde claro y amarillo	Tallo: presenta debilidad en dos de sus tallos, disminuyendo el grosor y demostrando una falta de pigmentación.	
	Observaciones generales: al pasar los 12 días la planta presenta resequeidad en una de sus hojas, mientras que las otras tiene una inclinación hacia abajo, dos de sus hojas presentan un buen estado de humectabilidad y el tallo demuestra una buena salud en sus hojas		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P1.2

**Tabla 42.***Tratamiento P2.1 (09/10/2021)*

	Fecha: 09/10/2021	Tratamiento: P2.1	N°27
	Hojas: 5 hojas vivas, las hojas tiene un color verde claro y amarillo	Tallo: el tallo tiene un color verde claro y blanco, tiene una buena inclinación	
	Observaciones generales: al pasar los 12 días la hoja más péquela de la planta se pigmento de un color amarillo, las hojas presentan una inclinación hacia las paredes del recipiente		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P2.1**Tabla 43.***Tratamiento P2.2 (09/10/2021)*

	Fecha: 09/10/2021	Tratamiento: P2.2	N°28
	Hojas: 5 hojas, las hojas presentan un color amarillo y verde claro	Tallo: el tallo tiene un buen grosor y una buena inclinación demostrando que la planta tiene una buena transmisión de los nutrientes desde la raíz hasta las hojas	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 12 días presente una buena pigmentación en dos de sus hojas, una de sus hojas se torna de un color verde pálido el cual hace visible las venas secundarias de la hoja		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P2.2

**Tabla 44.***Tratamiento P3.1 (09/10/2021)*

	Fecha: 09/10/2021	Tratamiento: P3.1	N°29
	Hojas: 5 hojas, color verde oscuro		Tallo: el tallo presenta un buen grosor demostrando una buena salud en la planta
	Observaciones generales: la planta al pasar los 12 días presento una caída en la hoja seca y una buena humectabilidad en sus hojas		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P3.1**Tabla 45.***Tratamiento P3.2 (09/10/2021)*

	Fecha: 09/10/2021	Tratamiento: P3.2	N°30
	Hojas: 6 hojas, el color de las hojas es verde oscuro		Tallo: el tallo presenta un buen grosor y una buena inclinación, el color del tallo es verde claro
	Observaciones generales: la planta al pasar los 12 días presenta una caída total en una de sus hojas y se evidencia el crecimiento de una hoja nueva, demostrando la buena aceptabilidad de la planta		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P3.2

**Tabla 46.***Tratamiento P1.1 (12/10/2021)*

	Fecha: 12/10/2021	Tratamiento: P1.1	N°31
	Hojas: 3 hojas vivas, las hojas muestran un color verde pálido que denota la resequeidad en sus hojas	Tallo: el tallo presenta un grosor delgado y débil con rompimiento en uno de sus tallos y resequeidad en 3 tallos de sus hojas	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 15 días presenta una sequeidad en sus hojas y su tallo, 3 de sus hojas presentan una inclinación hacia abajo demostrando la debilidad del tallo y la falta de humectabilidad en su estructura		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P1.1**Tabla 47.***Tratamiento P1.2 (12/10/2021)*

	Fecha: 12/10/2021	Tratamiento: P1.2	N°32
	Hojas: 4 hojas, el color de las hojas es verde claro y amarillo, tiene sequeidad en 3 hojas	Tallo: el tallo presenta sequeidad y un grosor delgado en 4 de sus tallos	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 15 días presenta sequeidad en 3 de sus hojas con una inclinación hacia abajo, en una de sus hojas presenta una buena humectabilidad demostrando que la planta sigue proporcionando nutrientes hacia sus hojas		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P1.2

**Tabla 48.***Tratamiento P2.1 (12/10/2021)*

	Fecha: 12/10/2021	Tratamiento: P2.1	N°33
	Hojas: 5 hojas, las hojas tiene un color verde claro y amarillo	Tallo: el tallo presenta un buen grosor, con un color verde claro y amarillo con una inclinación hacia la izquierda	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 15 días presenta una inclinación hacia la izquierda sin ninguna irregularidad en la humectabilidad de sus hojas o de su tallo		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P2.1**Tabla 49.***Tratamiento P2.2 (12/10/2021)*

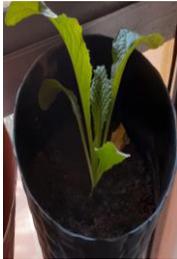
	Fecha: 12/10/2021	Tratamiento: P2.2	N°34
	Hojas: 5 hojas, el color de las hojas es verde claro y amarillo	Tallo: la hoja en 5 tallos presenta un buen grosor y una buena inclinación, demostrando que puede proporcionar de nutrientes a las hojas	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 15 días presente en una de sus hojas resequeadad inclinándose hacia abajo, las otras 5 hojas presentan una buena inclinación y un color verde claro		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P2.2

**Tabla 50.***Tratamiento P3.1 (12/10/2021)*

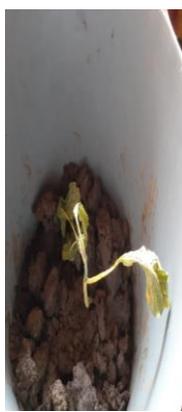
	Fecha: 12/10/2021	Tratamiento: P3.1	N°35
	Hojas: 5 hojas, el color de las hojas es verde oscuro	Tallo: el tallo presenta un buen grosor y una buena inclinación, el color del tallo es verde oscuro, demostrando una buena salud en la planta	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 15 días no presenta ninguna irregularidad a la aceptación del suelo, se ha evidenciado visualmente un crecimiento en la planta		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P3.1**Tabla 51.***Tratamiento P3.2 (12/10/2021)*

	Fecha: 12/10/2021	Tratamiento: P3.2	N°35
	Hojas: 6 hojas, el color de las hojas es verde oscuro	Tallo: el tallo presenta un buen grosor y una buena inclinación, el color del tallo es verde oscuro, demostrando una buena salud en la planta	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 15 días no presenta ninguna irregularidad a la aceptación del suelo, se ha evidenciado visualmente un crecimiento en la planta		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P3.2

**Tabla 52.***Tratamiento P1.1 (16/10/2021)*

	Fecha: 16/10/2021	Tratamiento: P1.1	N°37
	Hojas: 1 hoja viva, la hoja presentan un color verde pálido y falta de humectabilidad, se cayeron 2 hojas	Tallo: el tallo presenta una debilidad en sus estructura con un grosor delgado y seco, demostrando una inclinación hacia abajo	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 19 días presenta una falta de humectabilidad en sus tallos y sus hojas, la planta tuvo una pérdida de 2 hojas dejando solo una hoja viva		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P1.1**Tabla 53.***Tratamiento P1.2 (16/10/2021)*

	Fecha: 16/10/2021	Tratamiento: P1.2	N°38
	Hojas: 3 hojas, el color de las hojas es verde claro y amarillo	Tallo: el tallo presenta un grosor delgado demostrando la falta adquisición de humedad por 2 de sus tallos y 3 tallos presentan una inclinación adecuada con un grosor lo suficientemente grueso para soportar las hojas	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 19 días presenta una falta de humectabilidad en sus tallos y en sus hojas demostrando que la planta no puede transmitir la humedad y nutrientes desde el suelo hasta diversas zonas de la planta		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P1.2

**Tabla 54.***Tratamiento P2.1 (16/10/2021)*

	Fecha: 16/10/2021	Tratamiento: P2.1	N°39
	Hojas: 3 hojas, el color de las hojas es verde claro, se cayó una hoja	Tallo: el tallo presenta un buen grosor en la parte visual de la planta, teniendo una mayor inclinación hacia la izquierda	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 19 días presentó un rompimiento de uno de sus tallos, las 2 de sus hojas vivas presentan una buena salud mientras que una de sus hojas presenta sequedad en su estructura		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P2.1**Tabla 55.***Tratamiento P2.2 (16/10/2021)*

	Fecha: 16/10/2021	Tratamiento: P2.2	N°40
	Hojas: 5 hojas, el color de las hojas es verde claro	Tallo: el tallo presenta un buen grosor y una buena inclinación, el color del tallo es verde claro	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 19 días presenta una visualización de las venas secundarias en dos de sus hojas, presentado en una de las hojas falta de humectabilidad y en la otra hoja una inclinación hacia la pared del recipiente		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P2.2

**Tabla 56.***Tratamiento P3.1 (16/10/2021)*

	Fecha: 16/10/2021	Tratamiento: P3.1	N°41
	Hojas: 6 hojas, el color de las hojas es verde oscuro	Tallo: el tallo que presenta la planta demuestra tener una buena salud y un buen grosor, representando la buena adaptabilidad de la planta en un suelo no contaminado	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 19 días no presenta ninguna irregularidad a la aceptación del suelo, se ha evidenciado visualmente un crecimiento en la planta, demostrando la buena adaptabilidad que tuvo la planta en un suelo que no tiene contaminantes de metales pesados y lodo de perforación que tenga como contenido la barita		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P3.1**Tabla 57.***Tratamiento P3.2 (16/10/2021)*

	Fecha: 16/10/2021	Tratamiento: P3.2	N°42
	Hojas: 5 hojas, el color de las hojas es verde oscuro, se puede evidenciar la parda de una de sus hojas	Tallo: el tallo presenta un buen grosor y una buena inclinación, el color del tallo es verde oscuro, demostrando una buena salud en la planta	
	Observaciones generales: la planta al pasar los 19 días no presenta ninguna irregularidad a la aceptación del suelo, se ha evidenciado visualmente un crecimiento en la planta, demostrando la que la planta en este tipo de suelos tiene una óptima transferencia de nutrientes.		

**Nota.** Esta Tabla muestra el seguimiento de proceso de fitorremediación P3.2

## **ANEXO 2. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda utilizar un agente externo como el humus para aumentar el pH del suelo, y evitar la movilidad de los metales pesados en las muestras contaminadas con metales pesados.
- Monitorear la concentración de cadmio y de cromo presente en la estructura de la planta, para determinar la cantidad de metales pesados que logro absorber la planta en el proceso de fitorremediación.
- Seguir con la investigación, variando la concentración de metales pesados en cada nivel del tratamiento, obteniendo la concentración de las muestras en el borde del recipiente que contenga la muestra.
- Para un proceso de fitorremediación en un suelo contaminado con fluido de perforación es necesario aumentar el pH del suelo por medio de Humus de lombriz que tiene un pH neutro, que ayuda a que las plantas puedan absorber los metales pesados presentes en el suelo y logren cumplir con el proceso de fitorremediación, y para tratamientos con un pH extremadamente ácido se recomienda obtener la muestra de suelo de la parte inferior del recipiente que contenga la muestra contaminada.