



**Efecto de la inoculación microbiana sobre las características edafológicas y variables dasométricas de tres especies arbóreas plantadas en suelos perturbados de la Amazonía ecuatoriana**

Bastidas Granada, Anahí Marisel

Departamento de Ciencias de la Vida y la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Agropecuaria

Ing. Villacís Buenaño, Jaime Emiliano, Ph. D.

08 de septiembre de 2021



### Document Information

Analyzed document	TESIS SUELOS 29-07-2021 URKUNG.docx (D110857618)
Submitted	7/29/2021 10:38:00 PM
Submitted by	
Submitter email	jevillacis@espe.edu.ec
Similarity	7%
Analysis address	jevillacis.espe@analysis.orkund.com

### Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Perfil Anteproyecto Bastidas Anahí.docx</b> Document Perfil Anteproyecto Bastidas Anahí.docx (D77813404) Submitted by: paperez11@espe.edu.ec Receiver: paperez11.espe@analysis.orkund.com	 24
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS KIQUE BIBLIOTECA.docx</b> Document TESIS KIQUE BIBLIOTECA.docx (D36477547) Submitted by: jevillacis@espe.edu.ec Receiver: jevillacis.espe@analysis.orkund.com	 6
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS DIVERSIDAD DE HONGOS - SOSA VALERIA - 09-08-2018.pdf</b> Document TESIS DIVERSIDAD DE HONGOS - SOSA VALERIA - 09-08-2018.pdf (D40778087) Submitted by: jevillacis@espe.edu.ec Receiver: jevillacis.espe@analysis.orkund.com	 1
<b>W</b>	URL: <a href="https://docplayer.es/74731450-Evaluacion-de-un-sistema-de-bioestimulacion-que-permita-el-manejo-y-uso-de-ripios-de-perforacion-en-base-agua-de-pozos-petroleros.html">https://docplayer.es/74731450-Evaluacion-de-un-sistema-de-bioestimulacion-que-permita-el-manejo-y-uso-de-ripios-de-perforacion-en-base-agua-de-pozos-petroleros.html</a> Fetched: 7/12/2021 4:10:01 PM	 2
<b>W</b>	URL: <a href="https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/3344/Villac%20Buena%20B1o.%20Evaluaci%20de%20las%20t%C3%A9cnicas%20de%20remediaci%20vegetal%20utilizadas%20en%20plataformas%20petroleras...%20.pdf?sequence=1&amp;isAllowed=y">https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/3344/Villac%20Buena%20B1o.%20Evaluaci%20de%20las%20t%C3%A9cnicas%20de%20remediaci%20vegetal%20utilizadas%20en%20plataformas%20petroleras...%20.pdf?sequence=1&amp;isAllowed=y</a> Fetched: 10/6/2019 10:27:57 PM	 1
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS Remache Ana 14-10-2020.docx</b> Document TESIS Remache Ana 14-10-2020.docx (D81693337) Submitted by: jevillacis@espe.edu.ec Receiver: jevillacis.espe@analysis.orkund.com	 2
<b>W</b>	URL: <a href="https://worldwidescience.org/topicpages/c/compuesto%2Bpor%2Bsuelo.html">https://worldwidescience.org/topicpages/c/compuesto%2Bpor%2Bsuelo.html</a> Fetched: 6/25/2021 7:01:54 AM	 1

Firma:



Firmado electrónicamente por:  
**JAIME EMILIANO  
VILLACIS  
BUENANO**

Villacís Buenaño, Jaime Emiliano

DIRECTOR



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Efecto de la inoculación microbiana sobre las características edafológicas y variables dasométricas de tres especies arbóreas plantadas en suelos perturbados de la Amazonía ecuatoriana”** fue realizado por la señorita **Bastidas Granada, Anahí Marisel**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 11 de agosto de 2021

Firma:



Firmado electrónicamente por:  
**JAIME EMILIANO  
VILLACIS  
BUENANO**

---

**Villacís Buenaño, Jaime Emiliano, Ph.D.**

CC: 1710004076



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Bastidas Granada, Anahí Marisel**, con cédula de ciudadanía n° 1727589846, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Efecto de la inoculación microbiana sobre las características edafológicas y variables dasométricas de tres especies arbóreas plantadas en suelos perturbados de la Amazonía Ecuatoriana”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas. Consecuentemente, el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 08 de septiembre de 2021

Firma:

**Bastidas Granada Anahí Bastidas**

CC: 1727589846



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo, **Bastidas Granada, Anahí Marisel**, con cédula de ciudadanía n° 1727589846, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Efecto de la inoculación microbiana sobre las características edafológicas y variables dasométricas de tres especies arbóreas plantadas en suelos perturbados de la Amazonía Ecuatoriana”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 08 de septiembre de 2021**

Firma:

**Bastidas Granada Anahí Bastidas**

CC: 1727589846

## **Dedicatoria**

*A mis padres, Fanny y Jorge, por todo su amor y apoyo incondicional durante cada etapa del transcurso de la carrera universitaria. Agradezco los valores inculcados en mi persona y cada consejo dado que me ha ayudado a crecer como persona y como profesional, y me ha permitido avanzar a través de los diversos caminos de la vida para alcanzar mis metas.*

*A toda mi familia, por los ánimos y sabias palabras de apoyo.*

## **Agradecimientos**

A Dios y a la Virgen María por guiar mi camino en cada momento de la vida.

A mis padres, por su inmenso amor y creer en mi de manera incondicional.

A la Carrera de Ingeniería Agropecuaria-IASA I de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, por instruirme con los conocimientos requeridos para el perfil profesional durante el transcurso de la carrera.

Al Dr. Jaime Villacís, director de la tesis, por su tiempo, apoyo, guía y consejos dados durante todo el proceso de realización del proyecto de investigación.

A Petroamazonas EP, por permitirme realizar mi trabajo de titulación dentro de sus instalaciones y facilitar el desarrollo del mismo.

Al Ing. Julio Pazmiño y Dr. Carlos Chiriboga, por su tiempo, guía y supervisión para la elaboración de la tesis.

Al Ing. Pablo Landázuri y al Lic. Marco Taco por su guía y consejos en el procesamiento de muestras y desarrollo de la tesis.

A mis amigas, Ariatna, Michelle y Jaimmy, por todos los momentos inigualables y todo el apoyo dado a través de cada año de nuestra amistad y a pesar de la distancia.

A mis amigos, Deisy, Sofía, Darwin, Daniel y Damián, por su amistad y el ánimo brindado a cada momento.

A todos mis amigos que he conocido durante la etapa del colegio y la universidad, por estar presentes en mi vida y compartir momentos que han permitido reforzar una amistad verdadera.

## Índice de Contenido

Carátula.....	1
Resultado Urkund.....	2
Certificación .....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimientos.....	7
Índice de contenido.....	8
Índice de tablas.....	13
Índice de figuras.....	15
Resumen.....	16
Abstract.....	17
Capítulo I .....	18
Introducción.....	18
Antecedentes .....	18
Planteamiento y justificación del problema .....	19
Objetivos.....	21
<i>Objetivo General</i> .....	21
<i>Objetivos Específicos</i> .....	21

Hipótesis.....	21
<i>Hipótesis nula.....</i>	<i>21</i>
<i>Hipótesis alterna.....</i>	<i>22</i>
Capítulo II.....	23
Marco referencial.....	23
Suelos.....	23
<i>Suelos de la región amazónica .....</i>	<i>23</i>
<i>Suelos perturbados.....</i>	<i>23</i>
<i>Unidades de tratamiento de suelos contaminados (UTSC).....</i>	<i>24</i>
<i>Plataformas circunscritas a pozos petroleros (PCPP).....</i>	<i>24</i>
<i>Celdas de lodos y ripios (CLR) .....</i>	<i>25</i>
Especies arbóreas .....	25
<i>Características de las especies.....</i>	<i>25</i>
Chíparo ( <i>Zygia longifolia</i> ).....	26
Guarango Espinado ( <i>Piptadenia pteroclada</i> ).....	26
Caoba ( <i>Platymiscium pinnatum</i> ).....	26
Impacto ambiental de las actividades petroleras .....	27
Hidrocarburos .....	27
Metales pesados .....	28
<i>Cadmio (Cd), plomo (Pb) y níquel (Ni) .....</i>	<i>29</i>

	10
<b>Biorremediación.....</b>	<b>30</b>
<i>Técnicas de biorremediación.....</i>	<b>30</b>
<b>Bioestimulación.....</b>	<b>30</b>
<b>Bioaumentación.....</b>	<b>31</b>
<b>Fitorremediación.....</b>	<b>31</b>
<i>Formas de fitorremediación.....</i>	<b>31</b>
<b>Fitoextracción.....</b>	<b>31</b>
<b>Fitovolatilización.....</b>	<b>32</b>
<b>Fitoestabilización.....</b>	<b>33</b>
<b>Fitodegradación.....</b>	<b>33</b>
<b>Rizofiltración.....</b>	<b>33</b>
<b>Micorremediación .....</b>	<b>34</b>
<b>Importancia de los microorganismos en suelos perturbados .....</b>	<b>34</b>
<i>Interacción entre los microorganismos e hidrocarburos.....</i>	<b>35</b>
<b>Comunidades microbianas afines a compuestos hidrocarburíferos.....</b>	<b>35</b>
<b>Importancia de los parámetros evaluados en el suelo .....</b>	<b>36</b>
<i>pH.....</i>	<b>36</b>
<i>Conductividad eléctrica (CE) .....</i>	<b>37</b>
<i>Materia orgánica.....</i>	<b>38</b>
<i>Nitrógeno (N) .....</i>	<b>39</b>
<i>Fósforo (P) .....</i>	<b>40</b>

	11
<b>Potasio (K)</b> .....	<b>41</b>
<b>Dasometría</b> .....	<b>41</b>
<b>Variables dasométricas</b> .....	<b>42</b>
<b>Diámetro a la altura del pecho (DAP)</b> .....	<b>42</b>
<b>Altura del árbol</b> .....	<b>42</b>
<b>Área basal</b> .....	<b>42</b>
<b>Volumen de madera</b> .....	<b>43</b>
<b>Capítulo III</b> .....	<b>44</b>
<b>Metodología</b> .....	<b>44</b>
<b>Ubicación política</b> .....	<b>44</b>
<b>Ubicación geográfica</b> .....	<b>44</b>
<b>Ubicación ecológica</b> .....	<b>45</b>
<b>Materiales y métodos</b> .....	<b>45</b>
<b>Selección de especies arbóreas</b> .....	<b>45</b>
<b>Selección de sitios de muestreo</b> .....	<b>46</b>
<b>Selección de parcelas y subparcelas en los sitios</b> .....	<b>46</b>
<b>Aplicación del inóculo</b> .....	<b>47</b>
<b>Toma de muestras de suelo</b> .....	<b>48</b>
<b>Variables dasométricas evaluadas</b> .....	<b>49</b>
<b>Variables edafológicas evaluadas</b> .....	<b>50</b>
<b>Diseño experimental</b> .....	<b>55</b>

	12
<i>Análisis de datos</i> .....	56
<b>Capítulo IV</b> .....	<b>57</b>
<b>Resultados y Discusión</b> .....	<b>57</b>
<b>Resultados</b> .....	<b>57</b>
<i>Altura, DAP, área basal y volumen de madera</i> .....	<b>57</b>
<i>pH, CE y materia orgánica</i> .....	<b>59</b>
<i>Nitrógeno y fósforo</i> .....	<b>62</b>
<i>Potasio</i> .....	<b>65</b>
<i>Hidrocarburos totales y metales pesados</i> .....	<b>65</b>
<i>Correlaciones entre variables dasométricas y edafológicas</i> .....	<b>66</b>
<b>Discusión</b> .....	<b>67</b>
<i>Desempeño de las especies arbóreas</i> .....	<b>68</b>
<i>Efecto del tipo de suelo en las variables edafológicas y contenido de contaminantes</i> ....	<b>69</b>
<b>Capítulo V</b> .....	<b>74</b>
<b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	<b>74</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>74</b>
<b>Recomendaciones</b> .....	<b>75</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>76</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b>	<i>Ubicación geográfica de cada parcela de muestreo.....</i>	44
<b>Tabla 2</b>	<i>Características y contenido de nutrientes del inóculo aplicado.....</i>	48
<b>Tabla 3</b>	<i>Análisis de varianza para las variables dasométricas de tres especies arbóreas ubicadas sobre suelos perturbados por actividades de extracción petrolera.....</i>	57
<b>Tabla 4</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar de la altura, DAP, área basal y volumen de madera de tres especies arbóreas plantadas en cuatro sitios afectados por las actividades de extracción petrolera.....</i>	58
<b>Tabla 5</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar de la altura, DAP, área basal y volumen de madera de tres especies arbóreas presentes en suelos perturbados.....</i>	58
<b>Tabla 6</b>	<i>Análisis de varianza para las variables pH, CE y materia orgánica presente en suelos perturbados con tres especies arbóreas.....</i>	59
<b>Tabla 7</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar del pH, CE y materia orgánica presentes en suelos de cuatro sitios afectados por actividades petroleras.....</i>	60
<b>Tabla 8</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar de conductividad eléctrica de suelos aledaños a tres especies arbóreas o claros intermedios provenientes de cuatro sitios afectados por actividades de extracción petrolera.....</i>	60
<b>Tabla 9</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar de la conductividad eléctrica en suelos aledaños a tres especies arbóreas y claros intermedios ubicados en suelos perturbados.....</i>	61

<b>Tabla 10</b>	<i>Análisis de varianza para contenido de nitrógeno y fósforo de los suelos aledaños a tres especies arbóreas ubicadas sobre suelos perturbados.....</i>	62
<b>Tabla 11</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar del contenido de nitrógeno en suelos aledaños a tres especies arbóreas o claros intermedios provenientes de cuatro sitios perturbados.....</i>	63
<b>Tabla 12</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar del contenido de fósforo presente en suelos de cuatro sitios afectados por actividades de extracción petrolera.....</i>	64
<b>Tabla 13</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar de nitrógeno y fósforo en suelos inoculados y no inoculados provenientes de tres especies arbóreas o claros intermedios de zonas perturbadas por actividades de petróleo.....</i>	64
<b>Tabla 14</b>	<i>Resultados de potasio obtenidos en sitios perturbados y no perturbados.....</i>	65
<b>Tabla 15</b>	<i>Coefficientes de correlación de Pearson para variables dasométricas y edafológicas de tres especies arbóreas en cuatro sitios perturbados por actividad petrolera.....</i>	66

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Disposición en campo de las subparcelas de muestreo dentro del sitio de estudio.....</i>	47
---	----

## Resumen

Las actividades antropogénicas de la extracción de petróleo modifican el equilibrio del ecosistema al causar un impacto ambiental en sus alrededores. Al introducir tierra negra de bosque natural que contiene diversidad de microorganismos como técnica de biorremediación, progresivamente permite mitigar el grado de contaminación causado por las actividades petroleras. Como parte del programa de restauración de zonas perturbadas en la Amazonía ecuatoriana, en el presente estudio se evaluó el efecto de tierra de bosque natural sobre las características físico-químicas de suelos perturbados aledaños a las especies arbóreas *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia*. Para ello, se recolectaron 96 muestras de suelos contaminados por actividades de extracción petrolera (32 en celdas de lodos y ripios, 32 en unidades de tratamiento de suelos contaminados y 32 en plataformas circunscritas a pozos petroleros) y 32 muestras provenientes de suelos de potreros (testigo). Adicionalmente, se determinó el contenido de hidrocarburos, cadmio, plomo y níquel en las muestras de suelos perturbados. Se encontró un efecto significativo de la concentración de nitrógeno y fósforo en los suelos; sin embargo, no existió significancia para el tipo de sitio y especie arbórea. La especie arbórea *Piptadenia pteroclada* obtuvo mayor desarrollo en las variables de: altura (12.29 m), DAP (0.18 m), área basal (0.033 m<sup>2</sup>), volumen de madera (0.26 m<sup>3</sup>) y contenido de nitrógeno (0.15 %); mientras que, la especie *Zygia longifolia* mostró el valor más alto para la conductividad eléctrica (0.16 ds/m). De manera general, se concluye que se encontró una disminución de contaminantes y un incremento de nutrientes en los suelos de los sitios perturbados debido a la inoculación de tierra negra proveniente de bosque natural.

**Palabras clave:** *Biorremediación, Fitorremediación, Suelos perturbados, Contaminantes de hidrocarburos, Familia Fabaceae.*

### Abstract

The anthropogenic activities of oil extraction modify the balance of the ecosystem by causing an environmental impact on its surroundings. By introducing black soil from natural forests containing a diversity of microorganisms as a bioremediation technique, the degree of contamination caused by oil activities can be progressively mitigated. As part of the restoration program of disturbed areas in the Ecuadorian Amazon, this study evaluated the effect of natural forest soil on the physico-chemical characteristics of disturbed soils surrounding the tree species *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* and *Zygia longifolia*. Therefore, 96 samples were collected from soils contaminated by oil extraction activities (32 on mud and drill cutting cells, 32 contaminated soil treatment units and 32 on platforms surrounding oil wells) and 32 samples from pasture soils (control). Additionally, the content of hydrocarbons, cadmium, lead and nickel was determined in the disturbed soil samples. A significant effect of nitrogen and phosphorus concentration in the soils was found; however, there was no significance for the type of site and tree species. The tree species that obtained the best development in disturbed soils was *Piptadenia pteroclada* for the following variables: height (12.29 m), DBH (0.18 m), basal area (0.033 m<sup>2</sup>), wood volume (0.26 m<sup>3</sup>) and nitrogen content (0.15 %); while the species *Zygia longifolia* showed the highest value for electrical conductivity (0.16 ds/m). In general, it's concluded that there was a decrease of contaminants and an increase of nutrients in the soils of the disturbed sites due to the inoculation of black soil from natural forest.

**Key words:** *Bioremediation, Phytoremediation, Disturbed soils, Hydrocarbon contaminants, Fabaceae family.*

## Capítulo I

### Introducción

#### Antecedentes

Desde la década de 1970 la explotación de petróleo se ha convertido en parte de las actividades económicas del país y con el transcurso del tiempo se han ido incrementando tanto las explotaciones de yacimientos como su exportación (Guaranda, 2016). En Ecuador para finales del 2019, el petróleo crudo representó el 7.7% del PIB nacional, produciéndose 193.816 millones de barriles, de los cuales se exportaron 139.8 millones de barriles; estas cifras incluyen tanto a la empresa pública Petroamazonas EP como a compañías privadas (Banco Central del Ecuador, 2020).

No obstante, el incremento de las actividades hidrocarburíferas ha producido una mayor contaminación del medio ambiente, ya que los procesos de extracción de petróleo generan contaminantes de tipo gaseoso, líquido y sólido que producen un impacto ambiental que puede tardar años en ser restaurado (Fu et al., 2014). La presencia de hidrocarburos afecta las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; por lo que, la industria hidrocarburífera está sujeta a procesos de control que mejoren sus prácticas para disminuir o impedir daños por contaminación ambiental (Klamerus et al., 2015).

Petroamazonas EP mantiene un proyecto de remediación ambiental denominado como Amazonía Viva, que a partir del año 2000 ha implementado programas de reforestación que permiten mitigar el impacto ambiental y social de la contaminación causada por la extracción petrolera en la Amazonía (Petroamazonas EP, 2018). La metodología que ha empleado Petroamazonas EP para la restauración de

zonas perturbadas, desde el año 2013 hasta el 2019 alcanzó la eliminación de 958 fuentes de contaminación y una remediación aproximada de 1,300.000 m<sup>3</sup> de suelo contaminado (Petroamazonas EP, 2020). Adicionalmente, desde el año 2017 se han implementado procesos de biorremediación para zonas afectadas que han logrado como resultado un mayor grado de efectividad en la recuperación de suelos contaminados (Villacís et al., 2016a; Espinoza, 2018).

Existen métodos de restauración de suelos contaminados como la atenuación natural, que utiliza fenómenos físicos y químicos para reducir contaminantes (Rahman y Singh, 2020). Sin embargo, estas técnicas requieren de equipos o dispositivos de alto costo que causan destrucción de la estructura del suelo, pérdidas de diversidad, consumo de energía y en ocasiones contaminantes secundarios (Du et al., 2011). Por tanto, la remediación mediante el uso de microorganismos es una alternativa viable al resultar más económica y efectiva para la recuperación y conservación de la calidad del suelo (Chaudhary & Kim, 2019).

### **Planteamiento y justificación del problema**

La actividad de extracción petrolera afecta a los suelos de la zona al causar una severa erosión de los mismos debido a la deforestación de zonas boscosas para la construcción de áreas adecuadas para la infraestructura petrolera y las correspondientes vías de acceso (Bravo, 2007). Adicionalmente, los suelos son afectados por los contaminantes de los derrames ocasionados, que afectan tanto a sus propiedades como a la población microbiana, causando un desequilibrio del ecosistema (Moñino & Galdos, 2008; Rosell-Melé et al., 2018). La presencia de compuestos hidrocarbúricos en el suelo limita la mineralización de los nutrientes y causa toxicidad

en la microbiota presente, al inducir cambios a nivel celular en sus membranas, enzimas y proteínas, lo que afecta la diversidad microbiana y altera la cadena trófica (Zamora et al., 2012).

Existen programas de reforestación actualmente en la Amazonía que han tenido éxito de supervivencia en varias de las especies arbóreas empleadas (Villacís et al., 2016b). Adicionalmente, mediante la técnica de remediación biológica se ha inoculado tierra negra de bosque natural en los suelos perturbados, buscando promover la proliferación de una biomasa microbiana del suelo (Wubs et al., 2016). Esto con la finalidad de que los microorganismos constituyan un indicador biológico de las condiciones y calidad del suelo y del nivel de biodegradación alcanzada (Wu et al., 2019). La microbiota introducida aumenta la producción de biosurfactantes o bioestimulantes, lo cual a su vez incrementa la disponibilidad de la utilización de los hidrocarburos como una fuente de carbono y reduce el contenido de contaminantes en los suelos perturbados de la zona (Wu et al., 2019; Bhattacharya et al., 2019).

El manejo de las comunidades microbianas representa un punto clave para los procesos de remediación de los suelos contaminados por actividades petroleras (Tang et al., 2019). Asimismo, dentro del programa de restauración de zonas perturbadas vigente en la Amazonía, se han realizado estudios previos que han presentado un incremento en la diversidad de morfoespecies fúngicas endo y ectorizosféricas debido a la aplicación del inóculo de tierra negra (Remache, 2020; Vega, 2021). Sin embargo, se desconocía el impacto de la tierra negra de bosque natural sobre los suelos perturbados aledaños a las tres especies arbóreas de interés. Por lo tanto, en la presente investigación se evalúa el efecto del inóculo de tierra negra sobre las características edafológicas y variables dasométricas en ocho sitios perturbados y no perturbados, para

obtener información válida que pueda ser empleada en los programas de restauración efectiva para suelos contaminados de la Amazonía del Ecuador.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Evaluar el efecto de la inoculación microbiana en suelos perturbados sobre las características edafológicas y variables dasométricas de tres especies arbóreas en la Amazonía ecuatoriana.

### ***Objetivos Específicos***

Evaluar el efecto de la inoculación microbiana sobre las propiedades químico-físicas del suelo y el crecimiento de tres especies arbóreas.

Determinar la cantidad de contaminantes hidrocarburíferos y metales pesados presentes en suelos inoculados de tres especies arbóreas.

Establecer la asociación entre las variables edafológicas y el crecimiento de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos perturbados.

## **Hipótesis**

### ***Hipótesis nula***

La inoculación de tierra negra de bosque natural en los suelos perturbados de las tres especies arbóreas no incrementa el contenido de nutrientes ni disminuye la cantidad de contaminantes en los suelos.

***Hipótesis alterna***

La inoculación de tierra negra de bosque natural en los suelos perturbados de las tres especies arbóreas incrementa el contenido de nutrientes y disminuye la cantidad de contaminantes en los suelos.

## Capítulo II

### Marco Referencial

#### Suelos

##### ***Suelos de la región amazónica***

La región amazónica posee suelos cuyo origen pueden ser volcánicos, arcillosos o de roca sólida (Vargas et al., 2018). La mayoría de estos suelos pertenecen a los siguientes órdenes: inceptisoles, histosoles, mollisoles, entisoles y oxisoles (Díaz, 2018).

Según Díaz (2018), entre los usos más representativos del suelo amazónico se encuentran: producción forestal (41%), pastos (20%) y uso agrícola (10%). Estos suelos son considerados químicamente pobres debido a las altas precipitaciones en la zona que causan lixiviación del suelo y al poco contenido de materia orgánica por la biota presente y las altas temperaturas (Vargas et al., 2018).

La provincia de Orellana posee suelos arcillosos, de baja fertilidad, excesiva humedad, con contenidos de aluminio y una coloración parda amarillenta o rojiza. Mientras que, en la provincia de Sucumbíos los suelos son poco profundos, rocosos, erosionados, con excesiva agua y presencia de aluminio soluble y de una coloración entre amarillenta a negruzca (Díaz, 2018).

##### ***Suelos perturbados***

Los suelos perturbados se consideran a aquellos afectados por actividades antropogénicas como las hidrocarburíferas, donde la biomasa presente puede verse afectada por la cantidad de nutrientes, temperatura, pH, contenido de sales, cantidad de

oxígeno, tamaño y distribución de partículas y por la biodisponibilidad de los contaminantes (Romaniuk et al., 2007).

A pesar de que la contaminación sea mínima, pueden surgir efectos en las propiedades físicas del suelo, como pérdida de la capacidad de retención del agua y de la permeabilidad o la compactación debido a que los compuestos hidrocarbúricos ocupan los espacios porosos de los agregados (Velásquez, 2017). Adicionalmente, surgen pérdidas de los minerales, de la materia orgánica y bloqueos en el intercambio de gases del suelo con la atmósfera (Vázquez et al., 2011).

#### ***Unidades de tratamiento de suelos contaminados (UTSC)***

Las UTSC son áreas impermeables donde se concentran los suelos contaminados por petróleo crudo y/o derivados producto de derrames ocasionados; y en los cuales, se realizan procesos de separación de los contaminantes del suelo (Villacís et al., 2016a). Parte del proceso comprende aplicar técnicas biológicas, que implican la adición progresiva de agregados para incrementar la degradación de los hidrocarburos o metales pesados hasta lograr rangos de concentraciones permitidas por el Ministerio del Ambiente (Petroamazonas EP, 2018).

#### ***Plataformas circunscritas a pozos petroleros (PCPP)***

Las PCPP son suelos aledaños a los pozos petroleros, que comprenden un área por donde la maquinaria abrió camino para llevar a cabo los procesos de limpieza de la vegetación para la instalación de las plataformas de perforación de los pozos, áreas de almacenamiento del petróleo y la correspondiente infraestructura (Ulcuango et al., 2014). No obstante, son suelos propios de la zona con una coloración usualmente rojiza, con escasa presencia de residuos vegetales y que sufrieron compactación por el

deterioro del uso regular; además, son sitios que no contienen contaminantes de petróleo o sus derivados (Villacís et al., 2016a).

### ***Celdas de lodos y ripios (CLR)***

Las CLR son zonas excavadas e impermeables para el almacenamiento de los desechos de compuestos obtenidos del petróleo que pueden contener sólidos secos, cortes de perforaciones o cortes húmedos (Ballesteros, 2009). Estos residuos presentan altas cantidades de hidrocarburos (TPH's y/o HAP's) y metales pesados (Cd, Cr, Ni, Y, Ba); donde se adicionarán silicatos y/o aditivos para regular el nivel de pH y lograr una mezcla estabilizada de los desechos (Ballesteros, 2009; Villacís et al., 2016b).

### **Especies arbóreas**

#### ***Características de las especies***

Las especies seleccionadas son: guarango espinudo (*Piptadenia pteroclada*), caoba (*Platymiscium pinnatum*) y chíparo (*Zygia longifolia*). Las tres especies arbóreas pertenecen a la clase Magnoliopsida, orden Fabales y familia Fabaceae, además de que, son empleadas principalmente en sistemas agroforestales o para uso maderable (Sosa, 2018).

Según estudios realizados por Espinoza (2018), las tres especies arbóreas hasta el quinto año de edad presentaron una supervivencia mayor al 80% en zonas contaminadas con hidrocarburos; además de que, incrementaron el contenido de materia orgánica, pH, nitrógeno y fósforo en los suelos. Las tres especies arbóreas son nativas de la región amazónica y se adaptan a los sitios perturbados (Villacís et al., 2016a).

**Chíparo (*Zygia longifolia*).** *Zygia longifolia* es un árbol con un potencial maderable que se encuentra distribuido en la zona tropical de Centroamérica y Sudamérica (UICN, 2015). Presenta hojas semicaducifolias, copa frondosa, altura de 15 a 20 m, una longevidad mayor a 60 años y una densidad de madera promedio de 0.71 g/cm<sup>3</sup> (Sosa, 2018; UICN, 2015). Además, presenta usos funcionales para controlar deslaves, reforestar zonas y adaptarse a suelos secos y arenosos debido a su sistema radicular resistente y a su capacidad para retener agua (Paredes-Leguizamón, 2018).

**Guarango Espinado (*Piptadenia pteroclada*).** El guarango espinado es una especie arbórea maderable de Sudamérica que alcanza los 25 m de altura y 0.60 m de DAP; es ideal para terrenos inestables debido a su sistema radicular extenso y pivotante que adquiere agua de horizontes profundos y le permite sujetarse a los distintos tamaños de partículas del suelo (Palacios, 2011; Sosa, 2018).

Es una especie tolerante a suelos secos y que se emplea en programas de reforestación de zonas con escasa fertilidad. Adicionalmente, presenta una copa medianamente densa y de distribución irregular, que proporciona suficiente hojarasca para materia orgánica y también, es una especie que produce madera de alta calidad para ser usada en la construcción o mueblería (Espinoza, 2018).

**Caoba (*Platymiscium pinnatum*).** Esta especie arbórea se encuentra ubicada en Centroamérica y Sudamérica, puede alcanzar una altura máxima de 35 m y 0.80 m de diámetro y se adapta apropiadamente a zonas bien drenadas con pendientes menores al 30% (Sosa, 2018; Villacís, 2016).

Son árboles que producen madera empleada para muebles, trabajos de carpintería y como parte estructural de las embarcaciones (Palacios, 2011). Esta

especie es utilizada en programas de reforestación y en sistemas agroforestales debido a sus copas ramificadas y de abundante densidad de hojas, que le permiten dar sombra y generar cantidades ideales de hojarasca para incrementar la materia orgánica (UICN, 2015).

### **Impacto ambiental de las actividades petroleras**

Según Vargas et al. (2018), el desarrollo de las actividades de extracción petrolera provoca una deforestación de zonas destinadas para actividades agropecuarias determinadas como la siembra de cultivos y ganadería; además de, influir en la pérdida de la calidad de los bosques y causar contaminación de las aguas subterráneas.

Las actividades petroleras tienen consecuencias en los suelos de la zona como: pérdida de la fertilidad (física y química) debido a la erosión, compactación por construcción de infraestructura petrolera, contaminación con compuestos orgánicos (hidrocarburos) e inorgánicos (sulfatos o sales) y pérdida de biodiversidad (micro y macrofauna) (Bravo, 2007; Vargas et al., 2018).

### **Hidrocarburos**

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos que debido a su estructura presentan diferente solubilidad, volatilización y por su formación de átomos de carbono e hidrógeno, son susceptibles a ser biodegradables a compuestos en mayor o menor grado de afectación para el medio ambiente (Velásquez, 2017). Según Vázquez et al. (2011), a una mayor concentración de hidrocarburos en el suelo, existirá una mayor cantidad alterada de biomasa microbiana y promoverá la proliferación de bacterias

anaeróbicas, alterando el equilibrio de las condiciones ecológicas originales para el desarrollo fenológico de la vegetación.

Algunos de los efectos de la presencia de hidrocarburos sobre las propiedades químicas del suelo son: disminución del pH, reducción de la materia orgánica, incremento inicial de la conductividad eléctrica, reducción de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y un mayor porcentaje de saturación del aluminio (Zamora et al., 2012). La pérdida del contenido de materia orgánica y nutrientes minerales (sodio, potasio y sulfato), es otra consecuencia importante dada por la presencia de hidrocarburos y asociada a la pérdida de la fertilidad del suelo (Velásquez, 2017).

### **Metales pesados**

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos definidos con una alta densidad, toxicidad considerable, no son biodegradables y presentan efectos dañinos en el ambiente del suelo como: alteración de poblaciones microbianas, disminución de fertilidad y modificación de la estructura del suelo (Londoño et al., 2016; Tang et al., 2019). Una vez en el suelo, los metales pueden incorporarse a las plantas a través de sus raíces o por absorción foliar, pasar a la atmósfera por volatilización, moverse en aguas subterráneas o ser retenidos en las partículas del suelo (Reyes et al., 2016).

La biodisponibilidad de los metales pesados es influenciada en gran medida por el pH del suelo, siendo el contenido de materia orgánica otro componente que en conjunto permite que se acidifique el suelo; consecuentemente, la mayoría de metales pesados estarán más disponibles y con mayor capacidad de contaminar el ambiente (Galán & Romero, 2008). Los metales pesados en cantidades considerables pueden

influenciar en las cargas eléctricas del suelo; puesto que, la solución de estos metales afecta la carga eléctrica tanto del agua presente en los poros como de las partículas del suelo; de modo que, se produce una interferencia en el movimiento de iones entre soluciones propias del suelo y aumenta la conductividad superficial (Chu et al., 2018).

### ***Cadmio (Cd), plomo (Pb) y níquel (Ni)***

Estos metales pesados presentan mayor incidencia en los suelos contaminados debido al material parental y a su tiempo de perduración en el medio ambiente; tanto el Cd como el Pb no tienen una función biológica esencial (Galán & Romero, 2008). EPA, citado por Carrillo et al. (2017b), menciona que en el caso del Pb y Ni, se incrementa su nivel de toxicidad cuando hay bajas cantidades de fósforo y en suelos con un pH menor a 6 unidades.

El exceso de metales produce una pérdida de la fertilidad del suelo; de manera que, el exceso de Pb causa en las plantas una limitación de la síntesis de clorofila al acumularse en las raíces, tallo y hojas (Li et al., 2020). El Ni también puede tener un efecto en la disminución del desarrollo de las plántulas y reducción de procesos de transpiración, división celular y producción de clorofila (Pellera & Gidarakos, 2015). El Cd presenta una movilidad considerada mientras mayor sea el pH y la capacidad de intercambio catiónico del suelo (Pellera & Gidarakos, 2015; Jeong et al., 2013). En las plantas el Cd tiene un efecto a nivel de expresión génica, incrementa la actividad enzimática (peroxidasas) y ocasiona cambios morfológicos y estructurales como la desorganización de cloroplastos (Charrupi & Martínez, 2017).

## **Biorremediación**

La biorremediación es una alternativa factible que al utilizar agentes biológicos (bacterias, hongos e incluso algas), contribuyen con la atenuación natural para provocar cambios químicos que reducen los contaminantes al aprovechar sus componentes; estos contaminantes pueden ser: orgánicos, herbicidas, insecticidas, pesticidas o metales pesados (Rahman y Singh, 2020; Tang et al., 2019).

La aplicación de poblaciones microbianas puede verse afectada por la temperatura, radiación solar, pH, humedad y las propiedades del suelo, por lo que el éxito de este método depende de la zona de aplicación y de la distribución uniforme de los microorganismos en el sitio (Du et al., 2011; Kang, 2014).

### ***Técnicas de biorremediación***

La bioestimulación y la bioaumentación son estrategias viables correspondientes con la biorremediación mejorada, las cuales permitirán una aceleración del proceso de descontaminación de suelos perturbados (Wu et al., 2019).

**Bioestimulación.** La bioestimulación comprende un proceso donde se suministran nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio) inorgánicos adicionales y se da un manejo de la humedad, pH y temperatura del suelo para estimular la microbiota del sitio (Chaudhary & Kim, 2019). Dichos nutrientes pueden ser incorporados mediante el sistema de riego o preparados en soluciones solubles adicionadas al suelo (Maycotte et al., 2011).

**Bioaugmentación.** Según Wu et al. (2019), el proceso de bioaugmentación introduce microorganismos degradantes de contaminantes. Se pueden formar consorcios microbianos entre especies nativas o usar microorganismos genéticamente modificados que presenten genes propiamente activos para tener la función de biodegradar (Maycotte et al., 2011).

La técnica dependerá en conjunto de varios factores como: propiedades del suelo, microbiota utilizada, características de la vegetación del entorno y la concentración de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Wang et al., 2021).

### **Fitorremediación**

La fitorremediación implica el uso de plantas como parte del proceso de descontaminación de una determinada área, permitiendo mejorar la calidad del suelo con un costo alternativo favorable (Noguez et al., 2017).

Sin embargo, se requieren plantas resistentes a condiciones más extremas debido a la baja fertilidad que presentan estos suelos. Se emplean principalmente especies arbóreas debido a que en caso de existir acumulación de contaminantes en el tejido vegetal, posteriormente no ocurrirán riesgos de toxicidad para la salud humana (Carrillo et al., 2017a).

### ***Formas de fitorremediación***

**Fitoextracción.** Es un proceso mediante el cual la planta absorbe contaminantes de hidrocarburos y metales pesados, causando una hiperacumulación (fitoabsorción) en la parte aérea del tejido vegetal (González et al., 2017).

La acumulación de contaminantes se da particularmente dentro de las hojas, mediante el siguiente proceso: movilización de contaminantes en la rizosfera, absorción por el sistema radicular, translocación hacia la parte aérea de la planta y depósito de los contaminantes (Wang et al., 2021).

Las especies con capacidad de ser hiperacumuladoras presentan características como: tolerancia a contaminantes, sistema radicular profundo y ramificado, alta adaptación a condiciones ambientales, alta tasa de crecimiento, gran cantidad de biomasa aérea y resistencia a plagas y enfermedades (Mahar et al., 2016). Los tejidos vegetales deben ejecutar ciertos procesos para manejar los contaminantes como son: transporte de forma activa de los iones de metales hacia las vacuolas o hacia proteínas y péptidos; formación de complejos de tolerancia y unión de metales en zonas de la pared celular (Wang et al., 2021).

**Fitovolatilización.** La planta con un sistema radicular extenso y con capacidad de degradación de contaminantes, mediante este proceso los acumulan y los convierten en una forma volátil, para posteriormente liberarlos a la atmósfera en su mismo estado o en una forma alterada por procesos de metabolismo (González et al., 2017).

Mediante el proceso de la transpiración, los compuestos son llevados a la superficie de la hoja y por sus estomas son liberados hacia la atmósfera; no obstante, con la aplicación de esta técnica no existe eliminación del contaminante, sino que es transferido a otra atmósfera (suelo o agua) donde pueden ocurrir problemas de precipitación o lixiviación (Wang et al., 2021).

**Fitoestabilización.** Los contaminantes (principalmente metales pesados) mediante este proceso no son eliminados; sino que se acumulan en la zona de la rizosfera, formando complejos y agregados o precipitándose en regiones de la propia raíz, sin existir una movilización hasta la parte aérea de las plantas (González et al., 2017).

Esta sucesión evita que los contaminantes se lixivien a aguas subterráneas o entren mediante otros mecanismos a la cadena alimenticia; sin embargo, no se reducen las cantidades de contaminantes presentes, sino se los retiene en la zona de las raíces evitando la contaminación del medio ambiente (suelo o agua superficial y subterránea) y procurando el bienestar del ser humano (Wang et al., 2021).

**Fitodegradación.** La fitodegradación comprende un mecanismo propio de algunas especies donde particularmente tienen la capacidad de degradar los contaminantes orgánicos y convertirlos en productos menos tóxicos con la acción de enzimas degradadoras o procesos propios del metabolismo de la planta (Wang et al., 2021).

**Rizofiltración.** Es un proceso que consiste en la absorción de contaminantes por las raíces, esto implica una síntesis de químicos en la zona de la rizosfera para que aumente el mecanismo de acción, también puede ocurrir una conexión con efluentes como aguas subterráneas (Wang et al., 2021). Las plantas con esta capacidad pueden ser empleadas en sistemas hidropónicos como filtros para el agua; además de, formar complejos junto a consorcios microbianos para ser filtros biogeoquímicos y eliminar contaminantes tanto en el suelo como en aguas residuales (Mahar et al., 2016).

## **Micorremediación**

La micorremediación es una técnica que emplea una microbiota del género fúngico, cuya función es degradar compuestos contaminantes al secretar principalmente enzimas extracelulares (Khatoon et al., 2021). Tienen un uso eficiente a comparación de otros microorganismos, debido a la fácil difusión de sus esporas, donde sus hifas se introducen fácilmente en el suelo y logran un rápido desarrollo; además, expulsan compuestos tóxicos por medio del micelio (Akhtar & Amin-ul, 2020).

La micorremediación actúa de una forma ecológica y sostenible de manera que ciertos hongos acorde con su distinta morfología y metabolismo, pueden constituir agentes biológicos para contrarrestar los niveles de contaminación por compuestos tóxicos (Akhtar & Amin-ul, 2020). Muchos géneros de hongos pueden ser hiperacumuladores, donde sus cuerpos presentan la capacidad de acumular concentraciones de contaminantes específicos (Khatoon et al., 2021).

## **Importancia de los microorganismos en suelos perturbados**

La presencia de microorganismos en el suelo sirve para predecir el impacto producido por algún factor particular que afecte al medio ambiente (Obire & Anyanwu, 2009). Esto se debe a la capacidad de respuesta que tienen los microorganismos ante condiciones adversas donde pueden reducir su actividad funcional, disminuir el tamaño de su población o reducir la diversidad/estructura microbiana (Obire & Anyanwu, 2009; Tang et al., 2019).

Rahman y Singh (2020), mencionan que la toxicidad producida por derrames de petróleo varía dependiendo de la composición y concentración; además de que, existen especies de microorganismos que utilizan los derivados de hidrocarburos como fuente

de alimento y en ocasiones, ante la presencia de petróleo crudo o sus derivados, incrementan su población.

### ***Interacción entre los microorganismos e hidrocarburos***

Dependiendo del nivel de concentración de los metales pesados, estos pueden producir efectos nocivos en las células microbianas como: imitar elementos esenciales e inhibir funciones biológicas y desestabilizar biomoléculas de ADN, ARN o proteínas (Rahman y Singh, 2020). En consecuencia, se deben utilizar varias comunidades microbianas como indicadores generales del grado de descontaminación ambiental debida a hidrocarburos o metales pesados (Tang et al., 2019).

Sin embargo, ciertas comunidades microbianas alteran la configuración de los metales pesados ya sea por remoción, recuperación, precipitación o desintoxicación, y rigen la movilidad o biodisponibilidad de los compuestos (Rahman y Singh, 2020). Por otra parte, su elevada concentración puede causar en los microorganismos: disfunción, desnaturalización de proteínas, destrucción de la membrana celular o reducción de la actividad enzimática (Tang et al., 2019).

### **Comunidades microbianas afines a compuestos hidrocarburíferos**

Entre algunos de los géneros de bacterias que presentan afinidad a la degradación de hidrocarburos están: *Pseudomonas sp.*, *Mycobacterium sp.*, *Acinetobacter sp.*, *Arthrobacter sp.*, *Rhodococcus sp.*; los mismos que se encargan de degradar compuestos alcanos, mono y poli aromáticos de los hidrocarburos (Chaudhary et al., 2019).

Por su parte, los géneros de hongos que biodegradan hidrocarburos son: *Aspergillus sp.*, *Basidiomycetes sp.*, *Fusarium sp.*, *Trichoderma sp.*, *Penicillium sp.*, *Beauveria sp.*, *Verticillium sp.* y *Cladosporium sp.* (Du et al., 2011). Según Essabri et al. (2019), acorde con estudios realizados de aislamiento in vitro, las especies fúngicas con mayor potencialidad para utilizar los hidrocarburos son: *Aspergillus niger*, *Penicillium ochrochloron* y *Trichoderma viride*; esto debido a su capacidad de producir enzimas celulares degradadoras.

### **Importancia de los parámetros evaluados en el suelo**

#### ***pH***

El pH se convierte en un parámetro relevante a considerar dado que influye en la movilidad de los contaminantes presentes en el suelo dependiendo de las características de los mismos (Maycotte et al., 2011). Para procesos eficientes de degradación donde actúan bacterias se recomienda un pH entre 6 a 8; mientras que, si se manejan procesos con hongos degradadores se prefiere un pH alrededor de 5 (Carrillo et al., 2017b).

El valor de pH depende del equilibrio entre los cationes e iones de hidrógeno ( $H^+$ ) de los complejos orgánicos formados en el suelo. Consecuentemente, el cambio de pH se produce por procesos de meteorización del suelo y reacciones químicas dadas por el contenido de materia orgánica y la interacción entre micro y macro elementos (United States Department of Agriculture-USDA, 2011).

El pH puede actuar sobre los procesos de humificación y mineralización (Carrillo et al., 2017b). Por su parte, los metales pesados en su mayoría tienen mayor movilización en pH bajos, donde aquellos metales que presentan diversos estados de

oxidación, circulan apropiadamente ante valores extremos de pH (González et al., 2017). Adicionalmente, la vegetación presente en la zona puede fluctuar el nivel de pH del suelo debido a la liberación de ácidos orgánicos o por la captación de cationes/aniones dada en las raíces de las plantas; de esta manera, el equilibrio entre cationes/aniones estará en función de las formas absorbibles de los elementos (N y K principalmente) (Maycotte et al., 2011).

### ***Conductividad eléctrica (CE)***

La CE tiene una relación estrecha con las propiedades y el tamaño de las partículas del suelo y con la capacidad de intercambio catiónico (Choo et al., 2016). Mediante la CE se mide la salinidad del suelo, que está dada por una acumulación de sales solubles en la parte superficial o en las primeras capas del suelo (Rahmati & Hamzhepour, 2016).

El contenido de sales presente en el suelo puede deberse a varios factores como: material parental, riego inapropiado, calidad del agua o exceso de fertilización (compuestos formados por N y K) (Chu et al., 2018). El contenido excesivo de sales en el suelo generalmente tiene una asociación negativa con la cobertura vegetal; cuando las plantas presentan niveles superiores a 4 dS/m, ocurren ciertas limitaciones en el crecimiento vegetativo (Rahmati & Hamzhepour, 2016).

También existe una relación negativa entre la CE y la humedad, la cual a su vez está relacionada con la textura del suelo, donde en la superficie se formará una doble capa eléctrica debido a las cargas; por lo tanto, la CE de las partículas del suelo (arcillas) es diferente de la conductividad del agua presente en los poros (Choo et al., 2016).

### ***Materia orgánica***

Tiene un origen en los residuos tanto de vegetales como de animales que son incorporados paulatinamente al suelo mediante procesos de descomposición y bajo la influencia del clima y microorganismos presentes (Maycotte et al., 2011). La degradación completa de la materia orgánica se denomina humus, el cual refleja la productividad contenida del suelo, ya que mantiene los nutrientes y el agua requeridos por las plantas (USDA, 2011).

La cantidad de materia orgánica de un suelo incrementa al aplicar prácticas de manejo, como la rotación de cultivos con abundante biomasa, uso de cultivos de cobertura o minimizar la labranza; adicionalmente, la presencia de hojarasca y otros residuos incrementa los agregados del suelo y forman barreras contra la erosión causada por escorrentía o por el viento (González & Carrillo, 2017). Cabe destacar que, el contenido de agua y nutrientes en la materia orgánica del suelo es entre 10 a 1000 veces mayor que la cantidad propia de los minerales del suelo; además, permite incrementar la calidad del agua superficial y subterránea debido a la mayor infiltración dada por la mejora progresiva de la estructura del suelo (USDA, 2011).

La fase móvil de la materia orgánica presente en el suelo es la denominada materia orgánica disuelta (MOD), la cual es la vía principal para la movilización de los elementos esenciales y tiene una función clave en el transporte de contaminantes de hidrocarburos; de esta manera, la MOD se deriva particularmente de la lixiviación del contenido de hojarasca y degradación microbiana (Hagedorn et al., 2015).

Esta descomposición de la materia orgánica está estrechamente asociada a la actividad microbiana en el suelo; no obstante, la tasa de respiración microbiana está

inversamente relacionada con la relación C:N del suelo, es decir, el C se vuelve limitante a medida que la materia orgánica se descompone; mientras que, las concentraciones de N están asociadas con un aumento en la tasa de respiración microbiana en el material de hojarasca (Jílková et al., 2020).

### **Nitrógeno (N)**

El nitrógeno es un macroelemento que puede estar presente en diferentes formas en el suelo y cumple diversas funciones esenciales dentro de las plantas, desde su desarrollo hasta su reproducción, ya que intervienen en procesos como: composición de proteínas, aminoácidos y enzimas, división celular, fotosíntesis, respiración, absorción de otros nutrientes, sistema de defensa, entre otros (Tegeder & Perchlik, 2018; Azimi et al., 2020).

Según Maycotte et al. (2011), el nitrógeno principalmente puede concentrarse a través de una fijación biológica o por medio de procesos simbióticos mediante la ayuda de una microbiota que permite el uso eficiente del N. Rousk et al. (2016), menciona que el proceso de fijación de N dependerá de la disponibilidad de carbono o de la proporción energética necesaria dada por procesos de fotosíntesis. Entre algunos de los géneros más conocidos de microorganismos que fijan N, se encuentran los siguientes: *Rhizobium*, *Cyanobacterias*, *Azotobacter*, *Proteobacterias* y *Agrobacterium* (Zhan & Sun, 2012).

Menciona Xu et al. (2019) que, cuando el suelo tiene un pH bajo, contiene arcillas y el N está presente en forma inorgánica, existirá una reducción de la población microbiana como son las bacterias autóctonas fijadoras de N. Existe el proceso de nitrificación que mediante la presencia de oxígeno y bacterias como las *Nitrobacter* y

*Nitrosomas*, pasa el nitrógeno a convertirse en una forma disponible para las plantas o a ser utilizado por otros microorganismos del suelo (Maycotte et al., 2011).

### **Fósforo (P)**

El fósforo es un macroelemento que incide en el crecimiento de las plantas y dependiendo de su concentración, puede alterar el equilibrio del sistema planta-suelo (Maycotte et al., 2011). Este elemento regula procesos enzimáticos/metabólicos y constituye un componente de los ácidos nucleicos, carbohidratos, fosfolípidos, coenzimas y ATP (Maycotte et al., 2011). Adicionalmente, influye en la caracterización de la membrana celular, actúa en el almacenamiento y transferencia de energía, formación del sistema radicular, frutos y semillas y regula el transporte de azúcares y la síntesis de almidones (Haneklaus & Schnug, 2016).

Las plantas tienen la capacidad de captar P por medio de una baja o alta afinidad y actividad, la cual está influenciada por la forma orgánica e inorgánica del elemento (Maycotte et al., 2011). Al existir una mayor movilización de P desde el suelo, las raíces de la planta cambian la forma de sus estructuras o modifican la composición de las raíces laterales y aumentan la liberación de exudados movilizadores (Haneklaus & Schnug, 2016).

Maycotte et al. (2011), menciona que el pH del suelo influye considerablemente en la disponibilidad y movilidad del P para las plantas; en un pH de 6.5, el P se mantiene soluble pero con riesgo de ser lixiviado. Pueden existir rizobacterias solubilizadoras de fosfato (PSB) que incrementan el P en la zona de tejidos vegetales o incrementarán las reservas de P en el suelo; además, son promotoras del crecimiento vegetal mediante la fitoextracción (Jeong et al., 2013). El empleo de PSB constituye una

aplicación de biofertilizante que secreta ácidos orgánicos, disminuye el pH y mejora la fracción móvil para reducir los contaminantes (Bakhshandeh et al., 2017).

### **Potasio (K)**

El potasio es un macroelemento que participa en varios procesos vitales dentro de las plantas como: fotosíntesis, crecimiento vegetativo, respiración, transporte de carbohidratos, osmosis, formación de tallos, apertura y cierre de estomas, formación de azúcares y almidones, resistencia ante estrés ambiental biótico o abiótico (Maycotte et al., 2011).

Se puede encontrar el K en el suelo en forma iónica, intercambiable, no intercambiable y no disponible, de tal manera que, dependiendo de las propiedades físico-químicas del suelo y de la actividad microbiana, puede variar la accesibilidad a la planta (Kumar et al., 2020).

La absorción de K por parte de las plantas incrementa por la influencia de hongos actinomicetos, hongos saprofitos y bacterias solubilizantes de potasio (KSB), estos producen ácidos orgánicos e inorgánicos que aumentan la disponibilidad del K al convertirlo en una forma soluble (Ferreria et al., 2020; Bakhshandeh et al., 2017).

### **Dasometría**

La dasometría es una ciencia encargada del estudio del crecimiento de especies forestales, basándose en relaciones métricas que rigen el desarrollo vegetativo (Diéguez et al., 2005). Cada planta, arbusto o árbol constituye un ente numérico, en cuyo enfoque se busca mejorar el manejo general de rodales y bosques (Espinoza, 2018). Se permiten estimar atributos propios a través de variables como el diámetro

basal o diámetro a la altura del pecho (DAP), las cuales brindan una información del potencial productivo a futuro de las especies arbóreas (Uzquiano, 2014).

### ***Variables dasométricas***

**Diámetro a la altura del pecho (DAP).** El DAP es una medida de longitud evaluada como referente del desarrollo de individuos forestales, esto se debe a la estrecha relación de esta variable como respuesta ante cambios ambientales (Cancino, 2012). El DAP permite conocer y relacionar las características de las especies forestales en pie y tomar una medida estandarizada a 1.3 m del suelo; además, considera un mismo punto de referencia y también la forma del fuste (Masías, 2017).

**Altura del árbol.** La altura es una medida de longitud dada, que comprende desde la parte del suelo hasta el punto más alto de un árbol, esta variable evalúa el crecimiento de las especies arbóreas (Cancino, 2012).

La altura permitirá determinar la calidad del sitio donde se plantaron las especies y caracterizar la estructura de su población para futuras referencias, particularmente en programas de reforestación o fitorremediación (Masías, 2017). Se emplean métodos directos e indirectos de medición; no obstante, cuando se manejan sistemas forestales con especies de una altura superior, se requiere de instrumentos especiales, principalmente se emplean hipsómetros o escáneres láser (portátil, aerotransportador) para obtener los valores (Jurjevic et al., 2020).

**Área basal.** El área basal es una variable asociada con el espacio determinado que ocupa una especie arbórea para poder desarrollarse, para ello se basa en mediciones e índices (Cancino, 2012). Expresa la densidad del rodal, representando la

superficie del fuste a nivel del DAP y la variabilidad acorde con el índice de posición de la corona del árbol; además, se encuentra relacionada con la cantidad, la edad, el tamaño y la distribución de los individuos de la especie dentro de una zona (Da Cunha et al., 2016).

**Volumen de madera.** El volumen indica la cantidad de madera que contendrá cada especie en pie o una vez sea cosechada parcialmente por trozos, dicha estimación puede ser diferenciada dependiendo de la especie de interés forestal (Da Cunha, 2009).

Según Cancino (2012), el volumen en pie es un índice de importancia forestal que incluye el factor de forma de la especie arbórea y otras mediciones simples previamente obtenidas. El valor del potencial comercial de madera de un árbol será calculado mediante estimaciones matemáticas basadas en variables como: diámetro, altura, forma y DAP (Riaño & Lizarazo, 2016).

## Capítulo III

### Metodología

#### Ubicación política

La investigación de campo se llevó a cabo en las instalaciones de Petroamazonas EP, localizadas en las provincias de Orellana y Sucumbíos. Mientras que, la fase de laboratorio se ejecutó tanto en las instalaciones del laboratorio de Suelos y Química de la Carrera de Ingeniería Agropecuaria ubicado en la Hacienda El Prado de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, como en los laboratorios de Petroamazonas EP.

#### Ubicación geográfica

La ubicación de cada sitio de muestreo se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Ubicación geográfica de cada parcela de muestreo*

Nombre del sitio	Tipo de sitio	Tipo de suelo	Provincia	Coordenadas
Auca 02_D	UTSC	SP	Orellana	MO290191 UTM9913436
CGP Lago 19	UTSC	SP		NO294572 UTM1014133
Cuyabeno 20	PCPP	SP		NO357023 UTM1001631
Sansahuari 02	PCPP	SP		NO356042 UTM1009231
Shushufindi Est 40	CLR	SP	Sucumbíos	M313661 UTM9981360
Secoya 26	CLR	SP		NO322323 UTM1003990
Secoya 2-3	PT	SNP		N323353 UTM1001430
Los Ribereños	PT	SNP		NO300491 UTM1004661

*Nota.* UTSC= Unidades de tratamiento de suelos contaminados; PCPP= Plataformas circunscritas a pozos petroleros; CLR= Celdas de lodos y ripios; PT= Potrero testigo; SP= Suelo perturbado; SNP= Suelo no perturbado

## **Ubicación ecológica**

Datos meteorológicos registrados en la estación El Coca-Aeropuerto en Orellana, reportan una media anual de 236.33 mm de precipitación y una temperatura de 26.7 °C; mientras que, en Sucumbíos datos promedio reportados por la estación Lago Agrio-Aeropuerto, registraron 258.55 mm de precipitación y 25.9°C (SIPA, 2020). Ambas provincias se ubican dentro de zonas de bosque húmedo tropicales, catalogándolas como zonas de clima mesotérmico y cálido húmedo (INAMHI, 2016).

Por su parte, Sucumbíos tiene una nubosidad de 5/8, con mediana probabilidad de cielos despejados, promedios de 80 a 86% de humedad y se encuentra en los pisos bioclimáticos: montano (alto-bajo), piemontano y tierras bajas (GADPS, 2015). Mientras tanto, Orellana tiene una humedad relativa promedio de 80 a 82%, con una evapotranspiración anual máxima de 1217 mm/año y rangos altitudinales que comprenden climas entre: montano, montano bajo, piemontano y tierras bajas (GADPO, 2019).

## **Materiales y métodos**

### ***Selección de especies arbóreas***

Fueron seleccionadas las especies arbóreas *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia*, las cuales presentaron mayor adaptabilidad y crecimiento durante los primeros 7 años de edad (Villacís et al., 2016b; Espinoza, 2018).

### ***Selección de sitios de muestreo***

El estudio se realizó en dos sitios: perturbados y no perturbados. Los primeros comprenden zonas afectadas por actividades de infraestructura y extracción de petróleo, mientras que, las zonas sin afectación por contaminantes corresponden a los sitios no perturbados. Se evaluaron 6 parcelas en suelos perturbados (celdas de lodos y ripios, plataformas que circunscriben a los pozos petroleros y suelos contaminados con petróleo) y 2 parcelas en suelos no perturbados (potreros).

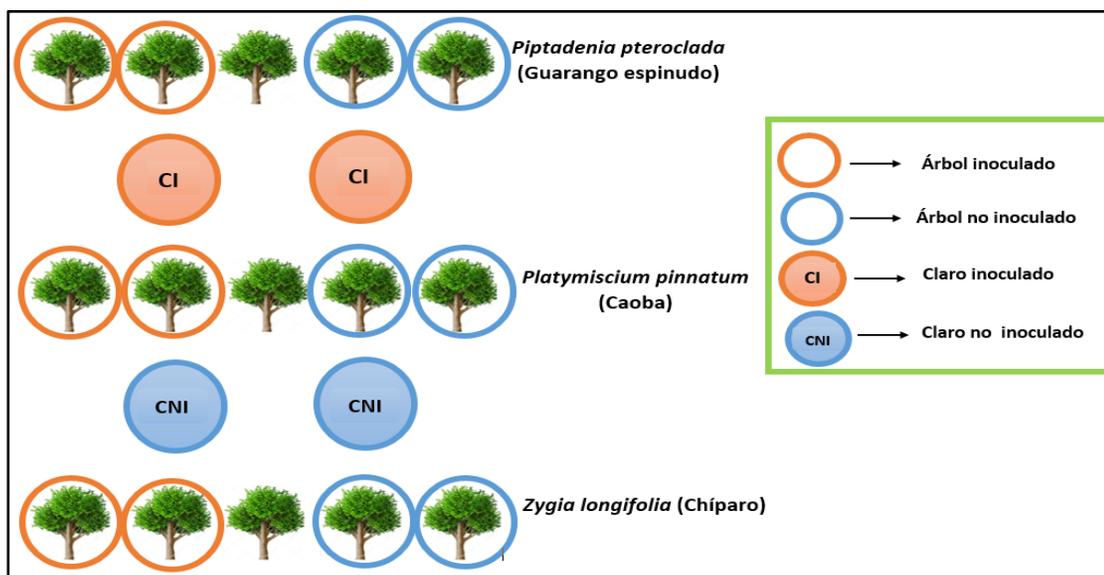
Las parcelas fueron establecidas desde el año 2012, tienen una dimensión de 24 x 84 m, donde las especies forestales fueron sembradas en una densidad de 625 árboles/ha y a una distancia de 4 x 4 m entre individuos.

### ***Selección de parcelas y subparcelas en los sitios***

En cada una de las parcelas se establecieron 4 subparcelas circulares de 2 metros de diámetro alrededor del fuste de 4 individuos de cada una de las especies arbóreas; de estas 4 parcelas dos fueron inoculadas y dos no inoculadas (en total: 6 inoculadas y 6 no inoculadas). Adicionalmente, se establecieron 4 subparcelas sobre claros no influenciados por los árboles: dos inoculadas y dos no inoculadas (16 subparcelas en cada parcela, 128 subparcelas en total; Figura 1).

**Figura 1**

*Disposición en campo de las subparcelas de muestreo dentro del sitio de estudio*



### ***Aplicación del inóculo***

El inóculo utilizado fue tierra negra proveniente del bosque natural de la cuenca amazónica, a una concentración de 1 L/m<sup>2</sup>. El inóculo fue esparcido sobre la superficie de la subparcela a 2 m de diámetro alrededor de cada individuo (Wubs et al., 2016). La evaluación del efecto del inóculo se realizó después de dos años de su aplicación en campo. La composición del inóculo se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2***Características y contenido de nutrientes del inóculo aplicado*

	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
pH		4-4.8
Materia orgánica	%	2.3-2.5
Arcilla	%	36
Limo	%	36
Arena	%	28
N	ppm	15
P	ppm	4
K	meq/100 mL	0.12
Ca	meq/100 mL	5
Mg	meq/100 mL	0.5
S	ppm	5
Zn	ppm	2.1
Cu	ppm	4.4
Fe	ppm	135
Mn	ppm	9.6
B	ppm	0.28
Ca/Mg	meq/100 mL	10
Mg/K	meq/100 mL	4.17
(Ca + Mg)/K	meq/100 mL	45.83
Sumatoria bases	meq/100 mL	5.62

Fuente: (CITGAV, 2018)

***Toma de muestras de suelo***

La muestra de suelo recolectada en cada subparcela de los sitios perturbados y no perturbados fue de un kilogramo, obtenida a una profundidad de 20 cm del nivel del suelo (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-FAO, 2010). Cada una de las muestras se colocó en papel aluminio y fue depositada dentro de una funda ziploc debidamente codificada.

### ***Variables dasométricas evaluadas***

La altura de cada árbol se midió desde la base del individuo seleccionado hasta el ápice del tallo, para lo cual se utilizó un hipsómetro láser (Espinoza, 2018).

Se tomó el DAP por cada árbol seleccionado de las tres especies arbóreas, la medida correspondió a la sección transversal a 1.30 m de altura desde el nivel del suelo, para lo cual se utilizó una cinta diamétrica (Diéguez et al., 2005).

El área basal se obtuvo empleando la siguiente fórmula y reemplazando los datos previamente obtenidos (Pérez et al., 2017):

$$\text{Área basal (m}^2\text{)} = \pi * (\text{DAP}^2 / 4)$$

Dónde:

**$\pi$**  = Constante relacionada con la longitud de una circunferencia y su diámetro

**DAP**= Diámetro a la altura del pecho en m

El volumen de madera se obtuvo aplicando la fórmula de Hossfeld (Pérez et al., 2017):

$$\text{Volumen de madera (m}^3\text{)} = G * h * f$$

Dónde:

**G**= Área basal en m<sup>2</sup>

**h** = Altura en m

f = Factor o coeficiente de forma

### ***Variables edafológicas evaluadas***

Las muestras de suelo fueron preparadas, homogeneizadas y secadas en bandejas individuales de papel aluminio y sometidas a una temperatura de 30-35°C por un periodo de 48 horas. Posteriormente, fueron molidas tratando de triturar partículas o terrones más solidificados y removiendo residuos como raíces. Finalmente, se tamizaron con un tamiz No. 10 con apertura de 2 mm y se guardaron respectivamente en fundas de papel etiquetadas para sus posteriores análisis (Instituto Nacional de Innovación Agraria-INIA, 2017).

Para la determinación del pH se utilizó el potenciómetro y para la conductividad eléctrica un conductímetro. En un vaso de precipitación de 100 mL, se colocó 30 g de suelo en 70 mL de agua destilada y se agitó la preparación para dejarla en reposo durante 10 minutos. Para la posterior lectura se calibró el aparato, se agitó la suspensión de la muestra, se insertó los electrodos y este fue limpiado con agua destilada posterior a la lectura de cada una de las muestras (INIA, 2017).

Se utilizó el método de calcinación para determinar la materia orgánica. Una vez seca la muestra de suelo en la estufa a  $70\pm 5^\circ\text{C}$ , se colocaron 5 g de suelo (exactitud de 0.0001g) en un crisol, el crisol se colocó en la mufla y se subió la temperatura lentamente hasta  $550^\circ\text{C}$  durante 24 horas. Posteriormente, la muestra fue colocada en el desecador para enfriarla. Se registró el peso de la muestra calcinada y la cantidad de materia orgánica se estimó con la siguiente ecuación (Sadzawka et al., 2005; Ruíz et al., 2018):

$$\text{Materia orgánica(\%)} = \frac{(B - A) * 100}{A}$$

Dónde:

**A** = Peso de muestra seca a  $70 \pm 5^\circ\text{C}$  antes de calcinación (g)

**B** = Peso de la muestra calcinada a  $550^\circ\text{C}$  (g)

Para estimar el nitrógeno total se empleó el método Kjeldahl, el mismo que comprende tres procedimientos y está basado en los siguientes sustentos (INIA, 2017): La digestión de la muestra mediante la obtención de sulfato de amonio y eliminación de materia orgánica al aplicar ácido sulfúrico. La destilación de la muestra obteniendo ácido bórico al liberarse el amoníaco como producto de la reacción del hidróxido de sodio aplicado, el cual se neutraliza y convierte en alcalina la solución. El hidróxido de amonio destilado al ser mezclado con el ácido bórico y debido al indicador de color presente, cambia la coloración de la solución conforme se vuelva más alcalina. Finalmente, la solución con ácido bórico reacciona con el ácido clorhídrico (HCl) durante el proceso de titulación hasta obtener nuevamente una coloración rosada, la cantidad de HCl gastada implica el contenido de N presente en la muestra de suelo.

Se realizó el siguiente procedimiento para obtener el nitrógeno de las muestras secas de suelo (Fernández et al., 2011; INIA, 2017): para la digestión se colocaron 5 g (exactitud 0.001g) de la muestra en un tubo Kjeldahl, se adicionaron 22 mL del catalizador de ácido sulfúrico concentrado (densidad=  $1.84 \text{ g/cm}^3$ ) y una tercera parte de tableta Kjeldahl. Los tubos fueron colocados a calentar en el digestor cumpliendo el ciclo de  $100^\circ\text{C}$  por 10 minutos,  $200^\circ\text{C}$  por 10 minutos y  $420^\circ\text{C}$  por 50 minutos. Para el proceso de destilación, se añadieron 50 mL de agua destilada en los tubos resultantes

de la digestión. En la unidad de destilación, se prepararon 30 mL de ácido bórico (4%) junto con dos gotas de indicador (2 g rojo de metilo, 1 g verde de bromocresol y 1000 mL de etanol al 95%) en un matraz Erlenmeyer colocado en un extremo del equipo y por el otro, se colocó hidróxido de sodio (32%). Cada muestra se destiló en el equipo por 5 minutos y el resultado obtenido con la mezcla del ácido bórico, mostró una coloración verde que fue titulada con HCL 0.1N hasta lograr una tonalidad rosada.

El contenido de nitrógeno se estimó con la siguiente ecuación (Fernández et al., 2011; INIA, 2017):

$$\text{Nitrógeno (\%)} = \frac{14 * N * V * 100}{S * 1000}$$

Dónde:

**N** = Normalidad de la solución

**V** = mL de ácido gastado de titulación

**S** = Peso de la muestra de suelo (g)

Para obtener el contenido de fósforo de las muestras de suelo se realizó la curva de calibración acorde con la metodología de Sadzawka et al. (2006a), mediante el siguiente proceso: se diluyó 10 mL de la solución estándar (1000 mg/L de P) en 1000 mL de agua destilada. En seis balones aforados de 100 mL se agregaron 0-1-2-5-25-50 mL de la solución estándar de P (10 mg/L) con una micropipeta. Se añadieron 50 mL de solución de bicarbonato (1 mol/L), la cual se preparó disolviendo 42 g de bicarbonato en 500 mL y se aforó el contenido hasta los 1000 mL. Finalmente, se obtuvo la curva de calibración mediante mediciones en el espectrofotómetro.

El procedimiento para la extracción de fósforo en las muestras de suelo se realizó siguiendo el método Olsen, el cual es descrito a continuación (Sadzawka et al., 2006a): se pesaron 2.5 g (exactitud 0.01 g) de muestra seca de suelo que fueron colocados en un frasco de plástico con capacidad de 150 mL. Se añadieron 0.3 g de carbón activo y 50 mL de bicarbonato de sodio 0.5 mol/L (esta solución se obtuvo disolviendo 42 g de bicarbonato en 1000 mL de agua destilada y ajustando el pH a 8.5 con hidróxido de sodio). Se agitó el frasco inmediatamente de forma manual, simulando un agitador recíproco y se filtraron las muestras con papel Whatman de 125 mm (libre de P). Por último, se realizó la lectura de la absorbancia de la muestra en el espectrofotómetro a 880 nm.

Se aplicó la siguiente ecuación para obtener el contenido de fósforo (Sadzawka et al., 2006a):

$$P \left( \frac{mg}{kg} \right) = (a - b) \times F \times 20$$

Dónde:

**a** = mg/L de P en el extracto de la muestra

**b** = mg/L promedio de los blancos

**F** = Factor de dilución del extracto de la muestra

Según la metodología de Sadzawka et al. (2006b), se realizó la curva de calibración de potasio mediante el siguiente proceso: en cinco balones aforados de 100 mL se colocaron 10 mL de acetato de amonio (1 mol/L) y 10 mL de nitrato de lantano (10 g/L). Se adicionó en cada balón 100-200-300-400-500  $\mu$ L de la solución estándar de K, esta serie de estándares contenían 0-2-4-6-8-10 mg/L de K respectivamente. Se

aforó cada balón con agua desionizada hasta los 100 mL, se colocó cada solución preparada en tubos de ensayo de 13 mL y se realizó la curva de calibración mediante absorción atómica, midiendo a una longitud de 766.5 nm.

El procedimiento para la extracción de potasio de las muestras de suelo y la posterior lectura, fue el siguiente (Sadzawka et al., 2006b): se pesaron 5 g (exactitud 0.01 g) de muestra de suelo que fueron colocados en un frasco de plástico con capacidad de 150 mL. Se añadieron 50 mL de acetato de amonio (1 mol/L), el cual se preparó al disolver 386 g de acetato diluidos en 5 L de agua destilada, ajustando el pH de la solución a 7 con ácido acético. Se agitó la muestra durante 40 minutos de manera manual, simulando un agitador recíproco y se filtró la muestra usando papel Whatman de 125 mm. Se preparó una solución de lantano (10 g/L), obtenida del resultante de disolver 15.6 g de nitrato de lantano y adicionar 42.5 mL de HCL al 37%. Se obtuvo una solución de lantano 1.1 g/L, disolviendo 110 mL de la anterior solución en 1000 mL de agua destilada. Una nueva solución se formó al añadir 1 mL de filtrado y 9 mL de nitrato de lantano (1.1 g/L). Finalmente, se midió cada muestra por absorción atómica a 766.5 nm.

Se aplicó la siguiente fórmula para obtener los valores de potasio (Sadzawka et al., 2006b):

$$K \text{ (cmol/kg)} = (a - b) \times 0,256$$

Dónde:

**a** = mg/L de K obtenidos de la solución del filtrado de la muestra de suelo

**b** = mg/L promedio de los blancos

Para evaluar la concentración total de hidrocarburos (TPH's), se siguió el método US EPA 8440, mediante el cual se realizó un análisis cuantitativo por espectrofotometría de infrarrojos, utilizando dióxido de carbono para extraer el contenido; además de, cuantificar los TPH's por comparación directa con los estándares (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos-EPA, 1996).

Para la determinación del contenido de metales pesados (Cd, Ni y Pb) en el suelo, se empleó espectrofotometría de absorción atómica siguiendo el método EPA SW-846 (Villacís et al., 2016a). Las longitudes de onda recomendadas para este método por técnica de aspiración fueron las siguientes: 229 nm para cadmio, 232 nm para níquel y 283 nm para plomo (Ambiosis S.A., 2008).

### ***Diseño experimental***

El experimento se dispuso en un Diseño Completamente al Azar (DCA) en parcela subdividida, la parcela grande fue el tipo de suelo (perturbado y no perturbado), la parcela mediana las especies arbóreas (*Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia*) y la parcela pequeña fue el inóculo del individuo (corona inoculada y no inoculada). El modelo matemático fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + \delta_{l(i)} + E_j + (SE)_{ij} + \gamma_{l(i)} + I_k + (SI)_{ik} + (EI)_{jk} + (SEI)_{ijk} + e_{ijkl}$$

Dónde:

$Y_{ijkl}$  = Características del suelo/ crecimiento vegetativo de la especie

$\mu$  = media general

$S_i$  = Efecto del i-ésimo tipo de suelo

$\delta_{l(i)}$  = Error para el tipo de suelo

$E_j$  = Efecto de la j-ésima especie arbórea

$(SE)_{ij}$  = Efecto de la interacción tipo de suelo \* especie arbórea

$\gamma_{j(i)}$  = Error para la especie arbórea

$I_k$  = Efecto del k-ésimo inóculo

$(SI)_{ik}$  = Efecto de la interacción del tipo de suelo \* inóculo

$(EI)_{jk}$  = Efecto de la interacción especie arbórea \* inóculo

$(SEI)_{ijk}$  = Efecto de la interacción tipo de suelo \* especie arbórea \* inóculo

$e_{ijkl}$  = Error para el inóculo

### **Análisis de datos**

Las variables edafológicas y dasométricas se caracterizaron mediante estadística descriptiva (media, error estándar y coeficiente de variación). Las variables se analizaron mediante un análisis de varianza utilizando modelos lineales generales y mixtos. Las variables y sus respectivas interacciones se analizaron por pruebas de comparación de medias LSD al 5%. Adicionalmente, se realizaron correlaciones de Pearson entre las variables edafológicas (pH, CE, MO, N y P) y las variables dasométricas (altura, DAP, área basal y volumen de madera) para cada sitio. Todos los análisis fueron realizados mediante el software estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2017).

## Capítulo IV

### Resultados y Discusión

#### Resultados

#### *Altura, DAP, área basal y volumen de madera*

El análisis de varianza para la altura, DAP, área basal y volumen de madera no mostró un efecto significativo para la interacción sitio\*especie\*inóculo. Sin embargo, se encontró un efecto significativo del sitio para la altura, área basal y volumen de madera y un efecto de la especie para las cuatro variables (Tabla 3).

**Tabla 3**

*Análisis de varianza para las variables dasométricas de tres especies arbóreas ubicadas sobre suelos perturbados por actividades de extracción petrolera*

	gl	Altura (m)		DAP (m)		Área basal (m <sup>2</sup> )		Volumen (m <sup>3</sup> )	
		F-Fisher	p-valor	F-Fisher	p-valor	F-Fisher	p-valor	F-Fisher	p-valor
Sitio	3	5,98	0,0011	2,28	0,0870	2,98	0,0371	3,16	0,0299
Especie	2	19,49	<0,0001	18,40	<0,0001	17,18	<0,0001	14,33	<0,0001
Inóculo	1	0,32	0,5733	0,00	0,9476	0,01	0,9427	0,74	0,3914
Sitio*Especie	6	1,50	0,1914	1,91	0,0906	1,67	0,1418	1,72	0,1281
Sitio*Inóculo	3	0,17	0,9134	0,55	0,6512	0,49	0,6925	0,17	0,9139
Especie*Inóculo	2	1,59	0,2106	1,06	0,3517	1,53	0,2231	1,59	0,2116
Sitio*Especie*Inóculo	6	0,26	0,9549	0,16	0,9864	0,29	0,9403	0,43	0,8584

*Nota.* Los sitios, especies e inóculos se consideran factores fijos. gl=grados de libertad

Los árboles plantados en los sitios de CLR obtuvieron una mayor altura, área basal y volumen de madera que los árboles plantados en los otros sitios (Tabla 4).

**Tabla 4**

*Promedio  $\pm$  error estándar de la altura, DAP, área basal y volumen de madera de tres especies arbóreas plantadas en cuatro sitios afectados por las actividades de extracción petrolera*

Sitio	Altura (m)	DAP (m)	Área basal (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
CLR	11,55 $\pm$ 1,35 a	0,13 $\pm$ 0,02 a	0,025 $\pm$ 0,005 a	0,26 $\pm$ 0,05 a
PT	8,02 $\pm$ 0,83 b	0,11 $\pm$ 0,02 a	0,016 $\pm$ 0,004 b	0,10 $\pm$ 0,03 b
PCPP	7,93 $\pm$ 0,94 b	0,09 $\pm$ 0,01 a	0,022 $\pm$ 0,003 b	0,12 $\pm$ 0,03 b
UTSC	6,93 $\pm$ 0,80 b	0,11 $\pm$ 0,02 a	0,015 $\pm$ 0,004 b	0,10 $\pm$ 0,03 b

Nota. Medias en la misma columna con letra similar no son significativamente diferentes (LSD Fisher  $p > 0,05$ ). CLR= Celdas de lodos y rípios; PT= Potrero testigo; PCPP= Plataformas circunscritas a pozos petroleros; UTSC= Unidades de tratamiento de suelos contaminados.

Los árboles de *Piptadenia pteroclada* mostraron los valores más altos para la altura, DAP, área basal y volumen de madera a diferencia de los árboles de *Platymiscium pinnatum* (Tabla 5).

**Tabla 5**

*Promedio  $\pm$  error estándar de la altura, DAP, área basal y volumen de madera de tres especies arbóreas presentes en suelos perturbados*

Especie	Altura (m)	DAP (m)	Área basal (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
<i>Piptadenia pteroclada</i>	12,29 $\pm$ 1,03 a	0,18 $\pm$ 0,02 a	0,033 $\pm$ 0,005 a	0,26 $\pm$ 0,06 a
<i>Zygia longifolia</i>	7,99 $\pm$ 0,63 b	0,17 $\pm$ 0,01 a	0,027 $\pm$ 0,004 a	0,13 $\pm$ 0,02 b
<i>Platymiscium pinnatum</i>	5,55 $\pm$ 0,49 c	0,09 $\pm$ 0,01 b	0,009 $\pm$ 0,002 b	0,04 $\pm$ 0,01 c

Nota. Medias en la misma columna con letra similar no son significativamente diferentes (LSD Fisher  $p > 0,05$ ).

### **pH, CE y materia orgánica**

No se encontró un efecto significativo de la interacción sitio\*especie\*inóculo para pH, CE y materia orgánica. Sin embargo, se encontró un efecto significativo del sitio sobre las tres variables y de la interacción sitio\*especie para la CE (Tabla 6).

**Tabla 6**

*Análisis de varianza para las variables pH, CE y materia orgánica presente en suelos perturbados con tres especies arbóreas*

	gl	pH		CE (ds/m)		Materia orgánica (%)	
		F-Fisher	p-valor	F-Fisher	p-valor	F-Fisher	p-valor
Sitio	3	31,03	<0,0001	6,66	0,0004	14,49	<0,0001
Especie	3	1,69	0,1741	7,06	0,0002	0,07	0,9738
Inóculo	1	0,21	0,6443	0,96	0,3307	0,40	0,5267
Sitio*Especie	9	1,93	0,0572	3,43	0,0011	0,73	0,6844
Sitio*Inóculo	3	0,55	0,6477	0,66	0,5773	0,37	0,7782
Especie*Inóculo	3	0,28	0,8384	0,59	0,6224	0,27	0,8438
Sitio*Especie*Inóculo	9	0,09	0,9997	0,75	0,6650	0,37	0,9463

*Nota.* Los sitios, especies e inóculos se consideran factores fijos. gl=grados de libertad; CE= conductividad eléctrica

Los potreros presentaron mayor CE y contenido de materia orgánica que las CLR. El pH en los potreros, CLR y UTSC fue mayor que en PCPP (Tabla 7).

**Tabla 7**

*Promedio  $\pm$  error estándar del pH, CE y materia orgánica presentes en suelos de cuatro sitios afectados por actividades petroleras*

<b>Sitio</b>	<b>pH</b>	<b>CE (ds/m)</b>	<b>Materia orgánica (%)</b>
PT	6,287 $\pm$ 0,178 a	0,189 $\pm$ 0,03 a	1,84 $\pm$ 0,09 a
CLR	6,058 $\pm$ 0,125 a	0,082 $\pm$ 0,01 c	1,20 $\pm$ 0,05 c
PCPP	5,083 $\pm$ 0,060 b	0,101 $\pm$ 0,01 bc	1,35 $\pm$ 0,05 b
UTSC	5,886 $\pm$ 0,172 a	0,120 $\pm$ 0,02 b	1,64 $\pm$ 0,10 a

*Nota.* Medias en la misma columna con letra similar no son significativamente diferentes (LSD Fisher  $p > 0,05$ ). CLR= Celdas de lodos y ripios; PT= Potrero testigo; PCPP= Plataformas circunscritas a pozos petroleros; UTSC= Unidades de tratamiento de suelos contaminados.

El valor más alto de conductividad eléctrica se presentó en los suelos aledaños a la especie *Zygia longifolia* en potreros; mientras que, el valor más bajo fue encontrado en los suelos de la especie *Platymiscium pinnatum* en las UTSC (Tabla 8).

**Tabla 8**

*Promedio  $\pm$  error estándar de conductividad eléctrica de suelos aledaños a tres especies arbóreas o claros intermedios provenientes de cuatro sitios afectados por actividades de extracción petrolera*

<b>Sitio</b>	<b>Especie arbórea / claro</b>	<b>CE (ds/m)</b>	
PT	<i>Zygia longifolia</i>	0,31 $\pm$ 0,07	a
	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,23 $\pm$ 0,05	ab
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,11 $\pm$ 0,01	bcde
	Claro	0,10 $\pm$ 0,01	cde
UTSC	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,21 $\pm$ 0,05	abc
	Claro	0,12 $\pm$ 0,03	bcde
	<i>Zygia longifolia</i>	0,10 $\pm$ 0,02	de
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,06 $\pm$ 0,01	e

Sitio	Especie arbórea / claro	CE (ds/m)	
PCPP	<i>Zygia longifolia</i>	0,16 ± 0,02	bcd
	Claro	0,09 ± 0,02	e
	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,08 ± 0,02	e
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,07 ± 0,01	e
CLR	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,10 ± 0,03	de
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,09 ± 0,02	e
	<i>Zygia longifolia</i>	0,08 ± 0,01	e
	Claro	0,06 ± 0,01	e

*Nota.* Medias con letra similar no son significativamente diferentes (LSD Fisher  $p > 0,05$ ). PT= Potrero testigo; UTSC= Unidades de tratamiento de suelos contaminados; PCPP= Plataformas circunscritas a pozos petroleros; CLR= Celdas de lodos y ripios.

Los suelos aledaños a la especie arbórea *Zygia longifolia* presentaron valores más altos de conductividad eléctrica (Tabla 9).

**Tabla 9**

*Promedio ± error estándar de la conductividad eléctrica en suelos aledaños a tres especies arbóreas y claros intermedios ubicados en suelos perturbados*

Especie/ claro	CE (ds/m)	
<i>Zygia longifolia</i>	0,16 ± 0,02	a
<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,15 ± 0,02	a
<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,08 ± 0,01	b
Claro	0,09 ± 0,01	b

*Nota.* Medias en la misma columna con letra similar no son significativamente diferentes (LSD Fisher  $p > 0,05$ ).

### **Nitrógeno y fósforo**

El análisis de varianza para el contenido de nitrógeno mostró un efecto significativo para la interacción sitio\*especie y para el inóculo microbiano. Además, se encontró un efecto significativo del sitio e inóculo microbiano sobre el contenido de P (Tabla 10).

**Tabla 10**

*Análisis de varianza para contenido de nitrógeno y fósforo de los suelos aledaños a tres especies arbóreas ubicadas sobre suelos perturbados*

	gl	N (%)		P (ppm)	
		F-Fisher	p-valor	F-Fisher	p-valor
Sitio	3	1,62	0,1908	34,76	<0,0001
Especie	3	0,39	0,7571	0,78	0,5088
Inóculo	1	13,87	0,0003	5,23	0,0243
Sitio*Especie	9	2,06	0,0411	0,42	0,9206
Sitio*Inóculo	3	0,45	0,7188	0,19	0,9016
Especie*Inóculo	3	0,27	0,8488	2,01	0,1180
Sitio*Especie*Inóculo	9	0,72	0,6905	1,88	0,0638

*Nota.* Los sitios, especies e inóculos se consideran factores fijos. gl=grados de libertad

La especie *Piptadenia pteroclada* plantada en potreros presentó mayor contenido de nitrógeno en el suelo, mientras que, el valor más bajo se mostró en los claros de las PCPP (Tabla 11).

**Tabla 11**

*Promedio  $\pm$  error estándar del contenido de nitrógeno en suelos aledaños a tres especies arbóreas o claros intermedios provenientes de cuatro sitios perturbados*

<b>Sitio</b>	<b>Especie / claro</b>	<b>N (%)</b>	
PT	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,15 $\pm$ 0,06	a
	<i>Zygia longifolia</i>	0,11 $\pm$ 0,03	ab
	Claro	0,13 $\pm$ 0,05	ab
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,04 $\pm$ 0,02	abc
UTSC	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,06 $\pm$ 0,03	abc
	Claro	0,05 $\pm$ 0,02	abc
	<i>Zygia longifolia</i>	0,04 $\pm$ 0,02	abc
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,06 $\pm$ 0,01	abc
PCPP	<i>Zygia longifolia</i>	0,12 $\pm$ 0,03	ab
	Claro	0,01 $\pm$ 0,00	c
	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,03 $\pm$ 0,02	bc
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,06 $\pm$ 0,03	abc
CLR	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,05 $\pm$ 0,02	abc
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,09 $\pm$ 0,03	ab
	<i>Zygia longifolia</i>	0,04 $\pm$ 0,02	bc
	Claro	0,05 $\pm$ 0,02	abc

*Nota.* Medias en la misma columna con letra similar no son significativamente diferentes (LSD Fisher  $p > 0,05$ ). PT= Potrero testigo; UTSC= Unidades de tratamiento de suelos contaminados; PCPP= Plataformas circunscritas a pozos petroleros; CLR= Celdas de lodos y ripios.

El contenido de fósforo fue mayor en los potreros que en el resto de sitios (Tabla 12).

**Tabla 12**

*Promedio  $\pm$  error estándar del contenido de fósforo presente en suelos de cuatro sitios afectados por actividades de extracción petrolera*

<b>Sitio</b>	<b>P (ppm)</b>	
PT	20,96 $\pm$ 0,90	a
PCPP	17,93 $\pm$ 1,05	b
CLR	13,80 $\pm$ 1,30	c
UTSC	11,57 $\pm$ 0,61	c

*Nota.* Medias en la misma columna con letra similar no son significativamente diferentes (LSD Fisher  $p > 0,05$ ). PT= Potrero testigo; PCPP= Plataformas circunscritas a pozos petroleros; CLR= Celdas de lodos y ripios; UTSC= Unidades de tratamiento de suelos contaminados.

Los suelos inoculados presentaron mayor contenido de nitrógeno y fósforo que los suelos no inoculados (Tabla 13).

**Tabla 13**

*Promedio  $\pm$  error estándar de nitrógeno y fósforo en suelos inoculados y no inoculados provenientes de tres especies arbóreas o claros intermedios de zonas perturbadas por actividades de petróleo*

<b>Inóculo</b>	<b>N (%)</b>		<b>P (ppm)</b>	
<b>Inoculado</b>	0,095 $\pm$ 0,01	a	17,18 $\pm$ 0,86	a
<b>No Inoculado</b>	0,041 $\pm$ 0,01	b	14,95 $\pm$ 0,78	b

*Nota.* Medias en la misma columna con letra similar no son significativamente diferentes (LSD Fisher  $p > 0,05$ ).

### Potasio

El contenido de K se encontró presente en los suelos de las tres especies arbóreas en Shushufindi (sitio de CRL) y en los suelos aledaños a individuos de la especie *Piptadenia pteroclada* pertenecientes a Auca (sitio de UTSC). Además, el K se encontró presente en los sitios de potreros pero en el resto de sitios no se registraron cantidades del elemento (Tabla 14).

**Tabla 14**

*Resultados de potasio obtenidos en sitios perturbados y no perturbados*

Sitio	Tipo de sitio	Especie/claro	K (cmol/ kg)
Auca	Suelo contaminado	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,04-0,80
		<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,29-0,57
Shushufindi	Celdas de lodo y ripio	<i>Zygia longifolia</i>	0,32-0,40
		<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,30-0,36
		Claro	0,16-0,59
		<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,23-0,43
Secoya 2-3	Potrero	<i>Zygia longifolia</i>	0,31-0,40
		<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,28-0,37
		Claro	0,28-0,36
		<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,28-0,70
Ribereños	Potrero	<i>Zygia longifolia</i>	0,43-0,52
		<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,38-0,47
		Claro	0,13-0,51

### Hidrocarburos totales y metales pesados

La cantidad de TPH's encontrados en los análisis de laboratorio realizados en 96 muestras de suelos provenientes de los sitios PCPP, UTSC y CLR, mostraron concentraciones menores de 10 ppm. Los suelos provenientes de 48 muestras de los

sitios CLR y UTSC, presentaron un contenido de Cd en una concentración menor de 1 ppm. Mientras que, la cantidad de Ni presente fue menor a 16 ppm, sin encontrar diferencias significativas para las especies arbóreas. Finalmente, el contenido de Pb fue menor de 7 ppm para las tres especies arbóreas de las UTSC.

### Correlaciones entre variables dasométricas y edafológicas

Se encontró una asociación positiva entre N con el DAP ( $r=0,73$ ;  $p=0,0419$ ) y con el área basal ( $r=0,78$ ;  $p=0,0236$ ) para *Zygia longifolia* en las CLR y también, entre el P y DAP ( $r=0,73$ ;  $p=0,0394$ ) para *Piptadenia pteroclada* en las PCPP. Adicionalmente, se encontraron correlaciones negativas entre el P y DAP ( $r= -0,75$ ;  $p=0,0313$ ) para *Zygia longifolia* en las UTSC. En la Tabla 15 se muestran las relaciones existentes entre variables dasométricas y variables edafológicas.

**Tabla 15**

*Coefficientes de correlación de Pearson para variables dasométricas y edafológicas de tres especies arbóreas en cuatro sitios perturbados por actividad petrolera*

	<i>Piptadenia pteroclada</i>		<i>Zygia longifolia</i>		<i>Platymiscium pinnatum</i>	
	r	p-valor	r	p-valor	r	p-valor
CLR						
N-DAP	-----	-----	0,725	0,0419	-----	-----
N-AB	-----	-----	0,776	0,0236	-----	-----
PCPP						
CE-DAP	0,803	0,0164	-----	-----	-----	-----
CE-AB	0,890	0,0031	-----	-----	-----	-----
CE-Vol	0,952	0,0003	-----	-----	-----	-----
P-DAP	0,731	0,0394	-----	-----	-----	-----

	<i>Piptadenia pteroclada</i>		<i>Zygia longifolia</i>		<i>Platymiscium pinnatum</i>	
	r	p-valor	r	p-valor	r	p-valor
PT						
pH-DAP	-----	-----	-----	-----	0,766	0,0266
UTSC						
DAP-pH	-----	-----	-----	-----	0,924	0,0010
DAP-CE	-----	-----	0,768	0,0262	-----	-----
DAP-P	-----	-----	-0,752	0,0313	-----	-----
pH-AB	-----	-----	-----	-----	0,910	0,0017
pH-Altura	-----	-----	-----	-----	0,920	0,0012
pH-Vol	-----	-----	-----	-----	0,940	0,0005
MO-DAP	-----	-----	-----	-----	-0,832	0,0105
MO-Altura	-----	-----	-----	-----	-0,878	0,0041
MO-AB	-----	-----	-----	-----	-0,814	0,0138
MO-Vol	-----	-----	-----	-----	-0,862	0,0059
CE-Altura	0,774	0,0242	-----	-----	-----	-----

*Nota.* DAP=diámetro a la altura del pecho; AB= Área basal; Vol= volumen de madera; N=nitrógeno; P= fósforo; CE= conductividad eléctrica; MO= materia orgánica. CLR= Celdas de lodos y ripios; PCPP= Plataformas circunscritas a pozos petroleros; PT= Potrero testigo; UTSC= Unidades de tratamiento de suelos contaminados.

## Discusión

En este estudio se presenta información sobre el desempeño de los árboles de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos perturbados inoculados con material proveniente del bosque natural. Además, se muestran los efectos de las especies arbóreas sobre las características de los suelos perturbados inoculados luego de 7 años del establecimiento de las plantaciones. En términos generales, los árboles de *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia* presentaron un incremento en el desarrollo vegetativo y una reducción de los niveles de contaminantes hidrocarburíferos respecto a datos de estudios previos a la inoculación. Luego de dos

años de la aplicación del inóculo, se encontró un incremento en el contenido de nitrógeno y fósforo en los suelos inoculados. Además, se destacó la especie *Piptadenia pteroclada* al mostrar mayores valores de altura, DAP, área basal, volumen de madera y contenido de nitrógeno.

### ***Desempeño de las especies arbóreas***

Las tres especies arbóreas mostraron un aumento de la altura y diámetro luego de dos años de inoculación de los suelos, respecto a valores obtenidos en estudios previos reportados por Espinoza (2018) a los cinco años de edad de los árboles, de esta manera, *Piptadenia pteroclada* incrementó su altura y diámetro promedio en 4.79 m y 0.058 m respectivamente; *Zygia longifolia* en 3.75 m y 0.062 m y *Platymiscium pinnatum* en 1.12 m y 0.019 m. Cabe mencionar que, la especie *Piptadenia pteroclada* destacó con valores promedio de 12.29 m en altura y 0.18 m de diámetro. Los resultados obtenidos mantienen una misma tendencia acorde con estudios reportados por Villacís et al. (2016b), que destaca a *Piptadenia pteroclada* por tener el mayor desempeño vegetativo desde la etapa de trasplante hasta los dos años de edad. Espinoza (2018), también recalca que *Piptadenia pteroclada* hasta el quinto año presentó mayores valores de altura y diámetro a comparación de las otras dos especies arbóreas. Este desempeño puede deberse a que los árboles de *Piptadenia pteroclada* están compuestos por un sistema radicular extenso, que le permite sujetarse a las partículas del suelo e incrementar la superficie de absorción de los nutrientes y del agua (Palacios, 2011). Por su parte, *Platymiscium pinnatum* reduce su crecimiento en zonas con características del suelo que presentan una textura arcillosa, problemas de drenaje y compactación (Rodríguez-Peraza, 2018).

***Efecto del tipo de suelo en las variables edafológicas y contenido de contaminantes***

El pH de los sitios perturbados osciló entre ligero a fuertemente ácido (6.06 a 5.08) (USDA, 2011). Este valor de pH se incrementó en los sitios de CLR, UTSC y potreros en 0.258; 0.236 y 1.147 unidades correspondientemente luego de dos años de inoculación. Según menciona Husson et al. (2018), la presencia de restos de hojarasca de las especies del lugar y el incremento de materia orgánica descompuesta, inciden ligeramente en un aumento de pH debido a la alcalinidad de la ceniza agregada. Además, la absorción de elementos por parte de las especies vegetales, también ocasiona una acidificación del suelo por el reemplazo de los iones por cationes hidrógeno ( $H^+$ ) (Moterle et al., 2016). Bajo estas condiciones de acidez, los sitios de PCPP y UTSC presentaron un menor desarrollo de los árboles, el cual puede atribuirse a que el pH fuera de un rango de 6 a 6.7 (Husson et al., 2018) altera la absorción de nutrientes al interferir en los procesos físico-químicos de los componentes del suelo (González et al., 2017). Adicionalmente, Andrades & Martínez (2014), manifiestan que ante estas condiciones de pH, los micro y macro elementos (P principalmente) tienden a precipitar con mayor frecuencia en formas menos solubles y no permiten que la planta los pueda absorber.

La materia orgánica (MO) presentó niveles que oscilaron entre contenido medio a bajo (1.84 a 1.20 %) (Andrades & Martinez, 2014) y comparado con el reporte de Espinoza (2018), estos niveles disminuyeron para todos los sitios después de dos años de inoculación de los suelos. Acorde con Zoppini et al. (2019), esto puede deberse a que la MO sufrió mayor grado de descomposición por las condiciones ecológicas de las zonas (cálido-húmedas) y también, por el aumento de las actividades microbianas (Jílková et al., 2020). Estudios realizados por Hagedorn et al. (2015), indican que está

MO se encuentra en una fase móvil (forma disuelta), como producto de la lixiviación de exudados de raíces y por la hojarasca degradada de los árboles.

Los suelos de los sitios perturbados y no perturbados son suelos no salinos, que presentaron niveles menores a 4 dS/m para la conductividad eléctrica (CE) (Kochba et al., 2004; Andrades & Martinez, 2014). Siendo el sitio de CLR (0.082 dS/m), el cual mostró un menor valor de CE y un mayor crecimiento de los individuos para las tres especies arbóreas. Esto concuerda con Rahmati & Hamzhepour (2016), quienes indican que mientras más bajo sea el valor de CE, se reducen las limitaciones para el desarrollo de las especies vegetales por problemas de salinidad.

El contenido tanto de N como de P se incrementó considerablemente en los suelos inoculados de las tres especies arbóreas en los cuatro sitios evaluados. Según investigaciones reportadas por Kumar et al. (2020), este incremento de ambos elementos es atribuido a la presencia de microbiota en los suelos, la misma que transforma los elementos no disponibles en formas asimilables por las plantas y/o estimula el desarrollo de las especies a través de una colonización de la zona radicular, de esta manera, aumenta el crecimiento de la raíz, formación de pelos absorbentes y absorción de nutrientes. Estudios previos realizados en los mismos sitios por Vega (2021), corroboran un incremento de las poblaciones microbianas luego de la inoculación de los suelos de las zonas perturbadas, ya que se aislaron 79 morfoespecies fúngicas ectorizosféricas, predominando especies de los géneros de *Scopulariopsis* y *Trichoderma*. De manera que, existió un incremento de 48 morfoespecies fúngicas posterior a la aplicación del inóculo (Sosa, 2018; Vega, 2021). Estas especies reportadas presentan la capacidad de producir enzimas degradadoras de compuestos hidrocarbúricos e incrementan la dinámica de nutrientes en el suelo

(Essabri et al., 2019; Du et al., 2011). El incremento de los niveles de N y P puede atribuirse a la presencia de los microorganismos aplicados y a las características de las especies arbóreas.

Cabe destacar que, los valores de N y P obtenidos en las muestras de suelos provenientes de los cuatro sitios evaluados, presentaron un incremento a comparación del inóculo aplicado (mayor a 0.002% de N y 4 ppm de P). Ambos elementos se encontraron en niveles medios (Maycotte et al., 2011) en las zonas perturbadas y acorde con Li et al. (2019), estas cantidades de P presentes en el suelo tiene una asociación positiva con el N; además de, incrementar el desarrollo de las plantas por un aumento de la absorción de otros microelementos esenciales.

Por otra parte, el contenido de K en el sitio de CLR y potreros osciló entre nivel medio a bajo de K, cantidades que son superiores al contenido de K del inóculo aplicado (0.12 cmol/kg). No obstante, acorde con investigaciones realizadas por Darunsontaya et al. (2012), se enfatiza que la presencia nula del contenido de K para el resto de sitios de PCPP, UTSC y CLR, puede atribuirse a una alta meteorización del suelo, el cual presentaría contenidos bajos de minerales de arcilla 2:1 y por ende, escasas reservas de K. De modo que, de existir K podría encontrarse en mínimas cantidades anexas a minerales (feldespato, mica o illita), y cuya capacidad de suministro de K para las plantas, estará relacionada con la forma intercambiable del elemento (Moterle et al., 2016). Según Bakhshandeh et al. (2017), el K al estar presente en diversas formas en el suelo (90 a 98% del total en forma insoluble), dificulta la movilidad e intercambio del elemento entre el sistema planta-suelo.

Los sitios perturbados que fueron inoculados y no inoculados presentaron niveles bajos de TPH's, cantidades que están dentro de los rangos permisibles

regulados por la normativa RAOHE para protección del suelo con menos de 1000 ppm de TPH'S para los ecosistemas sensibles (Ministerio de Recursos Naturales No Renovables, 2015). Por su parte, los niveles de los metales pesados en los sitios de CLR y UTSC, presentaron una disminución considerable a partir de los dos años de instalada la plantación (Villacís et al., 2016b) hasta la actualidad. Los valores de Cd, Ni y Pb actualmente están catalogados como cantidades bajas, acorde con la categoría de uso agrícola mencionada por Carrillo et al. (2017a), que considera un suelo descontaminado de elementos potencialmente tóxicos (EPT), cuando el suelo presenta valores máximos de 37 ppm de Cd; 1,600 ppm de Ni y 400 ppm de Pb.

Luego de dos años de la inoculación de los suelos perturbados, las condiciones físico-químicas del suelo tuvieron una fluctuación y existió una reducción de la cantidad de contaminantes de hidrocarburos y metales pesados (Cd, Ni y Pb), lo cual se puede atribuir a un incremento de los microorganismos, en conjunto con las características de las especies arbóreas. Noguez et al. (2017), menciona que las especies de la familia Fabaceae destacan al haber desarrollado una mayor capacidad de transformación del nitrógeno atmosférico y una mayor absorción de cantidades de otros nutrientes, producto de una simbiosis con especies bacterianas (*Rhizobium* y *Mesorhizobium* generalmente). Otros estudios realizados por Bento et al. (2012) con especies Fabaceae, destacaron a *Samanea saman* como una especie con potencial para remediar suelos al reducir contaminantes de hidrocarburos en asociación con microorganismos simbiotes; mientras que, *Acaciella angustissima* y *Mimosa caesalpinifolia* son arbustos Fabaceae tolerantes a suelos perturbados.

De esta manera, se hace referencia a que las especies de la familia Fabaceae presentan características de mayor adaptación ante condiciones extremas de fertilidad y contaminación.

## Capítulo V

### Conclusiones y Recomendaciones

#### Conclusiones

El inóculo aplicado de tierra negra proveniente de bosque natural en los suelos perturbados mostró un efecto significativo en el contenido de nitrógeno y fósforo para las tres especies arbóreas de 7 años de edad y claros intermedios. Sin embargo, no presentó significancia sobre las variables: altura, DAP, área basal, volumen de madera, pH, CE y materia orgánica.

Los árboles de la especie *Piptadenia pteroclada* presentaron los valores más altos para la altura, DAP, área basal, volumen de madera y contenido de nitrógeno. Mientras que, la especie *Zygia longifolia* mostró el mayor valor de conductividad eléctrica. Por otra parte, la especie de *Platymiscium pinnatum* en todos los sitios mostró los valores más bajos para todas las variables evaluadas.

Los suelos provenientes de los sitios perturbados, celdas de lodos y ripios (CLR) y unidades de tratamiento de suelos contaminados (UTSC), mostraron menores cantidades de los contaminantes TPH's, Cd, Ni y Pb para las tres especies arbóreas.

Se encontraron relaciones positivas entre las variables edafológicas de pH y CE con las variables dasométricas de altura, DAP, área basal y volumen de madera; también, se correlacionaron positivamente los niveles de nitrógeno con el DAP y con el área basal. No obstante, se encontraron relaciones negativas entre el contenido de fósforo y el DAP.

## Recomendaciones

Emplear las especies *Piptadenia pteroclada* y *Zygia longifolia* para futuros programas de reforestación en zonas contaminadas con derivados del petróleo, debido a la óptima respuesta obtenida de crecimiento y adaptación.

Realizar análisis del contenido de metales pesados en diferentes partes del árbol (principalmente hojas, raíces y corteza) de cada especie arbórea y en cada sitio, con el objetivo de comprobar la capacidad de acumulación que tiene cada especie y usarla para posteriores investigaciones; teniendo presente que la preparación de las muestras es de relevancia para cuantificar de forma correcta los contaminantes.

Evaluar el contenido de microelementos en el suelo, lo cual permitiría obtener un análisis completo de la cantidad de nutrientes presentes en el suelo, comprobar las relaciones estequiométricas entre los mismos y conocer el grado de descontaminación alcanzada en los sitios tratados.

## Bibliografía

- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos-EPA. (1996). *Total de hidrocarburos de petróleo recuperables por espectrofotometría de infrarrojo*.
- Akhtar, N., & Amin-ul, M. (2020). Mycoremediation: Expunging environmental pollutants. *Biotechnology Reports* 2, 26, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00452>
- Ambiosis S.A. (2008). *Manual de asesoría en metodología medición EPA*. 80-83. [http://www.sag.cl/sites/default/files/INFORME\\_FINAL\\_METODOS\\_EPA.pdf](http://www.sag.cl/sites/default/files/INFORME_FINAL_METODOS_EPA.pdf)
- Andrades, M., & Martinez, M. E. (2014). *Fertilidad del suelo y parámetros que la definen* (Tercera edición, pp. 1-34). Servicio de publicaciones.
- Azimi, S., Kaur, T., & Gandhi, T. K. (2020). A deep learning approach to measure stress level in plants due to Nitrogen deficiency. *Measurement*, 108650. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108650>
- Bakhshandeh, E., Pirdashti, H., & Lendeh, K. (2017). Phosphate and potassium-solubilizing bacteria effect on the growth of rice. *Ecological Engineering*, 103, 164-169. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.008>
- Ballesteros, A. (2009). *Sistemas para el tratamiento de residuos de perforación en el campo Tarapoa operado por la empresa Andes Petroleum S.A* [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. [http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6150/5/Parte%20Segunda\\_TesisCBV.pdf](http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6150/5/Parte%20Segunda_TesisCBV.pdf)

Banco Central del Ecuador. (2020). *Reporte del sector petrolero*.

<https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ASP201906.pdf>

Bento, R., Saggin-Júnior, P., Rosa, O., Rosangela, R., Silva, E., Tavares, S., Landa, F., Martins, L., Volpon, A. (2012). Selection of leguminous trees associated with symbiont microorganisms for phytoremediation of petroleum contaminated soil. *Water Air Soil Pollut.* 223 (9), 5659-5671. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-012-1305-3>

Bhattacharya, M., Guchhait, S., Biswas, D., & Singh, R. (2019). Evaluation of a microbial consortium for crude oil spill bioremediation and its potential uses in enhanced oil recovery. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 18, 101034. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101034>

Bravo, E. (2007). *Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad*. Acción Biológica. [https://www.inredh.org/archivos/documentos\\_ambiental/impactos\\_explotacion\\_petrolera\\_esp.pdf](https://www.inredh.org/archivos/documentos_ambiental/impactos_explotacion_petrolera_esp.pdf)

Cancino. (2012). *Dendrometría básica* (Universidad de Concepción). Recuperado de: [repositorio.udec.cl/bitstream/11594/407/2/Dendrometria\\_Basica.pdf](http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/407/2/Dendrometria_Basica.pdf)

Carrillo, R., Perea, Y., & González, M. C. A. (2017b). Fitorremediación asistida con enmiendas y fitoestabilización de elementos potencialmente tóxicos. En *Uso de leguminosas en fitorremediación* (Vol. 10, pp. 15-20).

[https://www.colpos.mx/wb\\_pdf/Agroproductividad/2017/AGROPRODUCTIVIDAD\\_IV\\_2017.pdf](https://www.colpos.mx/wb_pdf/Agroproductividad/2017/AGROPRODUCTIVIDAD_IV_2017.pdf)

Carrillo, R., Ruiz, A. D., & González, M. (2017a). *Legal aspects of soils contaminated by potentially toxic elements in Mexico and the pertinence of phytoremediation* (Vol. 10, pp. 68-72).

[https://www.colpos.mx/wb\\_pdf/Agroproductividad/2017/AGROPRODUCTIVIDAD\\_IV\\_2017.pdf](https://www.colpos.mx/wb_pdf/Agroproductividad/2017/AGROPRODUCTIVIDAD_IV_2017.pdf)

Charrupi, N., & Martínez, D. (2017). *Estudio ambiental del cadmio y su relación con suelos destinados al cultivo de cacao en los departamentos de Arauca y Nariño* [Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria].

[https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1717&context=ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1717&context=ing_ambiental_sanitaria)

Chaudhary, D. K., Bajagain, R., Jeong, S. W., & Kim, J. (2019). Development of a bacterial consortium comprising oil-degraders and diazotrophic bacteria for elimination of exogenous nitrogen requirement in bioremediation of diesel-contaminated soil. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35, 99. <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2674-1>

Chaudhary, D. K., & Kim, J. (2019). New insights into bioremediation strategies for oil-contaminated soil in cold environments. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 142, 58-72. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.05.001>

Choo, H., Song, J., Lee, W., & Lee, C. (2016). Effects of clay fraction and pore water conductivity on electrical conductivity of sand-kaolinite mixed soils. *Journal of*

*Petroleum Science and Engineering*, 147, 735-745.

<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.10.009>

Chu, Y., Liu, S., Wang, F., Bian, H., & Cai, G. (2018). Electric conductance response on engineering properties of heavy metal polluted soils. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.08.046>

CITGAV-Centro de Investigaciones de Tecnologías Ambientales. (2018). *Composición del inóculo*.

Da Cunha, T. (2009). Modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza de árboles de *Pinus taeda* L. en el sur de Brasil. *Kurú: Revista Forestal (Costa Rica)*, 6(16), 1-14.

Da Cunha, T., Finger, C. A., & Hasenauer, H. (2016). Tree basal area increment models for Cedrela, Amburana, Copaifera and Swietenia growing in the Amazon rain forests. *Forest Ecology and Management*, 365, 174-183.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.031>

Darunsontaya, T., Suddhiprakarn, A., Kheoruenromne, I., Prakongkep, N., & Gilkes, R. (2012). The forms and availability to plants of soil potassium as related to mineralogy for upland Oxisols and Ultisols from Thailand. *Geoderma*, 170, 11-24.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.10.002>

Di Rienzo, J. A., Macchiavelli, R., & Casanoves, F. (2017). *Modelos lineales mixtos- Aplicaciones en InfoStat* (Primera edición). Grupo InfoStat.

- Díaz, A. (2018). Caracterización de los suelos de la Amazonía ecuatoriana. En *Agroforestería sostenible en la Amazonía Ecuatoriana-Fragilidad de los suelos en la Amazonía ecuatoriana y potenciales alternativas agroforestales para el manejo sostenible* (pp. 33-39).
- Diéguez, U., Castedo, F., Barrio, M., Álvarez, J. G., Rojo, A., & Ruiz, A. D. (2005). *Prácticas de dasimetría*.  
[https://www.researchgate.net/publication/305640101\\_Practicas\\_de\\_dasometria](https://www.researchgate.net/publication/305640101_Practicas_de_dasometria)
- Du, W., Wan, Y., Zhong, N., Fei, J., Zhang, Z., Chen, L., & Hao, J. (2011). Status quo of soil petroleum contamination and evolution of bioremediation. *Petroleum Science*, 8(4), 502-514. <https://doi.org/10.1007/s12182-011-0168-3>
- EPA (Environmental Protection Agency). (2007). *The use of soil amendments for remediation, revitalization and reuse EPA 542- R-07-013*. U. S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio.
- Espinoza, E. (2018). *Relaciones entre las características edafológicas y las variables dasométricas de tres especies arbóreas plantadas en suelos perturbados por la actividad petrolera*. Carrera de Ingeniería Agropecuaria, Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- Essabri, A., Aydinlik, N. P., & Williams, N. E. (2019). Bioaugmentation and biostimulation of total petroleum hydrocarbon degradation in a petroleum-contaminated soil with fungi isolated from olive oil effluent. *Water, Air & Soil Pollution*, 230: 76.  
<https://doi.org/10.1007/s11270-019-4127-8>

- Fernández, L., Rojas, N., Roldan, T., Ramírez, M., Zegarra, H., Hernández, R., Reyes, J., Flores, D., & Arce, J. (2011). *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. Instituto Mexicano del Petróleo.
- Ferreria, T., Krticka, J., Reid, E., Posselt, A., Bissani, C., Campanhola, E., Brunetto, G., Anghinoni, I., Carvalho, C., & Tiecher, T. (2020). Forms and balance of soil potassium from a long-term integrated crop-livestock system in a subtropical Oxisol. *Soil & Tillage Research*. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104864#>
- Fu, X., Cui, Z., & Zang, G. (2014). Migration, speciation and distribution of heavy metals in an oil-polluted soil affected by crude oil extraction processes. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 16(7), 1737. <https://doi.org/10.1039/c3em00618b>
- GADPO-Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Orellana. (2019). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de Orellana 2015-2019*. [https://www.gporellana.gob.ec/wp-content/uploads/2015/11/PDYOT-2015-2019\\_ORELLANA\\_ACTUALIZADO.pdf](https://www.gporellana.gob.ec/wp-content/uploads/2015/11/PDYOT-2015-2019_ORELLANA_ACTUALIZADO.pdf)
- GADPS-Gobierno Autónomo Provincial de Sucumbíos. (2015). *Dirección de planificación y ordenamiento territorial de Sucumbíos*. [http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL\\_SNI/data\\_sigad\\_plus/sigadplusdocumentofinal/2160000210001\\_PDyOT%20Sucumbios%20-%202015%20\(actualizaci%C3%B3n\)\\_17-08-2015\\_18-31-36.pdf](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/2160000210001_PDyOT%20Sucumbios%20-%202015%20(actualizaci%C3%B3n)_17-08-2015_18-31-36.pdf)

Galán, E., & Romero, A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, 48-60.

[http://www.ehu.eus/sem/macla\\_pdf/macla10/Macla10\\_48.pdf](http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf)

González, M. C. A., & Carrillo, R. (2017). *Fitorremediación asistida por microorganismos con énfasis en hongos arbusculares* (Vol. 10, pp. 28-33).

[https://www.colpos.mx/wb\\_pdf/Agroproductividad/2017/AGROPRODUCTIVIDAD\\_IV\\_2017.pdf](https://www.colpos.mx/wb_pdf/Agroproductividad/2017/AGROPRODUCTIVIDAD_IV_2017.pdf)

González, M. C. A., Carrillo, R., Sánchez, A. S., & Ruiz, A. (2017). *Alternativas de fitorremediación de sitios contaminados con elementos potencialmente tóxicos* (Vol. 10, pp. 8-14).

[https://www.colpos.mx/wb\\_pdf/Agroproductividad/2017/AGROPRODUCTIVIDAD\\_IV\\_2017.pdf](https://www.colpos.mx/wb_pdf/Agroproductividad/2017/AGROPRODUCTIVIDAD_IV_2017.pdf)

Guaranda, W. (2016). *Apuntes sobre la explotación petrolera en el Ecuador*.

[https://www.inredh.org/archivos/pdf/boletin\\_petroleo\\_apuntes.pdf](https://www.inredh.org/archivos/pdf/boletin_petroleo_apuntes.pdf)

Hagedorn, F., Bruderhofer, N., & Ferrari, A. (2015). Tracking litter-derived dissolved organic matter along a soil chronosequence using <sup>14</sup>C imaging: Biodegradation, physico-chemical retention or preferential flow? *Soil Biology & Biochemistry*, 88, 333-343. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.014>

Haneklaus, S., & Schnug, E. (2016). Assessing the plant phosphorus status.

*Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero*, 95-125. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7612-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7612-7_6)

Husson, O., Brunet, A., Babre, A., Charpentier, H., Durand, M., & Sarthou, J.-P. (2018). Conservation Agriculture systems alter the electrical characteristics (Eh, pH and EC) of four soil types. *Soil & Tillage Research*, 176, 57-68.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2017.11.005>

INAMHI-Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2016). *Boletín climatológico semestral*.  
[https://www.serviciometeorologico.gob.ec/meteorologia/boletines/bol\\_sem.pdf](https://www.serviciometeorologico.gob.ec/meteorologia/boletines/bol_sem.pdf)

Instituto Nacional de Innovación Agraria-INIA. (2017). *Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego*.  
[http://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/inia/504/1/Bazan-Manual\\_de\\_procedimientos\\_de\\_los.pdf](http://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/inia/504/1/Bazan-Manual_de_procedimientos_de_los.pdf)

Jeong, S., Moon, H. S., Shin, D., & Nam, K. (2013). Survival of introduced phosphate-solubilizing bacteria (PSB) and their impact on microbial community structure during the phytoextraction of Cd-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 263, 441-449. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.09.062>

Jílková, V., Straková, P., & Frouza, J. (2020). Foliage C:N ratio, stage of organic matter decomposition and interaction with soil affect microbial respiration and its response to C and N addition more than C:N changes during decomposition. *Applied Soil Ecology*, 152, 103568. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103568>

Jurjevic, L., Liang, X., Gašparovic, M., & Balenović, I. (2020). Is field-measured tree height as reliable as believed – Part II, A comparison study of tree height estimates from conventional field measurement and low-cost close-range remote

sensing in a deciduous forest. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169, 227-241. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.09.014>

Kang, J. W. (2014). Removing environmental organic pollutants with bioremediation and phytoremediation. *Biotechnology Letters*, 36(6), 1129-1139. <https://doi.org/10.1007/s10529-014-1466-9>

Khatoon, H., Rai, J., & Jillani, A. (2021). Role of fungi in bioremediation of contaminated soil. *Fungi Bio-Prospect in Sustainable Agriculture, Environment and Nano-Technology*, 121-156. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821925-6.00007-1>

Klamerus, A., Blonska, E., Lasota, J., Kalandyk, A., & Waligórski, P. (2015). Influence of Oil Contamination on Physical and Biological Properties of Forest Soil After Chainsaw Use. *Water, Air & Soil Pollution*, 226(389). <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2649-2>

Kochba, M., Ritvo, G., & Avnimelech, Y. (2004). *The effect of municipal solid waste compost (msw) on the replacement of sodium in sodic soil models*. 169(8), 567-572.

Kumar, P., Kumar, T., Singh, S., Tuteja, N., Prasad, R., & Singh, J. (2020). Potassium: A key modulator for cell homeostasis. *Journal of Biotechnology*. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.10.018>

Li, J., Qui, Y., Zhao, Q., Chen, D., Wu, Z., Peng, A., Khan, N., Trakal, L., Sakrabani, R., Gao, B., Wang, H., & Wu, W. (2020). Lead and copper-induced hormetic effect and toxicity mechanisms in lettuce (*Lactuca sativa L.*) grown in a contaminated

soil. *Science of the Total Environment*, 140440.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140440>

Li, M., Huang, C., Yang, T., Drosos, M., Wang, J., Kang, X., Liu, F., & Hu, Z. (2019).

Role of plant species and soil phosphorus concentrations in determining phosphorus: Nutrient stoichiometry in leaves and fine roots. *Plant and Soil*.

<https://doi.org/10.1007/s11104-019-04288-3>

Londoño, L., Londoño, P., & Muñoz, F. (2016). *Los riesgos de los metales pesados en la*

*salud humana y animal*. 14(2), 145-153. [https://doi.org/10.18684/BSAA \(14\)145-](https://doi.org/10.18684/BSAA (14)145-153)

153

Mahar, A., Wang, P., Ali, A., Kumar, M., Hussai, A., Wang, T., Li, R., & Zhang, Z. (2016).

Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 126, 111-

121. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023>

Masías, V. (2017). *Consideraciones para la medición de diámetros y alturas de árboles*

*vivos de Polylepis flavipila (Bitter) M. Kessler & Schmidt-Leb* [Universidad Nacional Agraria].

[http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3458/K10-M37-](http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3458/K10-M37-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3458/K10-M37-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Maycotte, C., Restrepo, B., Mauro, F., Calle, A., Esther, M. J., Marí, G., & Pereira, C.

(2011). *Edafología* (Primera edición).

Ministerio de Recursos Naturales No Renovables. (2015). *Normativa hidrocarburífera*

*del Ecuador*. Secretaria de Hidrocarburos del Ecuador.

[http://www.secretariahidrocarburos.gob.ec/wp-](http://www.secretariahidrocarburos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/08/NORMATIVA_HIDROCARBURIFERA.pdf)

[content/uploads/downloads/2013/08/NORMATIVA\\_HIDROCARBURIFERA.pdf](http://www.secretariahidrocarburos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/08/NORMATIVA_HIDROCARBURIFERA.pdf)

Moñino, N., & Galdos, A. (2008). *Exposición a la contaminación por actividad petrolera y estado de salud de la Comuna Yamanunka (Sucumbíos, Ecuador)*.

[https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2008/hdl\\_2072\\_5273/PFCMonino.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2008/hdl_2072_5273/PFCMonino.pdf)

Moterle, D., Kaminski, J., dos Santos Rheinheimer, D., Caner, L., & Bortoluzzi, E.

(2016). Impact of potassium fertilization and potassium uptake by plants on soil clay mineral assemblage in South Brazil. *Plant and Soil*, 406(1-2), 157-172.

<https://doi.org/10.1007/s11104-016-2862-9>

Noguez, A., López, A., Carrillo, R., & González, M. C. A. (2017). *Uso de leguminosas (Fabaceae) en fitorremediación* (Vol. 10, pp. 57-62).

[https://www.colpos.mx/wb\\_pdf/Agroproductividad/2017/AGROPRODUCTIVIDAD\\_IV\\_2017.pdf](https://www.colpos.mx/wb_pdf/Agroproductividad/2017/AGROPRODUCTIVIDAD_IV_2017.pdf)

Obire, O., & Anyanwu, E. C. (2009). Impact of various concentrations of crude oil on fungal populations of soil. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 6(2), 211-218. <https://doi.org/10.1007/BF03327624>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-FAO. (2010). *Monitoreo y Evaluación de los Recursos Forestales Nacionales -Manual para la recolección integrada de datos de campo*.

Palacios, W. (2011). *Árboles del Ecuador*. (Vols. 1-2).

<https://www.researchgate.net/project/Publicacion-del-libro-Arboles-del-Ecuador>

- Paredes-Leguizamón, G. (2018). Integrando las áreas protegidas al ordenamiento territorial. Caso Colombia. *Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza*. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2018-051-Es.pdf>
- Pellera, F., & Gidarakos, E. (2015). Effect of dried olive pomace –derived biochar on the mobility of cadmium and nickel in soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(2), 1163-1176. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.04.005>
- Pérez, Y., Reyes, R., & Ríos, C. (2017). Variables dasométricas relacionadas con la productividad de *Acacia mangium* Willd. *Centro Agrícola*, 44(2), 14-21.
- Petroamazonas EP. (2018). *Reporte de sostenibilidad de Petroamazonas EP*. <https://www.petroamazonas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/07/Reportedesostenibilidad2018.pdf>
- Petroamazonas EP. (2019). *Petroamazonas EP - Reporte General 2019*. <https://www.petroamazonas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/06/Reporte-Gerencial-2019.pdf>
- Rahman, Z., & Singh, P. V. (2020). Bioremediation of toxic heavy metals (THMs) contaminated sites: Concepts, applications and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08903-0>
- Rahmati, M., & Hamzeshpour, N. (2016). Quantitative remote sensing of soil electrical conductivity using ETM+ and ground measured data. *International Journal of Remote Sensing*, 38(1), 123-140. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1259681>

- Rakhsh, F., Golchin, A., Al Agha, A. B., & Nelson, P. N. (2020). Mineralization of organic carbon and formation of microbial biomass in soil: Effects of clay content and composition and the mechanisms involved. *Soil Biology and Biochemistry*, 108036. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108036>
- Remache, A. (2020). *Diversidad de hongos endorizosféricos de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos perturbados inoculados con tierra de bosque natural*. Carrera de Ingeniería Agropecuaria, Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66-77.
- Riaño, O., & Lizarazo, I. (2016). Estimación del volumen de madera en árboles mediante polinomio único de ahusamiento. *Colombia Forestal*, 20(1), 55-62.
- Rodríguez-Peraza, R. (2018). *Características edáficas de cinco sitios de la zona sur de costa rica con presencia abundante de la especie Platymiscium pinnatum (Jacq.) Dugand. (Cristóbal)*. [Instituto Tecnológico de Costa Rica Escuela de Ingeniería Forestal].  
<https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10324/caracteristicas-edaficas-zona-especie-platymiscium-pinnatum.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Romaniuk, R., Brandt, J. F., Rios, P. R., & Giuffré, L. (2007). *Atenuación natural y remediación inducida en suelos contaminados con hidrocarburos*. 25(2), 139-149.

- Rosell-Melé, A., Moraleda-Cibrián, N., Cartró-Sabaté, M., Colomer-Ventura, F., Mayor, P., & Orta-Martínez, M. (2018). Oil pollution in soils and sediments from the Northern Peruvian Amazon. *Science of the Total Environment*, 610-611; 1010-1019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.208>
- Rousk, K., Sorensen, P. L., & Michelsen, A. (2016). Nitrogen transfer from four nitrogen-fixer associations to plants and soils. *Ecosystems*, 19(8), 1491-1504. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0018-7>
- Ruiz, M., Carrillo, C., Sosa, F., Aular, L., Mora, R., Castillo, L., & Gámez, F. (2018). *Comparación de métodos para analizar materia orgánica en materiales orgánicos*. 20-25.
- Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Grez, R., & Mora, M. de la L. (2005). *Métodos de análisis de compost*. <http://schcs.cl/doc/libros/An%C3%A1lisis%20de%20compost.pdf>
- Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Grez, R., Mora, M. de la L., Flores, H., & Neaman, A. (2006a). *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile: Vol. Serie Actas INIA N°34* (Revisión 2006, pp. 55-65). Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Grez, R., Mora, M. de la L., Flores, H., & Neaman, A. (2006b). *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile: Vol. Serie Actas INIA N°34* (Revisión 2006, pp. 25-34). Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

- Singh, J. S., & Gupta, V. K. (2018). Soil microbial biomass: A key soil driver in management of ecosystem functioning. *Science of the Total Environment*, 634, 497-500. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.373>
- SIPA-Sistema de Información Pública Agropecuaria. (2020). *Boletín de precipitación y temperatura*. <https://fliphtml5.com/ijia/jgql/basic>
- Sosa, V. (2018). *Diversidad de hongos presentes en raíces de tres especies arbóreas plantadas en suelos perturbados por la actividad petrolera en la Amazonía Ecuatoriana*. Carrera de Ingeniería Agropecuaria, Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- Tang, J., Zhang, J., Ren, L., Zhou, Y., Gao, J., Luo, L., Yang, Y., Peng, Q., Huang, H., & Chen, A. (2019). Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution. *Journal of Environmental Management*, 242, 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.061>
- Tegeder, M., & Perchlik, M. (2018). The importance of organic nitrogen transport processes for plant productivity and nitrogen use efficiency. *Engineering Nitrogen Utilization in Crop Plants*, 233-253. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-92958-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-92958-3_13)
- UICN-Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. (2015). *Especies para reforestación: Platymiscium pinnatum y Zygia longifolia*. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2018-051-Es.pdf>
- Ulcuango, K., Basantes, E., & Villacís, J. (2014). Growth variables study of 20 forest species and soil characteristics of platforms and mud and drill cutting cells of the

EP PETROECUADOR. *ReserchGate*.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32175.74403>

United States Department of Agriculture-USDA. (2011). Soil Quality Indicators. *Natural Resources Conservation Service*.

<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/health/assessment/?cid=stelprdb1237387>

Uzquiano, S. (2014). *Mediciones dendrométricas y dasométricas mediante técnicas lidar y fotogramétricas* [Escuela Técnica Superior De Ingenierías Agrarias].

[https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:oB5T7TxqmQ4J:scholar.google.com/&hl=es&as\\_sdt=0,5](https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:oB5T7TxqmQ4J:scholar.google.com/&hl=es&as_sdt=0,5)

Vargas, Y., Nicolalde, J., Calero, A., & Vizquete, O. (2018). ¿Por qué son frágiles los suelos de la amazonia ecuatoriana?. En *Agroforestería sostenible en la Amazonía Ecuatoriana- Fragilidad de los suelos en la Amazonía ecuatoriana y potenciales alternativas agroforestales para el manejo sostenible* (445.<sup>a</sup> ed., pp. 61-66).

Vázquez, M., Montiel, A., Vázquez, D., & Herrera, M. F. (2011). Impacto del petróleo crudo en suelo sobre la microbiota de vida libre fijadora de nitrógeno. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(3), 511-523.

Vega, M. (2021). *Diversidad de hongos ectorizosféricas de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos perturbados e inoculados de la Amazonía del Ecuador*. Carrera de Ingeniería Agropecuaria, Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

- Velásquez, J. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1).  
<https://doi.org/10.22490/21456453.1846>
- Villacís, J. (2016). *Evaluación de las técnicas de remediación vegetal utilizadas en plataformas petroleras mediante estudios del desempeño de especies y análisis de diversidad funcional*. Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba.
- Villacís, J., Armas, C., Hang, S., & Casanoves, F. (2016a). Selection of adequate species for degraded areas by oil-exploitation industry as a key factor for recovery forest in the Ecuadorian Amazon. *Land Degradation & Development*, 27(7), 1771-1780. <https://doi.org/10.1002/ldr.2511>
- Villacís, J., Casanoves, F., Hang, S., Keesstra, S., & Armas, C. (2016b). Selection of forest species for the rehabilitation of disturbed soils in oil fields in the Ecuadorian Amazon. *Science of the Total Environment*, 566-567, 761-770.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.102>
- Wang, C., Xue, L., Dong, Y., & Jiao, R. (2021). Effects of stand density on soil microbial community composition and enzyme activities in subtropical *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook plantations. *Forest Ecology and Management*, 479, 118559. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118559>
- Wu, M., Wu, Jialuo, Zhang, X., & Ye, X. (2019). Effect of bioaugmentation and biostimulation on hydrocarbon degradation and microbial community composition

in petroleum contaminated loessial soil. *Chemosphere*, 237, 124456.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124456>

Wubs, E. R. J., Van der Putten, W. H., Bosh, M., & Bezemer, M. (2016). Soil inoculation steers restoration of terrestrial ecosystems. *Nature Plants*, 2(16107).

<https://doi.org/10.1038/nplants.2016.107>

Xu, Y., Wang, T., Li, H., Ren, C., Chen, J., Yang, G., Han, X., Feng, Y., Ren, G., & Wang, H. (2019). Variations of soil nitrogen-fixing microorganism communities and nitrogen fractions in a *Robinia pseudoacacia* chronosequence on the Loess Plateau of China. *Catena*, 174, 316-123.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.009>

Zamora, A., Ramos, J., & Arias, M. (2012). Efecto de la contaminación por hidrocarburos sobre algunas propiedades químicas y microbiológicas de un suelo de sabana. *Bioagro*, 24(1), 5-12.

Zhan, J., & Sun, Q. (2012). Diversity of free-living nitrogen-fixing microorganisms in the rhizosphere and non-rhizosphere of pioneer plants growing on wastelands of copper mine tailings. *Microbiological Research*, 167(3), 157-165.

<https://doi.org/10.1016/j.micras.2011.05.006>

Zoppini, A., Bongiorno, L., Ademollo, N., Patrolecco, L., Cibic, T., Franzo, A., Melita, M., Bazzaro, M., & Amalfitan, S. (2019). Bacterial diversity and microbial functional responses to organic matter composition and persistent organic pollutants in deltaic lagoon sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 106508.

<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106508>