



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA  
AGRICULTURA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO AGROPECUARIO**

**TEMA: RELACIONES ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS  
EDAFOLÓGICAS Y LAS VARIABLES DASOMÉTRICAS DE TRES  
ESPECIES ARBÓREAS PLANTADAS EN SUELOS PERTURBADOS POR  
LA ACTIVIDAD PETROLERA**

**AUTOR: ESPINOZA MONTALUISA, ENRIQUE GABRIEL**

**DIRECTOR: ING. VILLACÍS BUENAÑO, JAIME EMILIANO, Ph. D.**

**SANGOLQUÍ**

**2018**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA

CARRERA DE INGENIERIA AGROPECUARIA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación “*RELACIONES ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS EDAFOLÓGICAS Y LAS VARIABLES DASOMÉTRICAS DE TRES ESPECIES ARBÓREAS PLANTADAS EN SUELOS PERTURBADOS POR LA ACTIVIDAD PETROLERA*” fue realizado por el señor *Espinoza Montaluisa Enrique Gabriel* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 15 de marzo del 2018

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

C.C: 171000407-6



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA**

**CARRERA DE INGENIERIA AGROPECUARIA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, *Espinoza Montaluisa, Enrique Gabriel*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “*Relaciones entre las características edafológicas y las variables dasométricas de tres especies arbóreas plantadas en suelos perturbados por la actividad petrolera*” es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales 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 es veraz.

**Sangolquí, 15 de marzo del 2018**

.....  
**Enrique Gabriel Espinoza Montaluisa**

C.C: 171802684-0



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA**  
**CARRERA DE INGENIERIA AGROPECUARIA**

**AUTORIZACIÓN**

*Yo, Espinoza Montaluisa, Enrique Gabriel autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “Relaciones entre las características edafológicas y las variables dasométricas de tres especies arbóreas plantadas en suelos perturbados por la actividad petrolera” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.*

**Sangolquí, 15 de marzo del 2018**

.....  
**Enrique Gabriel Espinoza Montaluisa**

C.C: 171802684-0

## **DEDICATORIA**

Este proyecto va dedicado a mis queridos padres y hermano que son las personas que han vivido día a día mi evolución como estudiante y persona, quienes desde que tengo uso de razón depositaron su confianza en mí, sabiendo que algún día, fruto de su confianza y amor, iba a alcanzar grandes metas, en especial, el obtener un título universitario que me avala y me augura como un excelente profesional. A mis amigos por ser incondicionales y confidentes en todos los ámbitos, con quienes juntos hemos aprendido a conjugar de la mejor manera el estudio y el ocio, logrando culminar nuestras carreras universitarias con éxito. Y definitivamente a Dios quien con su continua bendición, guía mi camino y el de todos mis seres queridos.

## AGRADECIMIENTO

De todo corazón mis eternos agradecimientos a mis padres, forjadores de mi carácter y templanza ante cualquier situación que la vida me presenta, a mi abuela por guiarme e inculcarme valores útiles para ser un hombre de bien y una persona intachable. Por siempre serán mi inspiración y mi fuerza para no rendirme jamás ante nada.

Al Ing. Jaime Villacís, Ph. D., quien pasó de ser un excelente profesor a ser un maestro para mí, depositando su valioso tiempo y desinteresada dedicación a guiarme en todo el camino que significó la realización de este proyecto.

Al Dr. Carlos Chiriboga y Dr. Wilmer Pozo, Ph. D., por su tiempo, sabiduría y continuo aporte para obtener un trabajo exitoso.

A Petroamazonas EP, por brindar su total colaboración y apertura para realizar el trabajo dentro de sus instalaciones, y más que nada a las personas, tanto técnicos como personal de apoyo, que me ayudaron desinteresadamente en las salidas de campo y en mi estadía en el Oriente, siempre compartiendo conocimientos.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CARÁTULA</b>	
<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiii</b>
<b>CAPITULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Planteamiento y justificación del problema .....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 General .....	3
1.2.2 Específicos.....	3
1.3 Hipótesis.....	3
<b>CAPITULO II</b>	
<b>MARCO REFERENCIAL</b>	
2.1 Suelos .....	4
2.1.1 Suelos amazónicos .....	4
2.1.2 Unidades de tratamientos de suelos contaminados .....	5
2.1.3 Plataformas que circunscriben los pozos petroleros .....	5
2.1.4 Celdas de lodos y ripios .....	6
2.2 Especies arbóreas .....	6
2.2.1 Variables dasométricas .....	6
2.2.1.1 Diámetro del árbol.....	6
2.2.1.2 Altura del árbol.....	7
2.2.1.3 Área basal.....	7
2.2.1.4 Volumen de madera .....	7
2.2.1.5 Biomasa arbórea.....	8

2.2.1.6	Carbono almacenado (CA).....	8
2.2.2	Sobrevivencia de los árboles.....	9
2.2.3	Incremento medio anual.....	10
2.2.4	Características de las especies a ser evaluadas.....	10
2.2.4.1	Guarango Espinado ( <i>Piptadenia pteroclada</i> ).....	10
2.2.4.2	Caoba ( <i>Platymiscium pinnatum</i> ).....	11
2.2.4.3	Chíparo ( <i>Zygia longifolia</i> ).....	11

### **CAPÍTULO III**

#### **METODOLOGÍA**

3.1	Ubicación política.....	13
3.2	Ubicación geográfica.....	14
3.3	Ubicación ecológica.....	14
3.4	Materiales y métodos.....	15
3.4.1	Selección de las especies arbóreas.....	15
3.4.2	Selección de los sitios.....	15
3.4.3	Diseño experimental.....	15
3.4.4	VARIABLES EVALUADAS.....	16
3.4.5	Análisis estadístico.....	19
3.4.6	Manejo forestal.....	20

### **CAPÍTULO IV**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1	Resultados.....	21
4.1.1	Sobrevivencia, diámetro y altura.....	21
4.1.2	Incremento medio anual.....	23
4.1.3	Área basal y volumen.....	24
4.1.4	Biomasa y carbono almacenado.....	25
4.1.5	Características del suelo y nutrientes.....	26
4.1.6	Hidrocarburos y metales pesados.....	28
4.1.7	Relaciones entre variables edafológicas y dasométricas.....	29
4.2	Discusión.....	31
4.2.1	Rendimiento de las especies.....	31
4.2.2	Características del suelo, nutrientes y contaminantes.....	33
4.2.3	Relaciones entre las variables dasométricas y las características edafológicas.....	34



**CAPITULO V****CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1	Conclusiones .....	35
5.2	Recomendaciones .....	36
5.3	Bibliografía.....	37

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	<i>Coordenadas de las parcelas experimentales en cada uno de los sitios evaluados. ....</i>	14
<b>Tabla 2</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar del porcentaje de sobrevivencia de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos afectados por las actividades de extracción de petróleo. ....</i>	21
<b>Tabla 3</b>	<i>Análisis de covarianza para el diámetro y altura de los árboles de tres especies arbóreas, plantadas sobre suelos afectados por las actividades de extracción de petróleo. ....</i>	22
<b>Tabla 4</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar del diámetro y la altura de tres especies arbóreas. ....</i>	22
<b>Tabla 5</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar del diámetro y altura por sitio, de tres especies arbóreas. ....</i>	23
<b>Tabla 6</b>	<i>Análisis de varianza para el incremento medio anual en diámetro y en altura de los árboles de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos afectados por las actividades de extracción de petróleo. ....</i>	23
<b>Tabla 7</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar para el incremento medio anual del diámetro y la altura por especie arbórea. ....</i>	24
<b>Tabla 8</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar del incremento medio anual en diámetro y altura por sitio, de tres especies arbóreas. ....</i>	24
<b>Tabla 9</b>	<i>Análisis de varianza para el área basal y el volumen de tres especies arbóreas, plantadas sobre suelos afectados por las actividades de extracción de petróleo. ....</i>	25
<b>Tabla 10</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar para el área basal y el volumen de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos afectados por las actividades de extracción de petróleo. ....</i>	25

<b>Tabla 11</b>	<i>Análisis de varianza para la biomasa y carbono almacenado de árboles de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos afectados por las actividades de extracción de petróleo.</i>	26
<b>Tabla 12</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar para la biomasa y carbono almacenado de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos afectados por las actividades de extracción de petróleo.</i>	26
<b>Tabla 13</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar del pH, MO, CE, N y P presentes en los suelos aledaños a las tres especies arbóreas.</i>	28
<b>Tabla 14</b>	<i>Promedio <math>\pm</math> error estándar del pH, MO, CE, N y P presentes en los suelos aledaños a las tres especies arbóreas.</i>	428
<b>Tabla 15</b>	<i>Coefficientes de correlación de Pearson para las variables evaluadas por sitio y tipo de especie.</i>	30

**ÍNDICE DE FIGURAS**

<b><i>Figura 1</i></b> Ubicación de los sitios perturbados por la actividad petrolera en la amazonia del Ecuador. ....	13
<b><i>Figura 2</i></b> Croquis sobre la disposición del experimento.....	16

## RESUMEN

Se evaluaron las relaciones entre las variables dasométricas de árboles de tres especies y las variables edafológicas de suelos perturbados por la actividad petrolera, cinco años después del trasplante. En ocho parcelas permanentes (dos plataformas petroleras, dos celdas de lodos y ripios, dos unidades de tratamientos de suelos contaminados y dos potreros), se estimó el diámetro, altura, área basal, volumen, biomasa y carbono almacenado de los individuos de *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia*. Alrededor del fuste de cada individuo se colectaron muestras de suelo, y se determinó pH, materia orgánica, conductividad eléctrica, N y P. Además en las muestras de suelo de las celdas de lodos y ripios y unidades de tratamientos de suelos se determinó la cantidad de hidrocarburos y metales pesados. Los árboles de *Piptadenia pteroclada* presentaron mayor diámetro, altura, biomasa, volumen y carbono almacenado que los árboles de las otras especies en todos los sitios. En general, los suelos aledaños a las tres especies de los sitios perturbados mostraron un aumento del pH, materia orgánica, N y P, respecto a los valores iniciales. Por otro lado, los suelos de celdas de lodos y ripios y unidades de tratamientos de suelos mostraron una disminución de los niveles de hidrocarburos totales, Cd, Ni y Pb, luego de cinco años. Estos resultados permiten evidenciar el efecto, generado por los individuos de las tres especies arbóreas de cinco años de edad, sobre el aumento de la fertilidad y la disminución de contaminantes en suelos perturbados de la amazonia ecuatoriana.

### Palabras Clave:

- **CONTAMINACIÓN DEL SUELO**
- **FERTILIDAD DEL SUELO**
- **REMEDIACIÓN FORESTAL**
- **DESEMPEÑO DE ARBOLES**
- **AMAZONIA ECUATORIANA**

## ABSTRACT

The relationships between dasometric variables and the soil variables of disturbed soils by the oil extraction activities were evaluated. In eight permanent sampling plots (2 on platforms, 2 on mud and drill cutting cells, 2 on contaminated soil treatment units and 2 on paddocks), the diameter, height, basal area, volume, biomass and stored carbon of the individuals of *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* and *Zygia longifolia* were estimated. Around the stem of each tree, soil samples were collected and pH, organic matter, electrical conductivity, N and P were measured. In addition in soil samples of the mud and drill cutting cells and contaminated soil treatment units the amount of hydrocarbons, Cd, Ni and Pb was determined. Specimens of *Piptadenia pteroclada* had greater diameter, height, biomass, volume and carbon than specimen of the other species in all sites. In general, the soils adjacent to the specimens of three species in all disturbed sites showed an increase in Ph, MO, N and P, with respect to initial values. On the other hand, the soils of the contaminated soil treatment units and mud and drill cutting cells showed a decrease in the levels of total hydrocarbons, Cd, Ni and Pb, after five years. These results allow demonstrating the effect generated by the specimens of three tree species of five years, on the increase of the fertility and the decrease of contaminants in disturbed soils of Ecuadorian Amazon.

### Keywords:

- SOIL FERTILITY
- SOIL POLLUTION
- FOREST REMEDIATION
- FOREST PERFORMANCE
- ECUADORIAN AMAZON

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento y justificación del problema

La extracción petrolera es una de las principales actividades económicas del Ecuador (BCE, 2013), es así que en los últimos diez años la exportación de crudo y derivados ha variado entre un 43 y 66 % del total de exportaciones del país (Guaranda, 2014). La amazonia ecuatoriana comprende 118 422 km<sup>2</sup> lo que representa el 41,8 % del territorio y alberga una gran biodiversidad, siendo uno de los hotspots más importantes del planeta (IGM, 2010).

Aproximadamente 4,2 millones de hectáreas de bosques han sido altamente impactados por actividades antropogénicas realizadas para la extracción del petróleo (Guaranda, 2014). En la Amazonía ecuatoriana, las actividades de extracción petrolera, son responsables de la deforestación de 2 millones de hectáreas y de más de 650 000 barriles de crudo derramados que han contaminado las fuentes de agua de la región (Guaranda, 2014).

Para llevar a cabo la actividad petrolera se construyen plataformas de perforación, unidades de tratamientos de suelos, celdas de lodos y ripios, campamentos, helipuertos y pozos, además, de la apertura de carreteras de acceso, el tendido del oleoductos y líneas secundarias (Bravo, 2007). Estas obras civiles afectan a la capa vegetal, acelerando el proceso de erosión, disminuyendo la infiltración natural, aumentando la escorrentía superficial y alterando los ciclos biogeoquímicos (Bertzky, y otros, 2011).

Las actividades extractivas provocan serios impactos en los animales de la selva, sobre todo en mamíferos y aves, que huyen del lugar, afectando la alimentación y la salud de los indígenas que dependen de la caza; además se han observado reducciones en las poblaciones biológicas y

efectos en las comunidades y en las redes tróficas (Bravo, 2007). Los suelos amazónicos muestran factores ambientales que incrementan la toxicidad de los hidrocarburos, como es el pH, la temperatura, la irradiación y la acidez de los mismos (Bravo, 2007).

Por tal motivo, se deben implementar acciones de remediación y rehabilitación (Bai, Wang, & Xiong, 2013), (Kargar Chigani, Khajeddin, & Karimzadeh, 2012) que permitan recuperar los suelos y bosques afectados (Bunn, Jenkin, Brown, & Sanders, 2010) y los servicios ecosistémicos que ellos proveen. Para tal efecto, la empresa pública (PETROAMAZONAS EP) desde el año 2000, ha establecido proyectos de reforestación sobre estos sitios afectados. Los trabajos se inician a nivel de vivero, donde se producen gran cantidad de plantones de especies arbóreas, nativas y exóticas, de diferentes usos (maderables, frutales, ornamentales, etc.) que son después trasplantados a los sitios perturbados.

Para seleccionar las especies más idóneas a reforestar en sitios afectados, se han realizado estudios preliminares sobre el crecimiento y desempeño de especies forestales a nivel de vivero (Villacís, Armas, Hang, & Cassanoves, 2016), y también a nivel de campo por un periodo de dos años (Villacís, Cassanoves, Hang, & Keestra, 2016). Sin embargo, hace falta evaluar el desempeño de las especies por más tiempo, determinar su crecimiento y correcto establecimiento, además es necesario detectar los efectos que presentan sobre las características de los suelos. Esta información permitirá determinar en qué medida las especies arbóreas utilizadas permiten iniciar el proceso de rehabilitación de las tierras afectadas por los procesos inherentes a la extracción de petróleo.

En este estudio se detectaron las relaciones entre las características dasométricas de tres especies arbóreas (*Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia*) y las



características físicas, químicas y de contaminantes de los suelos afectados, cinco años después del trasplante.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 General**

Evaluar las relaciones entre las características edafológicas y las variables dasométricas de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos perturbados por la actividad petrolera en la amazonia del Ecuador.

### **1.1.2 Específicos**

- Analizar el crecimiento de tres especies forestales implementadas hace cinco años en suelos afectados por las actividades de extracción de petróleo.
- Determinar las características de los suelos que circunscriben a cada una de las tres especies arbóreas, luego del quinto año de su establecimiento.
- Describir las asociaciones entre las características edafológicas y las características dasométricas de las tres especies arbóreas que mostraron mejor desempeño.

## **1.3 Hipótesis**

H1: Luego de cinco años, los suelos aledaños al fuste de los árboles de las especies *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia*, presentaron mayor cantidad de nutrientes y menor cantidad de contaminantes.

## CAPÍTULO II

### MARCO REFERENCIAL

#### 2.1 Suelos

##### 2.1.1 Suelos amazónicos

La mayoría de suelos amazónicos pertenecen al orden Inceptisoles (IGM, 2010). La provincia de Sucumbíos, presenta suelos con una textura fina, moderadamente profundos, con una pendiente entre 12 y 25 %, con un pH ácido y bajo contenido de materia orgánica. Mientras que, los suelos de la provincia de Orellana tienen una textura media, son poco profundos, con una pendiente que va de 0 a 5 %, con un pH ligeramente alcalino y contenido de materia orgánica medio.

El orden Inceptisoles involucra a suelos que están empezando a mostrar un desarrollo de los horizontes, puesto que son bastante jóvenes y presentan evidencias de evolución incipiente todavía en formación. Es por ello, que en este orden aparecerán suelos con uno o más horizontes de diagnóstico de rápida formación, con procesos de translocación de materiales o meteorización extrema (Jaramillo, 2002), (Ibañez, Gisbert, & Moreno, 2014).

La mayoría de los Inceptisoles tienen un aprovechamiento forestal, aunque también son suelos de praderas (buenos para pastos siempre que haya humedad) o tierras de cultivo. Cuando se localizan en pendientes un aprovechamiento idóneo es el bosque pero la pérdida de la vegetación frecuentemente conduce a una erosión acelerada (Ibañez, Gisbert, & Moreno, 2014).

Por lo general los suelos amazónicos tienen deficiencias de nutrientes, pues tienen un bajo potencial de retención de macro-elementos (Ca, K y P principalmente), esto debido a la fuerte lixiviación y meteorización que han sufrido estos suelos a través de millones de años, y porque

existen altas concentraciones de aluminio e hidrógeno que ocupan los espacios en el suelo en los cuales los nutrientes deberían ser retenidos. Por lo que, los nutrientes en esta región se encuentran en su gran mayoría en la biomasa del bosque y no en el suelo (Moragas, 2008).

### **2.1.2 Unidades de tratamientos de suelos contaminados**

Las unidades de tratamientos de suelos contaminados (UTSC) son sitios preestablecidos en donde se levantan plataformas de suelos contaminados con hidrocarburos para su posterior tratamiento. En estos sitios se lleva a cabo los procesos de lavado y secado de suelos, separación de hidrocarburos y tratamiento biológico y/o químico, hasta lograr que el suelo enmendado se encuentre dentro de los límites permisibles de hidrocarburos acorde con las tablas que maneja el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE, 2014), (Ulcuango, 2014).

### **2.1.3 Plataformas que circunscriben los pozos petroleros**

Las plataformas que circunscriben a los pozos petroleros (PCPP) son la base que se instala alrededor del pozo para poder extraer el petróleo. La construcción de estas plataformas involucra varias etapas altamente destructivas y contaminantes, ya que van desde la exploración del lugar de extracción, la introducción de maquinaria pesada para proceder a limpiar toda la vegetación que se encuentra en el área que será parte de la plataforma, la perforación de pozos, la construcción de toda la infraestructura tanto de transporte como de almacenamiento del crudo dentro de los campos petroleros, áreas de viviendas, comedores y oficinas del personal técnico (Ulcuango, 2014). A pesar de estas labores que se realizan en las plataformas, éstas áreas no tienen contacto con hidrocarburos u otros residuos (Villacís, Cassanoves, Hang, & Keestra, 2016).

#### **2.1.4 Celdas de lodos y rípios**

Las celdas de lodos y rípios (CLR) son centros de acopio, generalmente piscinas o celdas de tratamiento impermeabilizadas, a donde van los desechos de perforación (rípios de perforación: sólidos contenidos en el fluido de perforación para controlar propiedades físicas y químicas del mismo). El sustrato de las celdas tienen una gran cantidad de metales pesados (Pb, Ni, Hg, Cu y Zn), y gran cantidad de contaminantes, por lo que en estos sitios se hacen tratamientos previos para ayudar a la repoblación natural de las especies (Ballesteros, 2009).

### **2.2 Especies arbóreas**

#### **2.2.1 Variables dasométricas**

La dasometría es la especialidad de la ingeniería forestal que trata de la determinación y estimación de las dimensiones de variables de medida en individuos arbóreos (Imaña-Encinas, Da Silva, & Kishi, 2002), pues, pretende dar soluciones a problemas enfocados al crecimiento arbóreo y al correcto manejo de bosques y rodales, en base a diseños experimentales (Ugalde, 1981). Para la dasometría el árbol, arbusto o planta, es tratado como un ente numérico y, como tal, debe ser considerado como unidad unitaria de cálculo (Imaña-Encinas, Da Silva, & Kishi, 2002). Entre las variables dasométricas más importantes están las siguientes:

##### **2.2.1.1 Diámetro del árbol**

El diámetro se considera una medida fundamental que permite efectuar principalmente las estimaciones del área basal (Imaña-Encinas, Da Silva, & Kishi, 2002). Las medidas más típicas del diámetro del árbol son: el diámetro a la altura del pecho (DAP) medido a 1,30 m del suelo y el diámetro en la base del tronco ( $D_{BASE}$ ) medido de 20 a 30 cm del suelo. Para el efecto existen

varios instrumentos de medición como el calibrador, la cinta diamétrica, la forcípula forestal y el trinche diamétrico (Prodan, Peters, Cox, & Real, 1997).

### **2.2.1.2 Altura del árbol**

La altura es una variable que ayuda a conocer e interpretar el proceso de crecimiento del árbol y su incremento volumétrico. Además es necesaria para estimar, junto con el diámetro, el volumen de madera del árbol y sus componentes (Imaña-Encinas, Da Silva, & Kishi, 2002). Para medir la altura del árbol hay varios instrumentos como la regla métrica, el clinómetro y los hipsómetros (ópticos y digitales) (Rondeux, 2010).

### **2.2.1.3 Área basal**

Es el área de una sección transversal del fuste, que se la toma a 1,30 m de altura (Prodan, Peters, Cox, & Real, 1997). Por la estructura cilíndrica que presentan los árboles en su fisiología, se considera a ésta área como próxima al área de un círculo, debido a la presencia de irregularidades en su forma, las superficies de las secciones de los fustes no pueden ser determinadas con precisión sino más bien por planimetría o integración (Rondeux, 2010), es por esto que se la calcula siempre en función del diámetro a la altura del pecho (DAP) (Ugalde, 1981). El área basal como tal es una de las dimensiones dasométricas más frecuentes a la hora de caracterizar el estado de desarrollo de un árbol o de un rodal (Prodan, Peters, Cox, & Real, 1997).

### **2.2.1.4 Volumen de madera**

Según la SECF (2005), el volumen de madera se corresponde con el total de madera existente en un árbol o en una masa arbolada cuando aún se encuentra en pie. El volumen que presenta un árbol es una característica dendométrica fundamental que sirve como un soporte para las

posteriores estimaciones en valor al igual que para las diversas operaciones que se realizan para la comercialización de la madera (Rondeux, 2010).

#### **2.2.1.5 Biomasa arbórea**

Es la materia orgánica viva o muerta de un árbol, que corresponde a la energía fijada a partir de la fotosíntesis; puede ser medida en peso seco o verde, sus componentes principales son el tronco y la copa (biomasa aérea) y tocón y raíces (biomasa subterránea); para expresarla puede hacerse en peso seco o carbono orgánico por unidad de superficie o volumen (SECF, 2005).

#### **2.2.1.6 Carbono almacenado (CA)**

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es el gas de efecto invernadero más abundante producido por actividades antropogénicas, una de estas es la deforestación. En la actualidad, cerca del 20 % de las emisiones de  $\text{CO}_2$  resultan de la eliminación y degradación de los ecosistemas forestales. La detención de la deforestación y la reversión a través de la reforestación y manejo sustentable, implica recapturar el  $\text{CO}_2$ , disminuir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y reducir el calentamiento global (Schlegel, 2001).

El servicio ambiental que proporcionan los bosques y selvas como secuestradores de carbono ayuda a reducir la concentración de este elemento en la atmósfera (Torres & Guevara, 2002). Así los ecosistemas de bosques se destacan por su gran capacidad de fijar carbono en sus estructuras, generalmente en las partes leñosas del árbol, siendo el fuste completo en donde se almacena aproximadamente 84 % de biomasa, de la cual 46 % es carbono, por lo que se ha estimado que los árboles asimilan y almacenan gran cantidad de carbono durante toda su vida (Avendaño, Acosta, Carrillo, & Etchevers, 2009), (Ordoñez, De Jong, & Masera, 2001).

### 2.2.2 Sobrevivencia de los árboles

Éste término se lo enfoca a la capacidad de un árbol para establecerse, crecer y sobrevivir sobre un suelo y en condiciones poco favorables para su normal desarrollo. Puede existir más de un factor que determina la sobrevivencia de los árboles, pero cuatro son los principales componentes de un exitoso establecimiento:

- *Eco-fisiología del árbol.*- Elegir correctamente la especie, tomando en cuenta las condiciones del ambiente en el cual se va a establecer los individuos de dicha especie (Clark, 2003).
- *Calidad de la especie.*- La calidad del árbol previo al trasplante podría afectar la sobrevivencia. Buenas prácticas de vivero, como tener espacio para el crecimiento de raíces, espacio entre las especies, la poda de formación e inclusive hasta el transporte de la planta podrían ser factores que alteran su calidad (Sellmer & Kuhns, 2007), (Johnston & Percival, 2011).
- *El suelo.*- La textura, estructura y biota del suelo, se consideran determinantes en el crecimiento de los árboles (Kozlowski, 1999), por lo que factores como compactación, contenidos altos de sales, presencia de metales pesados y pH, pueden afectar el éxito del establecimiento y a la sobrevivencia del árbol (Kozlowski, 1999).
- *Manejos de pre y post plantación.*- Hacen referencia a la plantación y a la correcta mantención de los árboles, ya sea con un adecuado entutorado, disponibilidad de riego y fertilizantes, correcta poda y una baja tasa de depredadores (Nowak, Kuroda, & Crane , 2004).

### **2.2.3 Incremento medio anual**

El incremento como tal es la cantidad de madera elaborada por unidad de tiempo; corresponde al crecimiento y aumento en diámetro, área basal, altura, volumen, calidad o valor de árboles individuales o en conjunto como masas forestales durante un año. Por lo que el incremento medio anual corresponde a la diferencia entre dos valores dados tomados por una variable dendrométrica a edades determinadas para poder compararlas (SECF, 2005), (Rondeux, 2010).

### **2.2.4 Características de las especies a ser evaluadas**

#### **2.2.4.1 Guarango Espinado (*Piptadenia pteroclada*)**

Pertenece a la familia Fabaceae, es originario de América del Sur y puede alcanzar los 10 m de altura. Tiene un fuste corto, cilíndrico, y está recubierto de una corteza gris espinosa; la copa es de distribución irregular y poco densa, de forma aparasolada y con ramas ascendentes; las hojas son alternas compuestas, pinnadas o bipinnadas, ovoides y brillantes, ligeramente espinosas de color verde oscuro; las flores son blancas o amarillentas muy fragantes, presenta también vainas curvadas y retorcidas, color castaño oscuro con pulpa amarilla amarga y resinosa que envuelve las semillas; produce grandes cantidades de semillas muy livianas, de fácil dispersión; su sistema radicular es profundo y pivotante, que facilita la absorción de agua de los horizontes inferiores del suelo y le otorga tolerancia a suelos secos (Gómez & Toro, 2007). El tallo se utiliza para obtener tablas para construcciones, además que por su dura madera se hace muebles y parquets con ella (Forzza, 2010).



#### **2.2.4.2 Caoba (*Platymiscium pinnatum*)**

Es un árbol de la zona intertropical americana cuyos orígenes radican especialmente en Mesoamérica y Sudamérica. Este árbol alcanza los 30 m de altura y 0,9 m de DAP. Tiene el tronco recto, cilíndrico, libre de ramas en los dos tercios de su fuste y sin espinas, está cubierto de una corteza gris con fisuras verticales formando placas irregulares que se desprenden. Las hojas son compuestas, opuestas, imparipinnadas con tres o siete folíolos opuestos en el raquis, ovados a elípticos, margen entero, ápice acuminado, base obtusa y estipulas deciduas. La inflorescencia es una panícula axilar que llega a los 17 cm de longitud, con flores pequeñas, amarillas y pubescentes. Fruto en forma de legumbre aplanada, indehiscente, glabra, oblonga, de 7 a 9 cm de largo y de 2,6 a 3,7 cm de ancho, alada y membranosa, redondeada en el ápice, aguda en la base, de un color verde grisáceo al inicio llegando a tener un color marrón claro en la madurez (Gómez & Toro, 2007). La madera es dura y pesada, se la utiliza en la fabricación de canoas y muebles finos (Brako & Zarucchi, 1993).

#### **2.2.4.3 Chíparo (*Zygia longifolia*)**

El chíparo pertenece a la familia Fabaceae, esta especie tiene una amplia distribución en los bosques húmedos tropicales que va desde el sureste de México a Sudamérica (Jiménez, 2009). Este árbol alcanza los 15 m de altura y un m de DAP. El tronco es torcido, generalmente acanalado y corto. Tiene hojas compuestas, alternas, coriáceas, glabras, que miden 10 cm de largo por 15 cm de ancho, dispuestas en forma de hélices. Las flores miden 1,5 cm de longitud, se encuentran agrupadas a lo largo de las ramas, su cáliz es pequeño de color verdoso, estambres largos, numerosos y de color blanco. El fruto es una vaina alargada de color verde que al madurar se torna negra, contiene de 10 a 15 semillas. Algunas aves y mamíferos usan el fruto

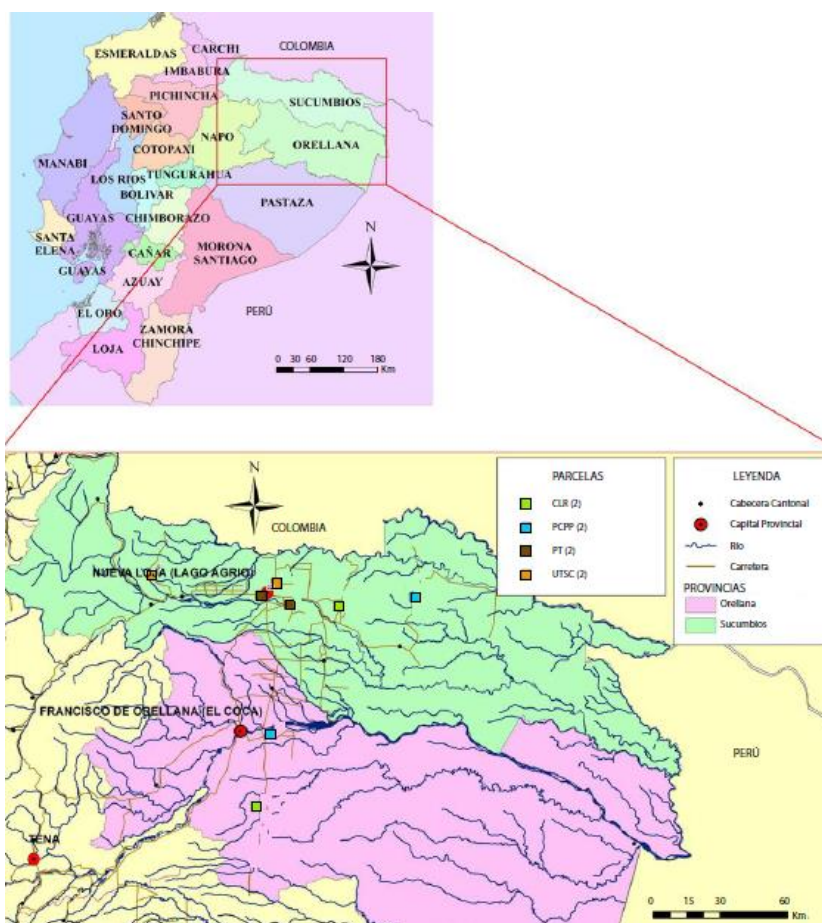
como alimento. Las semillas son de color café, que miden un cm de diámetro, tienen forma aplanada, cada una tiene dos cotiledones y son de consistencia carnosa (Brako & Zarucchi, 1993).

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1 Ubicación política

La investigación se realizó en las provincias de Sucumbios y Orellana dentro de los campos de explotación de Petroamazonas EP (Figura 1).



**Figura 1** Ubicación de los sitios perturbados por la actividad petrolera en la amazonia del Ecuador

Fuente: (Villacís, Cassanoves, Hang, & Keestra, 2016)

### 3.2 Ubicación geográfica

La investigación se llevó a cabo dentro de las parcelas experimentales ubicadas en las provincias de Sucumbíos y Orellana. La provincia de Sucumbíos se encuentra a 0° 5' 0" de latitud sur y a 76° 53' 0" de longitud occidental; mientras que la provincia de Orellana tiene una ubicación de 0° 56' 0" de latitud sur y 75° 40' 0" de longitud occidental (IGM, 2010). Los sitios evaluados se muestran a continuación en la tabla 1:

**Tabla 1**

*Coordenadas de las parcelas experimentales en cada uno de los sitios evaluados*

Sitio	Parcela	Coordenadas	
CLR	Secoya 26	NO322323	UTM1003990
	Shushufindi Est_40	M313661	UTM9981360
UTSC	CGP Lago 19	NO294572	UTM1014133
	Auca 02_D	MO290191	UTM9913436
PCPP	Sansahuari 02	NO356042	UTM1009231
	Cuyabeno 02	NO357023	UTM1001631
PT	Los Rivereños	NO300491	UTM1004661
	Secoya 2-3	N323353	UTM1001430

CLR = Celdas de lodos y rípios, UTSC = Unidades de tratamientos de suelos contaminados, PCPP = Plataformas que circunscriben a los pozos petroleros y PT = Potrerros testigo.

### 3.3 Ubicación ecológica

La provincia de Sucumbíos está ubicada a 303 m snm, con una temperatura media anual de 25,7 ° C y una precipitación de 353 mm. Mientras que la provincia de Orellana se encuentra a 232 m snm, con una temperatura promedio de 26 ° C y 226 mm de precipitación (SIPA, 2017). Las dos provincias poseen en promedio una humedad relativa de aproximadamente el 85 % y luminosidad de 12 horas luz (INAMHI, 2015).

El piso altitudinal de ambas provincias es de tierras bajas, su zona latitudinal corresponde a zona templada oriental y zona cálida oriental, y, la formación vegetal es el Bosque húmedo

siempre verde de la Amazonía ecuatoriana con una clasificación bioclimática cálido – húmeda (Sierra, 1999), (Holdridge, 1979). Tanto la provincia de Sucumbíos como la de Orellana se ubican en un zona de vida que pertenece a un Bosque Húmedo Tropical (Holdridge, 1979).

### **3.4 Materiales y métodos**

#### **3.4.1 Selección de las especies arbóreas**

Las tres especies arbóreas evaluadas fueron seleccionadas de un total de veinte especies (nativas y exóticas), plantadas sobre los sitios afectados por las actividades de extracción de petróleo en Petroamazonas EP, en el mes de marzo de 2012 (Villacís, Armas, Hang, & Cassanoves, 2016). Se seleccionaron las especies, *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia* debido a que presentaron mayor sobrevivencia, altura y diámetro que el resto de especies (Villacís, Armas, Hang, & Cassanoves, 2016).

#### **3.4.2 Selección de los sitios**

Los sitios seleccionados corresponden a los suelos afectados por los procesos de extracción de petróleo realizados por PETROAMAZONAS EP (CLR, UTSC, PCPP y PT). En cada sitio se evaluaron dos parcelas permanentes de muestreo de 24 x 84 m, que fueron implementadas hace cinco años (Villacís, Cassanoves, Hang, & Keestra, 2016).

#### **3.4.3 Diseño experimental**

El experimento se dispuso bajo un diseño en Parcela Dividida, en donde el sitio (UTSC, CLR, PCPP y PT), constituyen la parcela grande y las especies arbóreas (*Platymiscium pinnatum*, *Piptadenia pteroclada* y *Zygia longifolia*) las parcelas pequeñas (Figura 2).

El modelo matemático para este arreglo se define a continuación:

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + \delta_{k(i)} + E_j + (SE)_{ij} + e_{ijk}$$

Dónde:

$Y_{ijk}$  = Variable aleatoria

$\mu$  = Media general

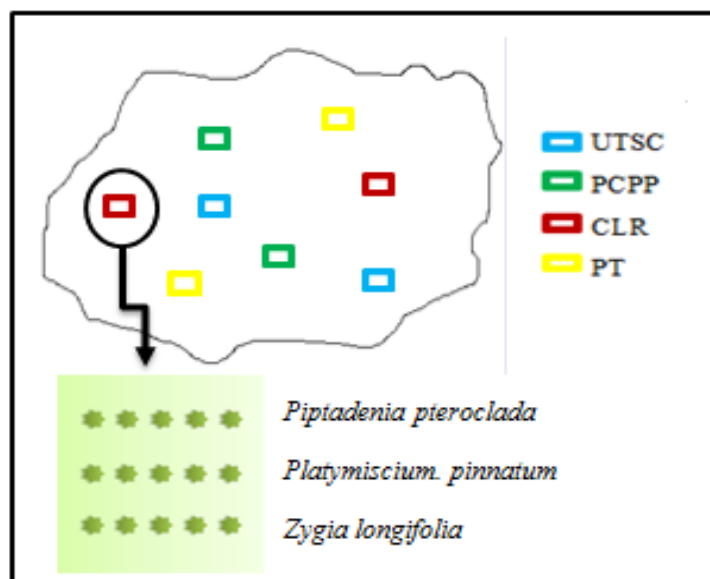
$S_i$  = Efecto del i-ésimo tipo de suelo

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

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

$(SE)_{ij}$  = Efecto de la interacción Tipo de suelo x Especie arbórea

$e_{ijk}$  = Error para la especie arbórea



**Figura 2** Croquis sobre la disposición del experimento en el campo

### 3.4.4 Variables evaluadas

Se evaluaron ocho variables dasométricas: sobrevivencia, diámetro basal, altura, incremento medio anual (en diámetro y altura), área basal, volumen de madera, biomasa y carbono almacenado de los cinco individuos de las tres especies seleccionadas.

El porcentaje de sobrevivencia para cada especie se determinó dividiendo el número de árboles vivos entre el número inicial de árboles establecidos en cada parcela, según la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Sobrevivencia} = \frac{\# \text{ árboles vivos}}{\# \text{ inicial árboles}} \times 100$$

El diámetro de los árboles se midió a 10 cm desde la base de la planta, utilizando un calibrador digital de error de  $\pm 0,01$  y una cinta diamétrica, dependiendo del caso. La altura de planta se midió desde la base hasta el ápice del tallo más alto, utilizando un hipsómetro láser. El incremento medio anual en altura (IMA altura) y en diámetro (IMA diámetro) de los árboles sobrevivientes se los determinó usando las siguientes ecuaciones propuestas por South (1995):

$$\text{IMA altura (m/mes)} = \frac{[\ln(\text{altura final}) - \ln(\text{altura inicial})]}{60 \text{ meses}}$$

$$\text{IMA diámetro (cm/mes)} = \frac{[\ln(\text{diámetro final}) - \ln(\text{diámetro inicial})]}{60 \text{ meses}}$$

Dónde:

IMA = Incremento Medio Anual

m = Metros

ln = Logaritmo natural

El área basal se la calculó a partir de la medición del diámetro o perímetro del árbol (Prodan, Peters, Cox, & Real, 1997), utilizando la siguiente ecuación:

$$g = \frac{\pi}{4} * \text{DAP}^2$$

Dónde:

g = Área basal ( $\text{m}^2$ )

$\pi$  = Constante que relaciona la longitud de una circunferencia con su diámetro.

DAP = Diámetro a la altura del pecho (m)

Para el volumen se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen (m}^3\text{)} = \text{área basal (m}^2\text{)} * \text{factor de forma} * \text{altura (m)}$$

En consideración que no existen estudios locales preliminares que brinden información sobre la relación área basal – volumen, se utilizó la ecuación propuesta por Orozco & Brumér, (2002):

$$B = V * DB$$

Dónde:

B = Biomasa del componente (t)

V = Volumen del componente (m<sup>3</sup>)

DB = Densidad básica (t/m<sup>3</sup>); datos tomados de Córdova (2014).

El carbono almacenado (CA) se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$CA = B_t * FC$$

Dónde:

CA = Carbono almacenado (t)

B<sub>t</sub> = Biomasa total (t)

FC = Fracción de carbono

Además, se determinaron nueve variables edafológicas: cinco variables físicas y químicas: materia orgánica (MO), conductividad eléctrica (CE), pH, P y N; y cuatro contaminantes: hidrocarburos totales de petróleo (TPHs), Cd, Ni y Pb.

Para esto, alrededor del fuste de cada individuo (50 cm) de las tres especies se colectó una muestra de suelo de un kg a 20 cm de profundidad (120 muestras en total). En cada una de las muestras se determinó el contenido de materia orgánica (MO), pH, conductividad eléctrica (CE),



N y P (Brunner, Günthardt-Goerg, & Frey, 2008), (Vervaeke, y otros, 2003). El porcentaje de MO se lo determinó mediante el método de calcinación a 550 ° C (Zagal & Sadzawka, 2007). El pH (H<sub>2</sub>O) se midió con un potenciómetro y la CE con un conductímetro. El P total en el suelo se determinó mediante un espectrofotómetro y el N mediante el método de Kjeldahl.

En 60 de las muestras colectadas sobre los suelos de las CLR y las UTSC, se estimó la cantidad de TPHs mediante cromatografía de gases con el método EPA 8015B modificado, y las cantidades de Cd, Ni y Pb por el método de espectrofotometría de absorción atómica (Villacís, Cassanoves, Hang, & Keesstra, 2016).

### **3.4.5 Análisis estadístico**

Las variables dasométricas y edafológicas se analizaron con estadística descriptiva (media y error estándar). Para comparar el diámetro y la altura entre especies y tipos de suelo, se realizó un análisis de covarianza utilizando como covariables el diámetro y la altura inicial respectivamente, medidas al momento del trasplante de los árboles. Las variables área basal, volumen, biomasa y carbono almacenado se analizaron mediante análisis de varianza con modelos mixtos. Además se realizaron pruebas de comparación de medias LSD al 5 %. Para determinar las relaciones entre las variables edafológicas y dasométricas, se realizó análisis de correlaciones de Pearson entre las variables medidas en el suelo: MO, CE, pH; N, P, Ni y Pb y las variables dasométricas: volumen y carbono almacenado. También se probaron modelos de regresión lineal entre el volumen y las variables edafológicas por sitio y especie. Todos los análisis se realizaron en el software estadístico INFOSTAT ® (Di Rienzo, y otros, 2015).

### **3.4.6 Manejo forestal**

Los árboles de cada especie fueron plantados a 4 x 4 m de distancia entre cada individuo, por lo que la densidad de siembra fue de 625 árboles/ha. Durante los primeros dos años de plantación se realizaron desbroces de malezas cada seis meses, a partir del tercer año los desbroces fueron anuales. Durante los cinco años de plantación no se fertilizaron los árboles, ni se aplicó ningún tipo de control de plagas.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Resultados

##### 4.1.1 Sobrevivencia, diámetro y altura

El análisis de varianza para la sobrevivencia no mostró un efecto para la interacción sitio\*especie ( $F = 0,85$ ;  $p = 0,5587$ ). Sin embargo los mayores porcentajes de sobrevivencia se presentaron con la especie *Piptadenia pteroclada* en las CLR y con *Zygia longifolia* en las PCPP (Tabla 2).

#### Tabla 2

*Promedio ± error estándar del porcentaje de sobrevivencia de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos afectados por las actividades de extracción de petróleo*

Sitio	Especie	Sobrevivencia (%)
CLR	<i>Piptadenia pteroclada</i>	100,00 a
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	90,00 ± 10,00 a
	<i>Zygia longifolia</i>	90,00 ± 10,00 a
UTSC	<i>Zygia longifolia</i>	90,00 ± 10,00 a
	<i>Piptadenia pteroclada</i>	80,00 ± 20,00 a
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	70,00 ± 30,00 a
PCPP	<i>Zygia. longifolia</i>	100,00 a
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	90,00 ± 10,00 a
	<i>Piptadenia pteroclada</i>	80,00 ± 20,00 a
PT	<i>Platymiscium pinnatum</i>	90,00 ± 10,00 a
	<i>Piptadenia pteroclada</i>	70,00 ± 30,00 a
	<i>Zygia longifolia</i>	60,00 a

Letras iguales entre especies dentro de cada sitio no indican diferencias significativas (LSD Fisher;  $p > 0,05$ ). CLR = Celdas de lodos y ripios, UTSC = Unidades de tratamientos de suelos contaminados, PCPP = Plataformas que circunscriben a los pozos petroleros y PT = Potreros testigo.

Los análisis de covarianza para el diámetro y la altura presentaron un efecto significativo para el sitio y la especie. Las covariables diámetro inicial y altura inicial no tuvieron un efecto significativo sobre el diámetro y la altura final de los árboles (Tabla 3).

**Tabla 3**

*Análisis de covarianza para el diámetro y altura de los árboles de tres especies arbóreas, plantadas sobre suelos afectados por las actividades de extracción de petróleo*

	Grados libertad	Diámetro (cm)		Altura (m)	
		F-fisher	p-valor	F-fisher	p-valor
Sitio	3	4,03	0,0099	5,22	0,0023
Especie	2	5,45	0,0059	7,41	0,0011
Sitio*Especie	6	1,78	0,1125	0,96	0,4547
Diámetro Inicial	1	0,69	0,4071	0,01	0,9362
Altura Inicial	1	0	0,9803	0,25	0,6168

Las especies y los sitios se consideraron factores fijos, mientras que el diámetro y altura inicial de los árboles se consideraron covariables.

Los árboles de *Piptadenia pteroclada* y *Zygia longifolia* presentaron mayor diámetro que los árboles de *Platymiscium pinnatum*. Por otro lado los individuos de *Piptadenia pteroclada* presentaron mayor altura que los individuos de *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia* (Tabla 4).

**Tabla 4**

Promedio  $\pm$  error estándar del diámetro y la altura de tres especies arbóreas

Especie	Diámetro (cm)	Altura (m)
<i>Piptadenia pteroclada</i>	12,19 $\pm$ 1,31 a	7,50 $\pm$ 0,71 a
<i>Zygia longifolia</i>	10,78 $\pm$ 1,34 a	4,24 $\pm$ 0,38 b
<i>Platymiscium pinnatum</i>	7,11 $\pm$ 0,78 b	4,43 $\pm$ 0,46 b

Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher;  $p > 0,05$ ).

Los individuos de las tres especies en las CLR presentaron mayores diámetros y alturas que los individuos de los otros sitios (Tabla 5).

**Tabla 5**

*Promedio ± error estándar del diámetro y altura por sitio, de tres especies arbóreas*

Sitio	Diámetro (cm)	Altura (m)
CLR	13,40 ± 1,13 a	7,18 ± 0,51 a
UTSC	9,98 ± 1,15 b	4,56 ± 0,53 b
PT	8,72 ± 1,34 b	5,06 ± 0,59 b
PCPP	8,00 ± 1,14 b	4,76 ± 0,53 b

Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher;  $p > 0,05$ ). CLR = Celdas de lodos y ripios, UTSC = Unidades de tratamientos de suelos contaminados, PCPP = Plataformas que circunscriben a los pozos petroleros y PT = Potreros testigo.

#### 4.1.2 Incremento medio anual

El análisis de varianza del incremento medio anual en diámetro y altura de *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia* mostró un efecto para el sitio y la especie (Tabla 6).

**Tabla 6**

*Análisis de varianza para el incremento medio anual en diámetro y en altura de los árboles de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos perturbados*

	Grados libertad	Diámetro (cm)		Altura (m)	
		F-fisher	p-valor	F-fisher	p-valor
Sitio	3	5,11	0,0026	6,16	0,0008
Especie	2	14,50	<0,0001	11,55	<0,0001
Sitio*Especie	6	1,85	0,099	0,99	0,4356

Las especies y los sitios se consideraron factores fijos.

Los árboles de las especies *Piptadenia pteroclada* y *Zygia longifolia* presentaron mayor incremento medio anual en diámetro que los árboles de *Platymiscium pinnatum*; mientras que los individuos de *Piptadenia pteroclada* presentaron un mayor incremento medio anual en altura que los árboles de *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia* (Tabla 7).

**Tabla 7**

*Promedio  $\pm$  error estándar para el incremento medio anual del diámetro y la altura de tres especies arbóreas*

<b>Especie</b>	<b>Diámetro (cm)</b>	<b>Altura (m)</b>
<i>Piptadenia pteroclada</i>	2,42 $\pm$ 0,20 a	1,37 $\pm$ 0,12 a
<i>Zygia longifolia</i>	2,01 $\pm$ 0,26 a	0,74 $\pm$ 0,07 b
<i>Platymiscium pinnatum</i>	1,27 $\pm$ 0,10 b	0,78 $\pm$ 0,07 b

Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher;  $p > 0,05$ ).

Los individuos de las tres especies presentes en las parcelas de CLR mostraron un mayor incremento medio anual en diámetro y en altura que los árboles presentes en los otros sitios (Tabla 8).

**Tabla 8**

*Promedio  $\pm$  error estándar del incremento medio anual en diámetro y altura por sitio, de tres especies arbóreas*

<b>Sitio</b>	<b>Diámetro (cm)</b>	<b>Altura (m)</b>
CLR	2,60 $\pm$ 0,22 a	1,32 $\pm$ 0,10 a
UTSC	1,91 $\pm$ 0,23 b	0,80 $\pm$ 0,10 b
PCPP	1,47 $\pm$ 0,22 b	0,84 $\pm$ 0,10 b
PT	1,62 $\pm$ 0,26 b	0,90 $\pm$ 0,12 b

Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher;  $p > 0,05$ ). CLR = Celdas de lodos y ripios, UTSC = Unidades de tratamientos de suelos contaminados, PCPP = Plataformas que circunscriben a los pozos petroleros y PT = Potreritos testigo.

#### **4.1.3 Área basal y volumen**

El análisis de varianza para el área basal y el volumen de madera mostró un efecto de la interacción sitio\*especie (Tabla 9).

**Tabla 9**

*Análisis de varianza para el área basal y el volumen de tres especies arbóreas, plantadas sobre suelos perturbados*

	Grados libertad	Área basal (m <sup>2</sup> )		Volumen (m <sup>3</sup> )	
		F-fisher	p-valor	F-fisher	p-valor
Sitio	3	4,39	0,0059	4,94	0,0030
Especie	2	13,78	<0,0001	11,47	<0,0001
Sitio*Especie	6	3,02	0,0090	3,43	0,0038

Las especies y los sitios se consideraron factores fijos.

Los individuos de la especie *Piptadenia pteroclada* plantados dentro de las CLR presentaron mayor área basal y volumen de madera que los individuos de las otras especies plantadas en los otros sitios (Tabla 10).

**Tabla 10**

*Promedio ± error estándar para el área basal y el volumen de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos afectados por las actividades de extracción de petróleo*

Sitio	Especie	Área Basal (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
CLR	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,12 ± 0,02 a	0,68 ± 0,11 a
	<i>Zygia longifolia</i>	0,06 ± 0,02 bc	0,18 ± 0,09 bcd
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,02 ± 0,00 cd	0,07 ± 0,02 bcd
UTSC	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,06 ± 0,02 bc	0,26 ± 0,11 bc
	<i>Zygia longifolia</i>	0,03 ± 0,02 bcd	0,05 ± 0,09 bcd
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,01 ± 0,00 d	0,02 ± 0,02 d
PCPP	<i>Zygia longifolia</i>	0,07 ± 0,02 ab	0,30 ± 0,09 b
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,02 ± 0,00 cd	0,04 ± 0,02 cd
	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,01 ± 0,02 cd	0,04 ± 0,11 bcd
PT	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,03 ± 0,02 bcd	0,13 ± 0,11 bcd
	<i>Zygia longifolia</i>	0,03 ± 0,02 bcd	0,08 ± 0,09 bcd
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,01 ± 0,00 d	0,03 ± 0,02 cd

Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher;  $p > 0,05$ ). CLR = Celdas de lodos y rípios, UTSC = Unidades de tratamientos de suelos contaminados, PCPP = Plataformas que circunscriben a los pozos petroleros y PT = Potreros testigo.

#### 4.1.4 Biomasa y carbono almacenado

El análisis de varianza para la biomasa y el carbono almacenado de las tres especies arbóreas mostró una interacción significativa sitio\*especie (Tabla 11).

**Tabla 11**

*Análisis de varianza para la biomasa y carbono almacenado de árboles de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos perturbados*

	Grados libertad	Biomasa (Mg)		Carbono Almacenado (Mg/ha*año)	
		F-fisher	p-valor	F-fisher	p-valor
Sitio	3	3,95	0,0103	3,95	0,0103
Especie	2	10,84	0,0001	10,84	0,0001
Sitio*Especie	6	3,31	0,0050	3,31	0,0050

Las especies y los sitios se consideraron factores fijos.

El valor más alto de biomasa y carbono almacenado fue encontrado en los arboles de *Piptadenia pteroclada* presentes en las CLR, mientras que los valores más bajos presentaron los individuos de *Platymiscium pinnatum* de los PT (Tabla 12).

**Tabla 12**

*Promedio ± error estándar para la biomasa y carbono almacenado de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos perturbados*

Sitio	Especie	Biomasa (Mg)	Carbono (Mg/ha*año)
CLR	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,26 ± 0,04 a	0,12 ± 0,02 a
	<i>Zygia longifolia</i>	0,11 ± 0,05 bc	0,05 ± 0,02 bc
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,04 ± 0,01 c	0,02 ± 0,0038 c
UTSC	<i>Piptadenia pteroclada da</i>	0,10 ± 0,04 bc	0,05 ± 0,02 bc
	<i>Zygia longifolia</i>	0,03 ± 0,05 c	0,01 ± 0,02 c
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,01 ± 0,01 c	0,005 ± 0,0038 c
PCPP	<i>Zygia longifolia</i>	0,17 ± 0,05 ab	0,08 ± 0,02 ab
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,02 ± 0,01 c	0,01 ± 0,0038 c
	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,01 ± 0,04 c	0,01 ± 0,02 c
PT	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,05 ± 0,04 bc	0,02 ± 0,02 bc
	<i>Zygia longifolia</i>	0,04 ± 0,05 bc	0,02 ± 0,02 bc
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	0,01 ± 0,01 c	0,01 ± 0,0038 c

Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher;  $p > 0,05$ ). CLR = Celdas de lodos y ripios, UTSC = Unidades de tratamientos de suelos contaminados, PCPP = Plataformas que circunscriben a los pozos petroleros y PT = Potreros testigo.

#### 4.1.5 Características del suelo y nutrientes

Los análisis de covarianza para el pH ( $F_{3, 106} = 4,75$ ;  $p = 0,0039$ ), contenido de MO ( $F_{3, 106} = 22,57$ ;  $p < 0,0001$ ), conductividad eléctrica ( $F_{3, 106} = 4,96$ ;  $p = 0,0030$ ), N ( $F_{3, 106} = 13,94$ ;  $p <$



0,0001) y P ( $F_{3, 106} = 21,76$ ;  $p < 0,0001$ ), mostraron un efecto significativo para el sitio. Las covariables pH ( $p = 0,0150$ ), contenido de MO ( $p < 0,0001$ ), conductividad eléctrica ( $p = 0,0050$ ) y P ( $p = 0,0014$ ), medidas al inicio del experimento (año cero) tuvieron un efecto significativo sobre las variables medidas a los cinco años.

El pH fue mayor en los suelos perturbados que en los potreros; sin embargo, los valores de pH para los sitios perturbados mostraron un incremento de 0,5 a 1 unidades luego de cinco años. Con respecto a la MO, los niveles encontrados en los suelos de los PT fueron similares a los niveles de los suelos de las CRL y UTSC; los valores de MO en los sitios perturbados aumentaron entre 3,15 y 14,09 %, después de cinco años. De igual manera, la conductividad eléctrica de los suelos de las CLR fue mayor que la conductividad de las PPCP y PT; los valores de conductividad para los suelos de los sitios perturbados disminuyeron entre 0,02 y 9,16 dS/m.

Los niveles de N fueron similares en los suelos de los PT y de las CLR, mientras que las concentraciones de P fueron mayores en los suelos de las CLR y en las UTSC. Los rangos de N encontrados en los suelos perturbados fluctuaron entre 0,05 a 0,09 %, mientras que los rangos de P se encontraron entre 0,22 y 2,07 ppm. Es necesario aclarar que estos nutrientes no fueron encontrados en los análisis realizados en el año cero, y que no se realizaron análisis para micronutrientes del suelo (Tabla 13).

**Tabla 13**

*Promedio ± error estándar del pH, MO, CE, N y P presentes en los suelos aledaños a las tres especies arbóreas*

Sitio	pH	MO (%)	CE (ds/m)	N (%)	P (ppm)
CLR	5,80 ± 0,15 a	13,45 ± 1,84 a	0,14 ± 0,04 a	0,09 ± 0,03 ab	2,07 ± 0,38 a
UTSC	5,65 ± 0,12 a	14,69 ± 0,51 a	0,06 ± 0,04 ab	0,08 ± 0,01 b	1,28 ± 0,17 a
PCPP	5,52 ± 0,07 a	8,76 ± 0,35 b	0,04 ± 0,003 b	0,05 ± 0,01 b	0,22 ± 0,04 b
PT	5,14 ± 0,11 b	15,18 ± 0,94 a	0,03 ± 0,002 b	0,13 ± 0,01 a	0,23 ± 0,08 b

Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher;  $p > 0,05$ ). CLR = Celdas de lodos y ripios, UTSC = Unidades de tratamientos de suelos contaminados, PCPP = Plataformas que circunscriben a los pozos petroleros y PT = Potrerros testigo.

#### 4.1.6 Hidrocarburos y metales pesados

Los análisis de las 60 muestras de suelos provenientes de las CLR y UTSC mostraron concentraciones de TPHs < a 10 ppm y de Cd < a 1 ppm. Para el Ni presente en los suelos de los sitios perturbados no hubo efecto significativo de los factores ni de la interacción sitio\*especie. Mientras que para el Pb, se encontró un efecto significativo para la interacción sitio\*especie ( $F_{3,106} = 3,32$ ;  $p = 0,0436$ ), y los niveles más altos se encontraron en los suelos aledaños a *Piptadenia pteroclada* de las CLR (Tabla 14).

**Tabla 14**

*Promedio ± error estándar de Ni y Pb presentes en los suelos aledaños a las tres especies arbóreas*

Sitio	Especie	Ni (ppm)	Pb (ppm)
CLR	<i>Piptadenia pteroclada</i>	11,12 ± 1,97 a	10,16 ± 1,58 a
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	10,98 ± 1,97 a	7,04 ± 0,69 b
	<i>Zygia longifolia</i>	11,90 ± 1,97 a	6,64 ± 0,62 b
UTSC	<i>Piptadenia pteroclada</i>	14,88 ± 3,67 a	7,00 ± 0,00 b
	<i>Platymiscium pinnatum</i>	15,36 ± 3,67 a	7,00 ± 0,00 b
	<i>Zygia longifolia</i>	15,07 ± 3,67 a	7,00 ± 0,00 b

Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher;  $p > 0,05$ ). CLR = Celdas de lodos y ripios, UTSC = Unidades de tratamientos de suelos contaminados, PCPP = Plataformas que circunscriben a los pozos petroleros y PT = Potrerros testigo.

#### 4.1.7 Relaciones entre variables edafológicas y dasométricas

Se encontraron correlaciones negativas entre los contenidos de N y Ni en los suelos aledaños a *Piptadenia pteroclada* de las CLR ( $r = -0,83$ ;  $p = 0,0031$ ). También se encontraron correlaciones entre MO y Ni en los suelos aledaños a *Zygia longifolia* ( $r = -0,9$ ;  $p < 0,001$ ) *Platymiscium pinnatum* ( $r = -0,8$ ;  $p = 0,01$ ) de las UTSC.

Además, se obtuvieron correlaciones positivas entre el P total del suelo con el volumen de madera ( $r = 0,72$ ;  $p = 0,02$ ) y con el CA ( $r = 0,72$ ;  $p = 0,02$ ) para *Piptadenia pteroclada*, y entre el pH con el volumen de madera ( $r = 0,71$ ;  $p = 0,02$ ) y con el CA ( $r = 0,71$ ;  $p = 0,02$ ) para *Platymiscium pinnatum* en los PT. También se encontraron correlaciones entre el P total del suelo con el volumen de madera ( $r = 0,64$ ;  $p = 0,04$ ) y con el CA ( $r = 0,64$ ;  $p = 0,04$ ) para *Zygia longifolia*, y entre la CE con el volumen de madera ( $r = 0,78$ ;  $p = 0,01$ ) y con el CA ( $r = 0,78$ ;  $p = 0,01$ ) para *Platymiscium pinnatum* en los suelos de UTSC (Tabla 15).

**Tabla 15**

*Coefficientes de correlación de Pearson para las variables evaluadas por sitio y tipo de especie*

	<i>Piptadenia pteroclada</i>		<i>Platymiscium pinnatum</i>		<i>Zygia longifolia</i>	
	r	p-valor	r	p-valor	r	p-valor
<b>CLR</b>						
CE - MO	0,94	6x10-5	0,82	0,0034	-----	-----
CE - pH	0,97	5,3x10-6	-----	-----	-----	-----
MO - pH	0,93	8,5x10-5	-----	-----	-----	-----
MO - N	-0,68	0,03	0,86	0,0014	-----	-----
MO - P	-----	-----	0,85	0,0016	-----	-----
N - Ni	-0,83	0,0031	-----	-----	-----	-----
<b>UTSC</b>						
CE - pH	-0,78	0,01	-----	-----	-0,74	0,01
MO - N	0,82	0,004	-----	-----	-----	-----
MO - Ni	-----	-----	-0,8	0,01	-0,9	< 0,001
Vol - CE	-----	-----	0,78	0,01	-----	-----
Vol - P	-----	-----	-----	-----	0,64	0,04
CA - CE	-----	-----	0,78	0,01	-----	-----
CA - P	-----	-----	-----	-----	0,64	0,04
<b>PCPP</b>						
CE - pH	-----	-----	-0,84	0,0026	-----	-----
MO - pH	-0,91	< 0,001	-0,86	0,0013	-----	-----
MO - P	-----	-----	0,89	0,00053	-----	-----
pH - P	-----	-----	-0,91	0,0003	-----	-----
<b>PT</b>						
MO - N	0,75	0,01	0,87	0,0011	0,9	< 0,001
Vol - pH	-----	-----	0,71	0,02	-----	-----
Vol - P	0,72	0,02	-----	-----	-----	-----
CA - pH	-----	-----	0,71	0,02	-----	-----
CA - P	0,72	0,02	-----	-----	-----	-----

CE = Conductividad Eléctrica; MO = Materia Orgánica; pH = potencial de hidrógeno; Vol = Volumen; CA = Carbono Almacenado;; N = Nitrógeno; P = Fósforo; Pb = Plomo; Ni = Níquel

Para la especie *Platymiscium pinnatum* plantada sobre las UTSC se encontró el siguiente modelo de regresión lineal: Volumen= -0,22Pb+1,76 CE+0,04 pH ( $R^2 = 0,82$ ;  $p = 0,0244$ ). Y para la misma especie plantada sobre los PT se obtuvo la siguiente ecuación: Volumen= -0,88+0,17 pH ( $R^2 = 0,51$ ;  $p = 0,02$ ).

## 4.2 Discusión

Este estudio proporciona información sobre el crecimiento de tres especies arbóreas plantadas sobre suelos afectados por los procesos inherentes a la explotación del petróleo en la amazonia y sobre los niveles de contaminantes y algunas características físico-químicas del suelo cinco años después de la plantación. Esta información es importante no solamente para la correcta selección de las especies arbóreas sino también para evaluar su efecto sobre los niveles de contaminantes y nutrientes en los suelos perturbados a largo plazo.

Según Ulcuango (2014), las características de los suelos afectados por los procesos de extracción de petróleo, al inicio del experimento, fueron desfavorables para el crecimiento de la vegetación debido a la mala aireación, elevada acidez, baja fertilidad química, desequilibrio de bases y elevadas concentraciones de hidrocarburos (TPHs > 4685,60 ppm) y metales pesados (Cd > 1,28; Ni > 32,11 y Pb > 23,73 [ppm]). Sin embargo, después de cinco años *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia* mostraron una sobrevivencia superior al 80 %, en todos los sitios y los suelos mostraron un aumento en los niveles de nutrientes y una disminución de los niveles de hidrocarburos y metales pesados, lo que los ubica en la actualidad como suelos de ecosistema sensible dentro de los rangos permisibles por el Ministerio del Medio Ambiente del Ecuador (MAE, 2014).

### 4.2.1 Rendimiento de las especies

En las parcelas ubicadas en las CLR se dieron las tasas de sobrevivencia más altas de las tres especies con una media mayor al 90 %, un mayor crecimiento en diámetro y altura a los cinco años. Estos resultados difieren de los reportados por Villacís, Cassanoves, Hang, & Keestra (2016), en donde las tasas de sobrevivencia más altas (mayores al 80 %), a los dos años de edad,

se presentaron en las UTSC a pesar de haberse encontrado en este sitio las mayores concentraciones de hidrocarburos y metales pesados.

En este estudio se destacan los árboles de la especie *Piptadenia pteroclada* cuya altura (7,50 m) y diámetro (12,19 cm) son notablemente mayores a los de *Platymiscium pinnatum* (4,43 m; 7,11 cm) y *Zygia longifolia* (4,24 m; 10,78 m). Esto concuerda con estudios previos de Ulcuango (2014) donde determina que, con un año de edad, los individuos de la especie *Piptadenia pteroclada* presentan un mayor crecimiento tanto en diámetro como en altura (3,01 m; 4,34 cm) en relación a *Platymiscium pinnatum* (1,59 m; 2,97 cm) y *Zygia longifolia* (2,02 m; 2,94 m) dentro de las CLR. Según estudios Brako & Zarucchi (1993), los árboles de la especie *Platymiscium pinnatum* tienen un lento crecimiento, ya que necesitan de terrenos planos y bien drenados, a pesar que toleran inundaciones temporales. Mientras que *Zygia longifolia* necesita lugares húmedos para su normal desarrollo aunque puede soportar inundaciones cortas y tolerar medianamente la sequía. Estas características especiales podrían explicar el menor crecimiento en diámetro y altura de estas dos especies.

Con respecto a la cantidad de carbono almacenado durante los primeros cinco años, los árboles de la especie *Piptadenia pteroclada* plantados sobre las CLR, almacenaron mayor cantidad de carbono (0,12 MgC/ha\*año) que los individuos de *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia*. Estudios realizados en Costa Rica por Oelbermann, Voroney, & Gordon (2004), han reportado que en sistemas agroforestales de 10 años de edad, a una densidad de 833 árboles/ha, los troncos de las especie *E. poeppigiana*, almacenaron 0,3 MgC/ha\*año. Considerando la escasas de información sobre secuestro de carbono de las especies evaluadas y que *E. poeppigiana* se distribuye en Centro y Sudamérica y pertenece a la familia Fabaceae, es

importante tener un valor referencial que permita destacar el potencial de las especies *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia* para almacenar carbono atmosférico.

#### **4.2.2 Características del suelo, nutrientes y contaminantes**

El porcentaje de materia orgánica en los suelos de todos los sitios se incrementó en relación a los valores obtenidos en los análisis realizados en el año cero. Este aumento se debe posiblemente a la producción de hojarasca, al ciclaje de nutrientes, al aumento de la actividad microbiana y a sus procesos propios de descomposición, con la ayuda de las características climáticas que existen en la amazonia ecuatoriana durante los cinco años (Sánchez, Ruiz, & Ríos, 2005). El aumento de pH en los suelos perturbados después de los cinco años se lo puede adjudicar al alto contenido de MO, que confiere a los suelos una alta capacidad de resistir procesos de acidificación; este efecto obedece a la presencia de grupos funcionales en la superficie de la MO que permiten el intercambio de  $H^+$  con la solución del suelo (Wong & Swift, 2003).

Los bajos niveles de hidrocarburos, Ni, Cd y Pb encontrados en los suelos perturbados de UTSC y CLR luego de cinco años hacen que se encuentre dentro de la categoría de ecosistemas sensibles según el Ministerio del Medio Ambiente del Ecuador, (TPHs < 1000, Cd < 10, Ni < 40, Pb < 80) (MAE, 2014). Cabe recalcar que los suelos de PCPP y PT se pueden contaminar debido a las actividades inherentes a la extracción de petróleo.

Se puede considerar al crecimiento de los árboles como un factor importante para la eliminación de contaminantes en los suelos, ya que al ser especies con un buen prendimiento y sobrevivencia en los sitios afectados, sus raíces están adaptadas al medio. Las raíces de los árboles juegan un papel importante en la aceleración y mejora de la aireación del suelo contaminado y una buena biorremediación debe empezar por mejorar éstas condiciones (Villacís,

Cassanoves, Hang, & Keestra, 2016), (Mohsenzadeh, y otros, 2010), encontraron que la aireación del suelo inducida por el crecimiento de la raíz y el aumento de los niveles de nutrientes a través de la deposición de la hojarasca y la acumulación de materia orgánica puede reducir drásticamente los niveles de hidrocarburos en los suelos contaminados.

#### **4.2.3 Relaciones entre las variables dasométricas y las características edafológicas**

Los metales pesados presentes en los suelos pueden quedar retenidos en el mismo o pueden ser movilizados mediante mecanismos químicos y biológicos (Pagnanelli, Moscardini, Giuliano, & Toro, 2004). Por lo que la fertilidad de los suelos tiene gran importancia al momento de remediar contaminaciones de metales pesados. La correlación negativa que se reportó en el estudio entre Ni con el N y la MO, corrobora lo dicho por Sauquillo, Rigol, & Rauret (2003), que indica que los factores que influyen en la movilización de metales pesados dentro del suelo son las propias características edafológicas como el pH, conductividad eléctrica, porcentaje de MO y textura. Éstas características edafológicas anteriormente mencionadas ayudan de igual manera a una correcta absorción de nutrientes del suelo por parte de las especies arbóreas, logrando un mejor establecimiento y alcanzando un mayor volumen de madera.

El carbono almacenado fue directamente proporcional al volumen de madera, ya que los árboles generalmente almacenan CO<sub>2</sub> atmosférico en las partes leñosas; aproximadamente el 84 % de la biomasa se encuentra en el fuste de los árboles y un 46 % es carbono (Avendaño, Acosta, Carrillo, & Etchevers, 2009), (Ordoñez, De Jong, & Maser, 2001).



## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Las tres especies evaluadas tuvieron altos índices de sobrevivencia en todos los sitios de estudio; sin embargo los árboles de *Piptadenia pteroclada* presentaron un mayor crecimiento tanto en diámetro como en altura dentro de todos los sitios.

Los individuos de la especie *Piptadenia pteroclada* presentaron mayor área basal, volumen de madera, biomasa y carbono atmosférico que los individuos de *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia*.

Los suelos aledaños a los árboles de *Piptadenia pteroclada*, *P. pinnatum* y *Zygia longifolia* en todos los sitios perturbados mostraron un incremento de materia orgánica, pH, N y P en los primeros cinco años.

Los suelos aledaños a los árboles de las tres especies presentes en las celdas de lodos y ripios y unidades de tratamientos de suelos contaminados presentaron una disminución de las concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo, Cd, Ni y Pb.

## 5.2 Recomendaciones

Utilizar prioritariamente árboles de *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia*, para futuros planes de reforestación en áreas contaminadas con hidrocarburos del distrito amazónico.

Continuar con la evaluación de las tres especies arbóreas, *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia*, durante más años, para obtener datos que nos permitan desarrollar curvas de crecimiento de las especies y observar las mejoras en la remediación del suelo aledaño a los árboles.

Evaluar los micronutrientes de los suelos donde están plantadas las tres especies arbóreas para tener en detalle todos los nutrientes presentes en estos sitios.

Realizar análisis de contaminantes en los suelos de las plataformas que circunscriben a los pozos petroleros y de los potreros que podrían contener residuos debido a las posibles filtraciones de crudo.

### 5.3 Bibliografía

- Albuja, L., Almendáriz, A., Barriga, R., Montalvo, D., Cáceres, F., & Román, J. L. (2012). *Fauna de Vertebrados del Ecuador*. Quito, Ecuador: Arial 12 editorial.
- Avendaño, H., Acosta, M., Carrillo, A., & Etchevers, b. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de Abies religiosa. *Fitotecnia Mexicana*, 32(3), 233 - 238.
- Bai, X. Y., Wang, S. J., & Xiong, K. N. (2013). Assessing spatial-temporal evolution processes of karst rocky desertification land: indications for restoration strategies. *Land Degradation and Development*, 24, 47 - 56.
- Ballesteros, C. (2009). *Manejo de los Residuos en el Proceso de Perforación mediante la Evaluación del cumplimiento técnico y legal de los diferentes sistemas para el tratamiento y disposición de dichos residuos*. Recuperado el 3 de Julio de 2017, de <http://www.dspace.espol.edu.ec>
- BCE. (29 de Mayo de 2013). *Estadísticas Económicas*. Recuperado el 15 de Junio de 2017, de <https://www.bce.fin.ec>
- Bertzky, M., Ravilious, C., Araujo Navas, A. L., Kapos, V., Carrión, D., Chiu, M., & Dickson, B. (2011). Carbono, biodiversidad y servicios ecosistémicos: Explorando los beneficios múltiples Ecuador. *UNEP World Conservation Monitoring Centre*.
- Brako, L., & Zarucchi, J. (1993). *Catalogue of the Flowering Plants and Gymnosperms of Perú*. Missouri, USA.
- Bravo, E. (2007). Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad. *Acción Ecológica*.
- Brunner, I., Günthardt-Goerg, M., & Frey, B. (2008). Heavy metal accumulation and phytostabilisation potential of tree fine roots in a contaminated soil. *Environmental Pollution*(152), 559 - 568.
- Bunn, W. A., Jenkin, M. A., Brown, C. B., & Sanders, N. J. (2010). Change within and among forest communities: the influence of historic disturbance, environmental gradients, and community attributes. *Ecography*, 33, 425 - 434.
- Clark, R. (2003). *Specifying Trees: a guide to the assessment of tree quality*. Sydney.
- Córdova, K. L. (2014). *Rasgos funcionales de 25 especies forestales utilizadas en la reforestación de áreas de explotación de la EP PETROAMAZONAS*. Tesis, ESPE, Sangolquí.

- Di Rienzo, J. A., Cassanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L. T., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2015). *Grupo Infostat FCA*, 2014. Recuperado el 25 de Agosto de 2017, de <http://www.infostat.com.ar>
- FAO. (2017). *El Suelo*. Recuperado el 26 de Junio de 2017, de <http://www.fao.org/docrep/006/W1309S/w1309s04.htm>
- Forzza, R. (2010). *Flora do Brasil 2020*. Recuperado el 20 de Mayo de 2017, de <http://floradobrasil.jbrj.gov.br>
- Gómez, M., & Toro, J. (2007). Manejo de las semillas y la propagación de diez especies forestales del bosque húmedo tropical. *Boletín Técnico Biodiversidad*(2), 71.
- Guaranda, W. (2014). *Apuntes sobre la extracción petrolera en el Ecuador*. Recuperado el 29 de Mayo de 2017, de INREDH: [http://www.inredh.org/archivos/pdf/boletin\\_petroleo\\_apuntes.pdf](http://www.inredh.org/archivos/pdf/boletin_petroleo_apuntes.pdf)
- Holdridge, L. (1979). *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José, Costa Rica: IICA.
- Ibañez, S., Gisbert, J., & Moreno, H. (2014). *Inceptisoles. Producción Vegetal*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural, España, Valencia.
- IGM. (2010). *Cartografía República del Ecuador*. Recuperado el 23 de Septiembre de 2017, de <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descargas/geoinformacion/>
- Imaña-Encinas, J., Da Silva, G. F., & Kishi, I. T. (2002). *Variáveis dendrométricas*. Universidade de Brasilia, Dpto de Engenharia Florestal, Brasilia.
- INAMHI. (2015). *Datos meteorológicos de las provincias de Sucumbios y Orellana*. Recuperado el 15 de Octubre de 2017, de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/informacion-en-linea/>
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Universidad Nacional de Colombia, Colombia, Medellín.
- Jiménez, M. (2009). *Resiliencia de los ecosistemas naturales terrestres de Costa Rica al cambio*. CATIE, Escuela de Posgrado, Turrialba.
- Johnston, M., & Percival, G. (2011). *Trees, people and the built environment*. Edinburgh, Escocia: Forestry Commission.

- Karamalidis, A. K., Evangeloua, A. C., Karabikab, A. I., Drainasb, C., & Voudriasa, E. A. (2010). Laboratory scale bioremediation of petroleum-contaminated soil by indigenous microorganisms and added *Pseudomonas aeruginosa* strain spet. *Bioresource Technology*(101), 6545 - 6552.
- Kargar Chigani, H., Khajeddin, S. J., & Karimzadeh, H. R. (2012). Soil relationship of three arid plant species and their use in sehabilitating degraded sites. *Land Degradation and Development*, 23, 92 - 101.
- Kozlowski, T. T. (1999). Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 596 - 619.
- MAE. (2014). *Reglamento ambiental de actividades hidrocarburíferas en el Ecuador*. Recuperado el 14 de Agosto de 2017, de <http://www.hidrocarburos.gob.ec/wpcontent/>
- Mohsenzadeh, F., Nasser, S., Mesdaghinia, A., Nabizadeh, R., Zafari, D., Khodakaramian, G., & Chehregani, A. (2010). Phytoremediation of petroleum-polluted soils: application of *Polygonum aviculare* and its root-associated (penetrated) fungal strains for bioremediation of petroleum-polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73(4), 613 - 619.
- Moragas, F. (2008). *La selva amazónica*. Recuperado el 4 de Julio de 2017, de <http://www.flor-amazonas.blogspot.com>
- Nowak, D. J., Kuroda, M., & Crane, D. E. (2004). Tree mortality rates and tree population projections in Baltimore, Maryland, USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2(3), 139 - 147.
- Oelbermann, M., Voroney, R. P., & Gordon, A. M. (2004). Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*(104), 359 - 377.
- Ordoñez, B., De Jong, H. J., & Maser, O. (2001). Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus*, Michoacán. *Madera y Bosques*, 7(2), 27 - 47.
- Orozco, L., & Brumér, C. (2002). Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central. *Serie Técnica*(50).
- Pagnanelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V., & Toro, L. (2004). Sequential extraction of heavy metals in river sediments of an abandoned pyrite mining area: Pollution Detection and Affinity Series. *Environmental Pollution*(132), 189 - 201.

- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). *Mensura Forestal*. San José, Costa Rica.
- Rondeux, J. (2010). *Medición de árboles y masas forestales*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Sánchez, B., Ruiz, M., & Ríos, M. M. (2005). Materia orgánica y actividad biológica del suelo en relación con la altitud, en la cuenca del Río Maracay, Estado Aragua. *Agronomía Tropical*, 55(4), 507- 534.
- Sauquillo, A., Rigol, A., & Rauret, G. (2003). Overview of the use of leaching extraction tests for risk assessment of trace metals in contaminated soils and sediments. *Trends in Analytical Chemistry*(22), 152 - 159.
- Schlegel, B. (2001). *Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde*. Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- SECF. (2005). *Diccionario Forestal*. Madrid, España.
- Sellmer, J., & Kuhns, L. (2007). *Guide to selecting and specifying nursery stock. Urban and community forestry in the northeast*.
- Sierra, R. (1999). *Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental*. Quito, Ecuador: Rimana.
- SIPA. (2017). *Sistema de Información Pública Agropecuaria*. Recuperado el 2 de Marzo de 2017, de <http://sinagap.magap.gob.ec/sina/>
- South, D. B. (1995). *Relative growth rates: a critique*. . South Africa.
- Torres, R., & Guevara, S. (2002). El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica INE*(63).
- Ugalde, L. (1981). *Conceptos básicos de dasometría*. Turrialba, Costa Rica.
- Ulcuango, K. (2014). *Estudio de las variables de crecimiento de 20 especies forestales y las características edafológicas de plataformas y celdas de lodos y ripios de la EP PETROECUADOR*. Tesis, ESPE, Ecuador, Sangolquí.
- Vervaeke, P., Luysaert, S., Mertens, J., Meers, E., Tack, F. M., & Lust , N. (2003). Phytoremediation prospects fo willow stands on contaminated sediment: a field trial. *Enviromental Pollution*(126), 275 - 282.
- Villacís, J. E., Armas, C., Hang, S., & Cassanoves, F. (2016). Selection of adequate species for degraded areas by oil exploitation industry as a key factor for recovery forest in the Ecuadorian Amazon. *Land Degradation and Development*, 27, 1771 - 1780.

- Villacís, J. E., Cassanoves, F., Hang, S., & Keesstra, S. (2016). 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.
- Wong, M. T., & Swift, R. S. (2003). Role of organic matter in alleviating soil acidity. (M. Dekker, Ed.) *Handbook of soil acidity*, 337 - 358.
- Zagal, E., & Sadzawka, A. (2007). *Protocolo de métodos de análisis para Suelos y Lodos*. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.