



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA
AMAZONIA PERUANA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL
DE AGRONOMÍA**



**CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL SUELO
CON DIFERENTES EDADES DE REFORESTACIÓN EN EL
SUR OESTE DE LA AMAZONIA BRASILEIRA**

TESIS

Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Presentado por:

OMAR CUBAS ENCINAS

Bachiller en Ciencias Agronómicas

IQUITOS - PERÚ

2018



UNAP

**FACULTAD DE AGRONOMIA
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA**



ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 036-EFPA-FA-UNAP-2018

En Iquitos, a los 20 días del mes de Diciembre del 2018, a horas 10:00 am el Jurado designado por la Escuela de Formación Profesional de Agronomía, intergrado por los Señores Miembros que a continuación se indica:

Ing. RONALD YALTA VEGA, MSc.	Presidente
Ing. JOSE F. RAMIREZ CHUNG, MSc.	Miembro
Ing. ANGEL EDUARDO MAURY LAURA, Dr.	Miembro
Ing. JORGE AQUILES VARGAS FASABI, MSc.	Asesor

Se constituyeron en el Auditorio de la Facultad de Agronomía, para escuchar la sustentación de la Tesis titulada: **"CARACTERIZACION FISICA Y QUIMICA DEL SUELO CON DIFERENTES EDADES DE REFORESTACION EN EL SUR OESTE DE LA AMAZONIA BRASILEIRA."**, presentado por el Bachiller **OMAR CUBAS ENCINAS** para optar el Título Profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO** que otorga la Universidad de acuerdo a Ley y Estatuto.

Después de haber escuchado con atención y formulado las preguntas necesarias, las cuales fueron respondidas:

A Satisfacción


El Jurado después de las deliberaciones correspondientes en privado, llegó a las siguientes conclusiones:

La tesis ha sido Aprobada por Unanimitad
Siendo las 12:00 h se dio por terminado el acto Felicitando
al sustentante por su trabajo.


Ing. RONALD YALTA VEGA, MSc.
Presidente


Ing. JOSE F. RAMIREZ CHUNG, MSc
Miembro


Ing. ANGEL EDUARDO MAURY LAURA, Dr.
Miembro


Ing. JORGE AQUILES VARGAS FASABI, MSc.
Asesor

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONIA PERUANA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

Tesis aprobada en sustentación pública el día 20 de Setiembre del 2018, por el jurado ad-hoc nombrado por la Dirección de la Escuela de Formación Profesional de Agronomía, para optar el título profesional de:

INGENIERO AGRÓNOMO


JURADO:



Ing. RONALD YALTA VEGA, M. Sc.
Presidente



Ing. JOSÉ FRANCISCO RAMÍREZ CHUNG, M. Sc.
Miembro



Ing. ANGEL EDUARDO MAURY LAURA, Dr.
Miembro



Ing. JORGE AQUILES VARGAS FASABI, M. Sc.
Asesor



Ing. DARVIN NAVARRO TORRES, Dr.
Decano



DEDICATORIA

A mis padres Mario y Sonia con todo el amor y la gratitud del mundo por todo el apoyo incondicional en mi formación profesional, los sabios consejos durante todos estos años y por haberme traído a este mundo.

A mis queridos hermanos Christian, Sandro y David por haber compartido sus vidas y por estar presente en todas las situaciones posibles.

A mi compañera de muchas jornadas Johana Shulier por estar a mi lado derecho e izquierdo apoyándome a salir adelante y a forjar una familia digna y a mis amadas hijas Sonia Kasandra y Amira Kendra por ser el mayor regalo que Dios me dio y por hacer de sus vidas mi religión.

AGRADECIMIENTO

A Dios creador, por ser mi guía espiritual a lo largo de estos años.

A mis padres Mario y Sonia por ser mi fuente de superación, los amo desde el fondo de mi corazón.

A mi señora e hijas por la paciencia y el amor que me brindaron a lo largo de todos estos años, las amo con todas mis fuerzas.

A mis hermanos, cuñadas y sobrinos que participaron muy activamente durante mi proceso formación profesional y personal.

Al Ing. Mcs. Jorge Aquiles Vargas Fasabi por su valioso asesoramiento durante el desarrollo del trabajo de investigación.

A todos los profesores de la facultad de agronomía por el aporte de sus conocimientos en mi formación profesional.

Al Dr. Wenceslau Geraldtes Teixeira por el apoyo, oportunidad de trabajar a su lado y por su amistad.

A mis queridos amigos Rodrigo, Gilvan y Adriana por el constante apoyo en la recolección de muestras y por los gratos momentos de distracción.

A mis amigos del laboratorio de física de suelos Estevão y Taveira (in memoria), muchas gracias por todo.

A mí estimado amigo Tony Vizcarra Bentos por el apoyo para la realización de este trabajo de investigación.

A Embrapa Amazonia Occidental por la infraestructura concedida.

A la Rede CTPetro Amazônia y a las fuentes de financiamiento FINEP y PETROBRAS.

A todos mis amigos y colegas de la facultad de Agronomía de la UNAP por todos esos gratos momentos compartidos dentro y fuera del salón.

A todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron con la finalización de este trabajo.

ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO	4
ÍNDICE	6
INTRODUCCIÓN	12
CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1. PROBLEMA, HIPOTESIS Y VARIABLES.....	14
1.1.1. El problema	14
1.1.2. Hipótesis	15
1.1.3. Identificación de las variables.....	15
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.2.1. Objetivo general	16
1.2.2. Objetivos específicos	16
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	17
1.3.1. Justificación.....	17
1.3.2. Importancia	17
CAPITULO II. METODOLOGÍA	18
2.1. MATERIALES	18
2.1.1. Localización del área experimental.....	18
2.1.2. Clima	18
2.1.3. Vegetación	19
2.1.4. Suelo	20
2.1.5. Área en estudio	21
2.2. MÉTODOS	21
2.2.1. Diseño (parámetros de la investigación).....	21
2.2.2. Estadística	21
2.2.3. Conducción de la investigación	23
CAPITULO III. REVISIÓN DE LITERATURA	31
3.1. MARCO TEORICO.....	31
3.1.1. Actividad petrolera.....	31
3.1.2. El suelo	32
3.1.3. Caracterización de un suelo degradado	33

3.1.4. Formas de recuperación de áreas degradadas	35
3.2. MARCO CONCEPTUAL.....	37
CAPITULO IV. ANALISIS Y PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS	38
4.1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	38
4.1.1. La densidad del suelo en las áreas	38
4.1.2. La microporosidad del suelo en las áreas	43
4.1.3. La macroporosidad del suelo en las áreas	43
4.1.4. El volumen total de poros del suelo en las áreas	44
4.2. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO	45
4.2.1. El pH del suelo en las áreas.....	49
4.2.2. La materia orgánica del suelo en las áreas	50
4.2.3. El fósforo del suelo en las áreas	51
4.2.4. El potasio del suelo en las áreas.....	51
4.2.5. El calcio del suelo en las áreas	52
4.2.6. El magnesio del suelo en las áreas.....	54
4.2.7. El aluminio del suelo en las áreas.....	54
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y REMENDACIONES	56
5.1. CONCLUSIONES.....	56
5.2. RECOMENDACIONES	56
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	57
ANEXOS	65

ÍNDICE DE CUADROS

N° de cuadro	Pág.
1. Tratamientos en estudio	22
2. Componentes del análisis estadístico	23
3. Especies plantadas en las áreas reforestadas de la Base de Operaciones Geólogo Pedro de Moura (BOGPM).....	25
4. Análisis de variancia de las características físicas del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, en la profundidad de 0 – 10 cm.	38
5. Análisis Kruskal - Wallis de las características físicas del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, en la profundidad de 0 – 10 cm.	39
6. Cuadro de comparación de medias de la macroporosidad del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, a una profundidad de 0-10 cm.	40
7. Cuadro de comparación de medias de la densidad, microporosidad y del volumen total del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, a una profundidad de 0 – 10 cm.	41
8. Valores medios de las características físicas del suelo de áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, a una profundidad de 0 – 10 cm.	42
9. Análisis de variancia de las características químicas del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, en la profundidad de 0 – 10 cm.	45
10. Análisis Kruskal - Wallis de las características químicas del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, a una profundidad de 0 – 10 cm.	46
11. Cuadro de comparación de medias del pH, fosforo, potasio y aluminio del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, a una profundidad de 0 – 10 cm.	47

12. Cuadro de comparación de medias de la densidad, microporosidad y del volumen total del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, a una profundidad de 0 – 10	48
13. Valores medio de las características químicas del suelo de áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, a una profundidad de 0 – 10 cm.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

N° de figuras	Pág.
1. Localización de la Base de Operaciones Geólogo Pedro de Moura, Coari - Amazonas, Brasil (Fuente: Nascimento, 2009).....	18
2. Mapa de las principales clases de suelos de la Base de Operaciones Geólogo Pedro de Moura, Coari - Amazonas, Brasil. (1:100.000) (Fuente: Teixeira et al., 2009).	20
3. a) Retirada del bosque primario; b) Retirada de la camada superficial del suelo; c) Vivero de especies nativas de la región.	24
4. a) Esquema de reforestación y locales de muestreo de las características físicas; b) Esquema de muestreo para las características químicas; c) Esquema de muestra compuesta.....	27

ÍNDICE DE ANEXOS

N° de anexo	Pág.
Anexo 01. Datos originales de la densidad del suelo (g dm^{-3}) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.	66
Anexo 02. Datos originales de la microporosidad del suelo (%) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.	67
Anexo 03. Datos originales de la macroporosidad del suelo (%) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.	68
Anexo 04. Datos originales del volumen total de poros del suelo (%) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.	69
Anexo 05. Datos originales del pH del suelo de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.	70
Anexo 06. Datos originales de la materia orgánica del suelo (g kg^{-1}) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.	71
Anexo 07. Datos originales del fósforo del suelo (mg dm^{-3}) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.	72
Anexo 08. Datos originales del potasio del suelo (mg dm^{-3}) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.	73
Anexo 09. Datos originales del calcio del suelo ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.	74
Anexo 10. Datos originales del magnesio del suelo ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.	75

Anexo 11. Datos originales del aluminio del suelo ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.....	76
Anexo 12. Valores medios de la densidad del suelo (g dm^{-3}) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.....	77
Anexo 13. Valores medios de la microporosidad del suelo (%) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.....	77
Anexo 14. Valores medios de la macroporosidad del suelo (%) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.....	78
Anexo 15. Valores medios del volumen total de poros (%) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.....	78
Anexo 16. Valores medios del pH del suelo de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.....	79
Anexo 17. Valores medios de la materia orgánica del suelo de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.....	79
Anexo 18. Valores medios del fósforo del suelo de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.....	80
Anexo 19. Valores medios del potasio del suelo en la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.....	80
Anexo 20. Valores medios del calcio del suelo en la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.....	81
Anexo 21. Valores medios del magnesio del suelo en la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.....	81
Anexo 22. Valores medios del aluminio del suelo en la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.....	82

INTRODUCCIÓN

La implantación de actividades petroleras, viene modificando la cobertura vegetal original de algunas áreas de la Amazonia brasilera. Ecosistemas naturales, como el bosque amazónico, vienen perdiendo sus características originales y cediendo lugar para esas actividades.

En la región sur oeste de la Amazonia brasilera se localiza la Base de Operaciones Geólogo Pedro de Moura – BOGPM (PETROBRAS BR®), en las orillas del rio Urucu, Distrito de Coari, estado de Amazonas, Brasil. En esta localidad, la PETROBRAS realiza abertura del bosque primario y la retirada de la camada superficial del suelo para la prospección y explotación de petróleo y gas natural (Moreira y Consta, 2004). Como consecuencia de estas actividades, la vegetación y los horizontes superficiales del suelo son retirados, exponiendo los horizontes sub superficiales en la superficie y sobre el efecto de la acción directa de los factores climáticos. Esta exposición propicia la alteración de las características físicas y químicas del suelo, y consecuentemente su degradación por la erosión hídrica (Arruda, 2005; Teixeira et al., 2006).

La mayoría de las veces, los suelos de las áreas degradadas presentan niveles bajos de nutrientes y con características fisicoquímicas diferenciadas, cuando comparadas al suelo original (Moreira y Costa, 2004). El desarrollo de un nuevo horizonte superficial es un proceso complejo y lento, pero crucial para la reducción de los procesos erosivos y el restablecimiento de la vegetación y fauna el suelo (Teixeira et al., 2007). La recomposición de los niveles de materia orgánica es una e importante meta que se busca en la restauración ecológica.

La plantación de especies arbóreas es una técnica para aliar adición de materia orgánica con el desarrollo de sucesión secundaria, y así restaurar la fertilidad del suelo en áreas degradadas (Parrotta, 1992). La recuperación del suelo y la recomposición florística de estas áreas son desafíos que viene motivando varios grupos de investigadores a proponer intervenciones y monitorear los procesos de restauración forestal (Arruda, 2005; Nascimento, 2009). En ese sentido, estas áreas fueron reforestadas con especies nativas con el objetivo de recuperar la condición original del suelo para evitar procesos de degradación e impacto al medio ambiente. Entretanto, uno de los mayores desafíos de la reforestación de estas áreas, es devolver a estos horizontes sub superficiales del suelo características físicas y químicas suficientes para garantizar el establecimiento y el desarrollo de la vegetación y retornar estos ambientes a su condición original, dando inicio de esta forma, al restablecimiento de los procesos ecológicos. En ese sentido, el estudio de las características físicas y químicas de la camada superficial del suelo nos permite cuantificar la magnitud de las alteraciones provocadas por diferentes sistemas de manejo. Por ser sensibles, esas características son importantes para establecer si hubo degradación o mejoría de la calidad del suelo en relación a un determinado sistema de manejo.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. PROBLEMA, HIPÓTESIS Y VARIABLES

1.1.1. El problema

La PETROBRAS en la región sur oeste de la Amazonia propicia la abertura de bosque primario y la retirada de tierra para la prospección y explotación de petróleo y gas natural. Como consecuencia de estas actividades, la vegetación y los horizontes superficiales del suelo son retirados, dejando los horizontes sub superficiales expuestos en la superficie y sobre el efecto de la acción directa de los factores climáticos, alterando las características físicas y químicas del suelo, y consecuentemente su degradación.

El uso de especies nativas para la recuperación de estas áreas es una de las formas que vienen siendo utilizadas para devolver características físicas y químicas suficientes al suelo para garantizar el establecimiento y el desarrollo de la vegetación, retornando estos ambientes a su condición original, dando inicio de esta forma al restablecimiento de los procesos ecológicos. Entretanto, el desarrollo de un nuevo horizonte superficial es complejo y lento. En ese sentido, monitorear las características físicas y químicas del suelo de áreas reforestadas son de extrema importancia, pues a través de ella podríamos realizar intervenciones en el proceso de restauración forestal. Por lo que consideramos importante determinar.

¿En qué medida las características físicas y químicas de la camada superficial del suelo de áreas alteradas por actividad humana son influenciadas por diferentes edades de reforestación en el sur oeste de la amazonia brasilera?

1.1.2. Hipótesis

a) General

Las diferentes edades de reforestación con especies nativas en el área de estudio contribuyen para la mejora de las características físicas y químicas del suelo.

b) Especifica

- Una de las tres edades de reforestación influye significativamente en las características físicas del suelo.
- Una de las tres edades de reforestación influye significativamente en las características químicas del suelo.

1.1.3. Identificación de las variables

➤ Variable independiente

Edad de reforestación (Factor R)

R1 = 6 años

R2 = 9 años

R3 = 14 años

➤ **Variable dependiente**

Características físicas del suelo (Factor F)

F1 = densidad del suelo (Ds) en g dm^{-3}

F2 = volumen total de poros (VTP) en %

F3 = macro poros (Ma) en %

F4 = micro poros (Mi) en %

Características químicas del suelo (Factor Q):

Q1 = pe hache (pH)

Q2 = materia orgánica (g kg^{-1})

Q3 = fosforo (P) en mg dm^{-3}

Q4 = potasio (K) en mg dm^{-3}

Q5 = calcio (Ca) en $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$

Q6 = magnesio (Mg) en $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$

Q7 = aluminio (Al) en $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$

1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. Objetivo General

Evaluar las características físicas y químicas del suelo en áreas con diferentes edades de reforestación y en bosque primario en la Base de Operaciones Geólogo Pedro de Moura.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar algunas propiedades físicas de la camada superficial del suelo en áreas con diferentes edades de reforestación y bosque primario.

- Determinar algunas propiedades químicas de la camada superficial del suelo en áreas con diferentes edades de reforestación y bosque primario.

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

1.3.1. Justificación

El presente trabajo de investigación fue realizado porque a través de las evaluaciones de las características físicas y químicas del suelo decurrentes de impactos de actividades humanas en ecosistemas naturales pueden constituir importante instrumento para auxiliar en el monitoriamiento de la conservación ambiental, una vez que, permiten caracterizar la situación actual, alertar para situaciones de riesgo y, por veces, prevenir situaciones futuras, especialmente cuando adoptada como referencia la vegetación nativa original.

1.3.2. Importancia

Monitorear las características físicas y químicas del suelo, se vuelven de suma importancia porque contribuyen para un mejor entendimiento de los ecosistemas terrestres y para la adopción de medidas que nos permitan recuperar áreas consideradas alteradas, además, por ser indicadores de fácil y rápido diagnostico cuando comparadas con la condición natural.

CAPITULO II

METODOLOGÍA

2.1. MATERIALES

2.1.1. Localización del área experimental

Este trabajo fue realizado en la Base de Operaciones Geólogo Pedro de Moura (BOGPM), ubicado a 660 km de la ciudad de Manaus, Brasil. Localizado en las coordenadas geográficas ($4^{\circ}53'7,33''$ LS; $65^{\circ}20'59,99''$ LW), distrito de Coari, Estado de Amazonas (Figura 1).

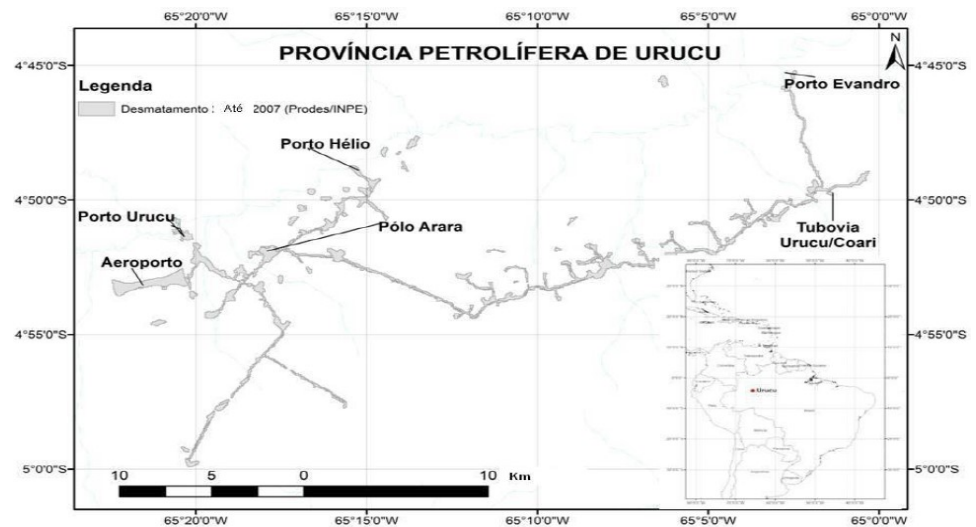


Figura 1. Localización de la Base de Operaciones Geólogo Pedro de Moura, Coari - Amazonas, Brasil (Fuente: Nascimento, 2009).

2.1.2. Clima

El clima del área de estudio es considerado como tropical húmedo, tipo Afi, por la clasificación de Köppen, presentando ciclos estacionarios de distribución de la precipitación bien característico,

alternando una estación seca de junio a noviembre y una estación lluviosa de diciembre a mayo. El promedio anual de precipitación es de 2.239 mm, con 66.1% distribuidas en la estación lluviosa y 33.9% en la estación seca. Las temperaturas medias varían de 25.2 a 26,2 C al año (Arruda, 2005; Prudente et al., 2010).

2.1.3. Vegetación

La vegetación del área de estudio es caracterizada por poseer bosques altos y densos de tierras altas denominados por Pires (1973) como bosques de tierras altas. Esta tipología forestal posee diversas variantes de pequeñas comunidades vegetales, presenta gran diversidad de especies leñosas y arbustivas, habiendo algunas especies que son exclusivas de determinados hábitats. La altura de los árboles está entre 20 y 30 m y la mayoría tiene diámetro a la altura del pecho (DAP) entre 10 y 30 cm (Prance, 1987).

Esta tipología forestal posee diversas variantes de pequeñas comunidades vegetales, destacándose las comunidades de altura, pendiente y bajial. Presentando gran diversidad de especies leñosas, habiendo algunas especies que son exclusivas de determinados hábitat. La altura de los árboles está entre 20 a 30 m y la mayoría tienen diámetro en la altura del pecho (DAP) entre 10 y 30 cm. Dentro de las especies más abundantes están la *Eschweilera coriácea*, *Eschweilera wachenheim*, *Microphollis guyanensis*, *Oenocarpus bataua* e *Chrysophllum sanguinolentum* (Amaral, 1996).

2.1.5. Área en estudio

Las áreas en estudio forman parte del complejo petrolífero de la Base de Operaciones Geólogo Pedro de Moura (BOGPM), explotada por la PETROBRAS en el sur oeste de la Amazonia brasilera, localizadas en áreas de bosque primario.

2.2. MÉTODOS

2.2.1. Diseño (parámetros de la investigación)

- N° de repeticiones/tratamiento : 15
- N° de tratamientos : 04
- De la parcela:
 - N° total de parcelas : 60
 - Largo de la parcela : 100 m
 - Ancho de la parcela : 100 m
 - Área de la parcela : 10,000 m² aprox.

2.2.2. Estadística

a. Tratamientos en estudio

Los tratamientos en estudio para la presente investigación fueron tres diferentes edades de reforestación (6, 9 y 14 años) sobre las características físicas y químicas del suelo en áreas de explotación petrolera y un testigo en áreas de bosque primario en la base de operaciones Geólogo Pedro de Moura. Los tratamientos pueden ser observados en el cuadro 1.

Cuadro 1. Tratamientos en estudio

TRATAMIENTOS		TRATAMIENTO
Nº	CLAVE	
01	T1	6 años de reforestado
02	T2	9 años de reforestado
03	T3	14 años de reforestado
04	T4	Testigo (bosque primario)

b. Diseño experimental

Para cumplir con los objetivos planteados, se utilizó el Diseño Completo al Azar (DCA), con cuatro (04) tratamientos y quince (15) repeticiones.

c. Análisis de variancia (ANVA)

Los resultados del estudio de las características físicas y químicas del suelo de las áreas reforestadas y del bosque primario, fueron sometidos a un análisis de normalidad y homogeneidad. Las características físicas y químicas que presentaron normalidad y homogeneidad fueron sometidas al análisis de variancia. Las fuentes de variabilidad pueden ser observadas en el cuadro 2. Aquellas características físicas y químicas del suelo que no presentaron normalidad y homogeneidad, fueron sometidas a un análisis de Kruskal-Wallis.

Cuando el análisis de variancia dio significativo, se realizaron pruebas de comparación de medias Tukey ($p < 0,05$) para detectar diferencia estadística significativas entre los tratamientos. Todos

los análisis estadísticos fueron realizados por medio del software R (R Core Team, 2015).

Cuadro 2. Componentes del análisis estadístico

Fuente de variabilidad	Grados de Libertad
Tratamientos	$(T-1) = 4 - 1 = 3$
Error	$T(r-1) = 4(15-1) = 56$
TOTAL	$t.r - 1 = (4 \times 15) - 1 = 59$

2.2.3. Conducción de la investigación

En la BOGPM se seleccionaron 9 áreas de 1 ha aproximadamente cada uno, con diferentes edades de reforestación. Estas áreas fueron clasificadas en tres grupos (6, 9 y 14 años), con tres repeticiones cada una. Dentro de cada una de estas repeticiones se colectaron 5 muestras de suelo con estructura deformada e indeformada en la profundidad de 0 – 10 cm de profundidad, totalizando 15 repeticiones por tratamiento. Conjuntamente, 3 áreas de bosque primario (testigo) próximo de las áreas reforestadas también fueron seleccionadas para obtener los valores de referencia de los parámetros en estudio. En el bosque primario, también se colectaron las 5 muestras en las tres áreas, haciendo un total de 15 repeticiones.

a. Historial de las áreas seleccionadas

Las áreas seleccionadas para el estudio forman parte del complejo de claros que fueron abiertos para su explotación por la PETROBRAS. Se dio inicio con la derribada del bosque primario, utilizando motosierras, tractores forestales y retirándose todo el

material vegetal, dejando expuesto el suelo. Seguidamente, fueron retiradas las capas superficiales del suelo (Figura 3a), con el objetivo de hacer prospección y explotación de petróleo y gas natural. Estas actividades fueron realizadas utilizando cargadores frontales, excavadores y volquetes (Figura 3b). Cuando la prospección no fue exitosa, estas áreas fueron reforestadas con especies nativas de la región, que fueron producidas en la BOGPM por la empresa CONSPIZA (Figura 3c).

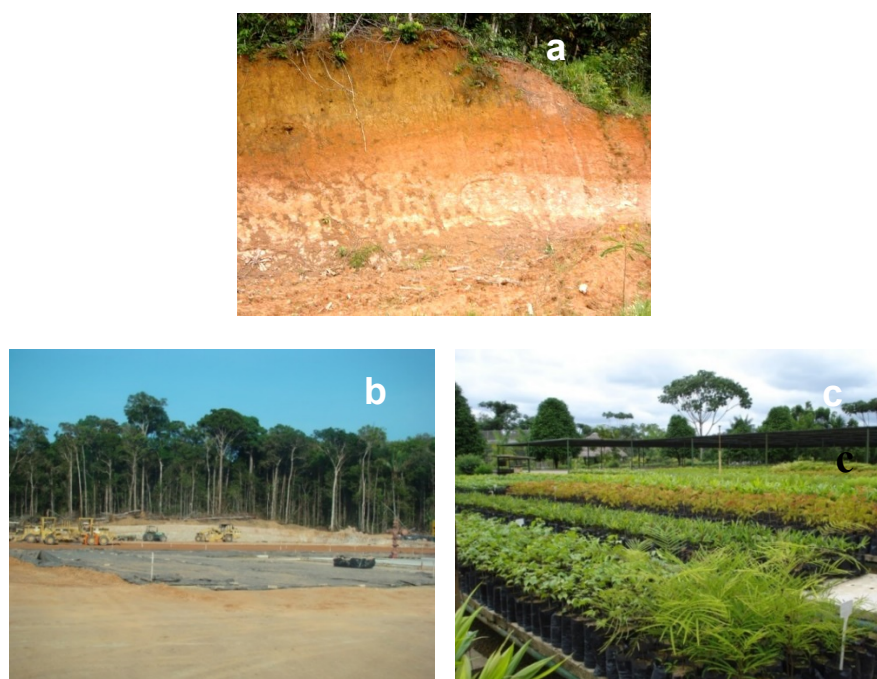


Figura 3. a) Retirada del bosque primario; b) Retirada de la camada superficial del suelo; c) Vivero de especies nativas de la región.

Las especies sembradas en las áreas reforestadas pueden ser observadas en el cuadro 3.

Cuadro 3. Especies plantadas en las áreas reforestadas de la Base de Operaciones Geólogo Pedro de Moura (BOGPM).

Especies plantadas en todas las áreas		
Nombre común	Familia	Nombre científico
Lacre (Pichirina colorada)	Hypericaceae	<i>Vismia guinensis</i>
Ingá (Guaba)	Fabaceae	<i>Inga edulis</i> Mart.
Angelim pedra (x)	Fabaceae	<i>Dinizia excelsa</i>
Goiaba-de-anta (Nispero)	Melastomataceae	<i>Bellucia dichotoma</i> Triana
Jamelão	Myrtaceae	<i>Eugenia cumini</i> (L.) Druce
Sucuúba (Bellaco caspi)	Apocynaceae	<i>Himantanthus sucuuba</i>
Embaúba (Cetico blanco)	Urticaceae	<i>Cecropia ficifolia</i> Smeth
Angico	Fabaceae	<i>Abarema piresii</i>
Embaubão (Cetico colorado)	Urticaceae	<i>Cecropia sciadophylla</i> Mart
Sapota (Quinilla)	Sapotaceae	<i>Chrysophyllum</i>

Fuente: Conspizza Soluções Ambientais Ltda.

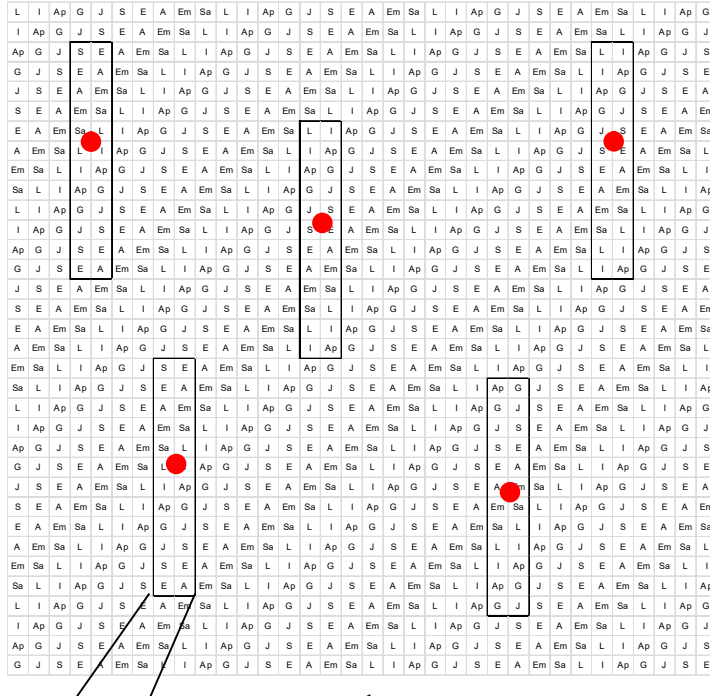
b. Actividades realizadas en la reforestación

Los plántones fueron llevados a campo definitivo cuando alcanzaron una altura de 50 cm para ser trasplantados con el inicio del periodo lluvioso (Noviembre), a un distanciamiento de 3 x 3 y de acuerdo con el esquema 1a, haciendo un total de 1.156 plantas/ha. Los hoyos para la instalación de los plántones fueron de 40x40x40 cm de largo, ancho y profundidad, respectivamente. Dentro de los hoyos fueron aplicados 2 kg de compuesto orgánico, proveniente de la usina de tratamiento de residuos sólidos de la BOGPM, cuya composición química promedio fue la siguiente: 38 mg kg⁻¹ de Cu, 158 mg kg⁻¹ de Fe, 60 mg kg⁻¹ de Mn e 110 mg kg⁻¹ de Zn (Uchoa et al., 2006). Vale la pena resaltar que todas estas actividades fueron realizadas en el momento del trasplante de cada área (año 1996, 2001 y 2004), y el muestreo de suelos fue realizado en el 2010.

c. Técnicas de muestreo

Para determinar las características físicas del suelo, en cada área fueron colectadas cinco muestras de suelo con estructura indeformada en cilindros metálicos de 100 cm³ en la profundidad de 0 – 10 cm (puntos rojos del esquema 1a). Seguidamente, se procedió a colectar cinco muestras compuestas de suelo con estructura deformada utilizando un saca bocado en la misma profundidad y próximos de los puntos de colecta anteriores, con la finalidad de determinar las características químicas del suelo. El muestreo fue realizado en las entre líneas de las plantas y en sig sag, como muestra el esquema 1b. Cada una de estas muestras está constituida de cinco sub muestras de 0,5 kg que fueron mezcladas en baldes para obtener una muestra compuesta de 1 kg, como muestra el esquema 1c.

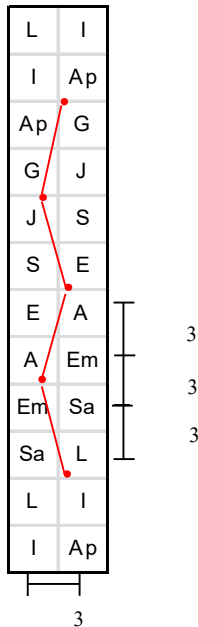
Esquema 1a



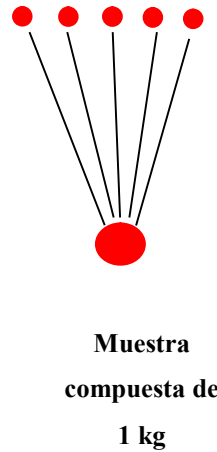
100 m

Especie	Leyenda	Plantas/hectarea
Lacre	L	115
Ingá	I	116
Angelim pedra	Ap	117
Goiaba-de- Anta	G	118
Jamelão	J	117
Sucuúba	S	116
Embaúba	E	115
Angico	A	114
Embaubão	Em	114
Sapota	As	114
TOTAL		1156

Esquema 1b



Esquema 1c



Sub muestra
de ½ kg

Figura 4. a) Esquema de reforestación y locales de muestreo de las características físicas; b) Esquema de muestreo para las características químicas; c) Esquema de muestra compuesta.

d. Procedimientos y análisis de laboratorio

Las muestras fueron identificadas y llevadas al laboratorio de suelos y plantas de la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (LASP - EMBRAPA CPAA) para preparación y análisis correspondiente. Los procedimientos analíticos utilizados son descritos a seguir:

- Análisis físico

Las muestras indeformadas colectadas en cilindros de 100 cm³ fueron utilizadas para determinar los valores de densidad del suelo (Ds), Macroporosidad (Ma), Microporosidad (Mi) y el Volumen total de poros (VTP).

Para estimar la Ds fue utilizado el método del anillo volumétrico de acuerdo con la metodología descrita en EMBRAPA (2016). Las muestras colectadas fueron preparadas retirándose el exceso del suelo, de manera que el suelo muestreado ocupase solamente el volumen interno del cilindro. En seguida, una tela permeable fue colocada en el fondo de los cilindros de manera que la misma permitiese el flujo de agua/aire e impidiese la pérdida del suelo. Después de realizar este procedimiento, los cilindros fueron saturados con agua en una bandeja por medio de la elevación gradual de una lámina de agua y dejadas en reposo por un período de 24 horas. Posteriormente, fueron colocados en una mesa de tensión para determinar la humedad volumétrica a una tensión de 1,8 pF ($pF = \log_{10} \text{ cm de H}_2\text{O}$). Detalles metodológicos están descritos en Klute y Dirksen

(1986). Seguidamente, las muestras fueron llevadas a un horno y secadas a 105 °C por 24 horas para determinar el contenido de la masa del suelo seco y así obtener la D_s conforme Blake y Hartge (1986). La D_s fue determinada por medio de la siguiente expresión:

$$D_s = \left[\frac{mss}{v} \right] \quad \text{Equação 1}$$

En que: D_s = densidad del suelo (g dm^{-3}); mss = masa del suelo seco a 105 °C (g); v = volumen del cilindro (dm^3)

El volumen total de poros (VTP) fue calculado a partir de los valores de D_s y de la densidad de partículas del suelo (para la densidad de partícula fue considerado el valor de $2,65 \text{ g dm}^{-3}$).

El VTP fue determinado por medio de la siguiente expresión:

$$VTP = [1 - (D_s/D_p)] * 100 \quad \text{Equação 2}$$

En que: VTP = volumen total de poros ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); D_p = densidad de partículas (g dm^{-3}).

La microporosidad fue calculada por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Microporosidad (\%)} = 100 * \frac{(\theta_{pF 1,8} - mss)}{(mss - p_{cil} - \text{tela} + \text{liga})} \quad \text{Equação 3}$$

En que: $\theta_{pF 1,8}$ = humedad volumétrica (m^3); mss = masa del suelo seco a 105 °C (g); p_{cil} = peso del cilindro (g); $\text{tela} + \text{liga}$ = peso de la tela y liga colocada en el fondo del cilindro.

La macroporosidad fue calculada por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Macroporosidade} = \text{VTP} - \text{microporosidade} * 100 \quad \text{Equação 4}$$

- Análisis químico

Las muestras deformadas para análisis química, fueron secadas en una estufa de madera protegida con techo de plástico y ventilada por cuatro días, seguidamente fueron desterronadas y tamizadas, obteniéndose la fracción con diámetro menor que 2 mm, denominada Tierra Fina Seca al Aire (TFSA).

Los análisis químicos realizados fueron los siguientes: pH (en agua – relación 1-2.5 v/v); aluminio cambiante (Al^{3+}) extraído con solución de KCl 1 mol^{-1} y cuantificado por titulometría con solución NaOH $0,025 \text{ mol L}^{-1}$; fósforo disponible (P) por el extractor Mehlich-1 y cuantificado espectrofotométricamente por medio de la lectura de la intensidad del color del complejo fosfomolibdico producido por la reducción del molibdato de amonio con ácido ascórbico.

Calcio y magnesio (Ca^{2+} e Mg^{2+}) fueron extraídos con solución KCl 1 mol^{-1} y cuantificado por titulometría por el método complexométrico; potasio (K^+) extraído con solución HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ y cuantificado por fotometría de llama; materia orgánica fue determinado por el método de Walkley-Black. Detalles metodológicos están descritos en Embrapa (2016).

CAPITULO III

REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. MARCO TEÓRICO

3.1.1. Actividad petrolera

La retirada del bosque primario y de toda la capa superficial del suelo por la actividad petrolera produce diversos claros en el bosque de difícil recuperación natural o de forma muy lenta hasta formar una vegetación pionera (Dubois et al., 1996).

La retirada del bosque altera la calidad y la cantidad de materia orgánica del suelo. Consecuentemente hay una disminución de la biomasa microbiana, principal responsable por el ciclo de nutrientes y por el flujo de energía dentro del suelo (Dalal, 1998), la misma que ejerce influencia tanto en la transformación de la materia orgánica como en el estoque del carbón y minerales. Los efectos de las perturbaciones en las propiedades del suelo interfieren en la capacidad de regenerar el bosque o así mismo en la introducción de otras plantas.

Las áreas degradadas generalmente presentan alteraciones químicas en el suelo que influyen en su calidad productiva como la baja disponibilidad de nutrientes en el suelo, alteraciones en el pH y conductividad eléctrica, que perjudican la actividad biológica y, consecuentemente, el crecimiento de los vegetales. Las alteraciones

físicas que ocurren en áreas degradadas están principalmente relacionadas a la estructura, a la densidad y a la capacidad de retención de humedad del suelo, perjudicando, así, el almacenamiento y transporte de agua y nutrientes para las plantas. Tales alteraciones negativas de los atributos químicos y físicos del suelo afectan las poblaciones de los organismos edáficos, los cuales son responsables por la mineralización y reposición de nutrientes disponibilizados a las plantas (Doran y Parkin, 1994). En conjunto, estas alteraciones perjudican la capacidad productiva de un área degradada.

3.1.2. El suelo

El suelo es un recurso natural importante en el desarrollo de las actividades humanas y como tal debe ser utilizado de forma consiente, a fin de evitar su degradación y minimizar los posibles impactos causados al ambiente en el desarrollo de las actividades, ya es considerado como una colección de cuerpos naturales, constituidos por partes sólidas, líquidas y gaseosas, tridimensionales, dinámicos, formados por materiales minerales y orgánicos, que ocupan la mayor parte del manto superficial de las extensiones continentales del planeta. Ocasionalmente pueden haber sido modificados por actividades humanas (Embrapa, 2015). Las definiciones de suelo presentan aspectos comunes cuanto, a su formación y su función, pudiendo ser considerado como recurso

renovable, desde que sea utilizado y conservado de manera adecuada y apropiada después de ser evaluado sus características.

Al realizarse una lectura, con base en el estudio de los suelos, se deben evaluar relaciones existentes entre los factores de formación del suelo, las funciones del suelo y sus características. La evaluación y cuantificación de sus atributos pueden auxiliar en el entendimiento de su funcionalidad y capacidad productiva dentro de un ambiente, y así definir si ocurrió la manutención, ganancia o pérdida de su calidad.

El estudio del suelo está unido al desarrollo de la vida humana, que hasta hace poco tiempo era clasificado como un sistema estático, compuesto por elementos minerales, orgánicos y algunos organismos. Entretanto, el suelo es un recurso natural resultado de un conjunto de alteraciones y procesos que actúan sobre un material de origen (roca o sedimentos) aliado a una función de combinación de los factores del clima, relevo, organismos e del tiempo. Para Resende et al. (2002), es importante conocer siempre al respecto del suelo, porque ocupa una posición peculiar ligada a las varias esferas que afectan la vida humana.

3.1.3. Caracterización de un suelo degradado

La caracterización del grado de degradación del suelo es de difícil percepción en determinadas situaciones, pues los suelos pueden estar en proceso de degradación sin consecuencias visuales claras y

bien caracterizadas. Los procesos de degradación del suelo se clasifican en físicos, químicos y biológicos, (Lal, 1997).

Los procesos físicos envuelven la estructura del suelo, la forma de costras, la erosión, la compactación y la anaerobiosis, entre otros ítems. Los procesos químicos incluyen la acidificación, lixiviación, salinización, reducción en la CIC y pérdida de la fertilidad. Los procesos biológicos se refieren al total de carbono orgánico y de biomasa y a la biodiversidad de la flore y fauna edáfica (Lal, 1997).

Dias y Griffith (1998), definen calidad de un suelo como su capacidad de mantener el crecimiento de plantas, incluyendo factores como agregación, contenido de materia orgánica, profundidad, capacidad de retención de agua, tasa de infiltración, capacidad tampón de pH y disponibilidad de nutrientes. Una definición más holística se refiere a la capacidad de un suelo funcionar como ecosistema límite para sustentar la productividad biológica y mantener la salud de plantas y animales (Doran y Parkin, 1994).

Suelos degradados por actividades antrópicas generalmente presentan alteraciones de las características físicas originales, tal como la remoción de los horizontes superficiales, que acarrearán la exposición de materiales poco estructurados y susceptibles a la fragmentación debido a la ausencia de materia orgánica, un agente cementante de las partículas para la formación de los agregados del suelo (Dias, 1998).

Los métodos de preparación y manejo del suelo afectan el uso sustentable de sus recursos, perjudicando su estabilidad, resiliencia y calidad. La estabilidad se refiere a su susceptibilidad del suelo a los cambios por perturbaciones naturales o antrópicas. La resiliencia es la capacidad del suelo para restaurar sus procesos de soporte a la vida después de ser perturbado. El término calidad se refiere a la capacidad del suelo para realizar sus tres funciones principales: productividad económica, regulación del medio ambiente y actuación estética y cultural (Lal, 1997).

La definición y la cuantificación de la calidad del suelo son difíciles de caracterizar por el hecho de que no es directamente consumido por el hombre y animales (Bianchi, 2009). La calidad del suelo es evaluada a través de indicadores físicos, químicos y biológicos, que son atributos que miden o reflejan el estado ambiental o la condición de sustentabilidad del ecosistema (Araújo y Monteiro, 2007).

3.1.4. Formas de recuperación de áreas degradadas

Una de las formas más antiguas de recuperar un bosque es la regeneración natural. Todas las especies arbóreas poseen, en mayor o menor grado, mecanismos de perpetuación natural, relacionados con el ambiente en que la especie evoluciona (Seitz y Jankovski, 1998). Según Rodrigues (1999), El potencial de regeneración de las especies en un sitio es variable en el espacio y el tiempo, pudiendo ocurrir la restauración parcial o total de la vegetación.

La regeneración natural de la vegetación ocurre por medio del banco de semillas en el suelo, constituido de semillas, rebrote de raíces y troncos, entre otras formas de propagación, a través de un lento proceso direccional y continuo de colonización y sustitución de especies. A la falta de semillas, hay la alternativa de su restablecimiento artificial, pudiendo presentar resultados favorables para algunas especies y en incipientes regeneraciones para otras (Barnet y Baker, 1991).

Según Soane y Ouwerkerk (1994), el manejo del suelo puede provocar compactación en los atributos físicos, tales como aumento de la densidad y la resistencia a la penetración, y reducción de la porosidad y permeabilidad, siendo importante el monitoreo de estas características a lo largo del tiempo de uso del suelo.

Las principales acciones para que las áreas degradadas puedan volver a ser productivas consisten en el desarrollo y establecimiento de sistemas de manejo del suelo seguido de la vegetación local de manera inclusive, a propiciar el retorno de la fauna, en especial polinizador y dispersor. Gomes-Pompa y Wiechers (1979), apuntan los estudios sobre suelos como punto relevante para la regeneración de los ecosistemas tropicales y subtropicales, debiendo ser considerados para el mejor entendimiento y planeamiento de los procesos ecológicos.

En este contexto, para una eficiente recomposición de la vegetación y desarrollo de nuevas tecnologías y formas de manejo para la

recuperación de áreas degradadas, es necesaria la identificación de investigaciones que contemplen, entre otras líneas, la interacción de los conocimientos sobre la física, química y microbiología del suelo y el ciclo de los nutrientes.

3.2. MARCO CONCEPTUAL

Área degradada: Toda área que, por acción natural o del hombre, tuvo sus características originales alteradas más allá de su límite de recuperación natural.

Deforestación: Es un proceso provocado generalmente por acción humana, en el que se destruye la superficie forestal.

Reforestación: Es una operación en el ámbito de la silvicultura destinada a repoblar zonas que en el pasado histórico reciente (se suelen contabilizar 50 años) estaban cubiertas de bosques que han sido eliminados por diversos motivos.

CAPITULO IV
ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

4.1.1. La densidad del suelo en las áreas

En el cuadro 04, son presentados los resultados del análisis de variancia de la característica física del suelo (macroporos) de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario que presentaron normalidad y homogeneidad. En ella podemos observar que existe diferencia estadística significativa entre los tratamientos. Estos resultados evidencian que la variable fue influenciada por al menos uno de los tratamientos.

Cuadro 04. Análisis de variancia de las características físicas del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, en la profundidad de 0 – 10 cm.

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fc.	Valor - p (0.05)
MACROPOROS (Ma)					
Tratamientos	3	344.9	114.9	8.6	8.39 ⁻⁵ ***
Error	56	745.6	13.32		
Total	59	1090.			

*significativo $\alpha = 0,05$

Seguidamente, son presentados en el cuadro 05 los resultados del análisis de variancia de las características físicas del suelo (Densidad, Microporos y Volumen total de poros) de las áreas con diferentes reforestaciones y del bosque primario que no presentaron normalidad y homogeneidad.

En ella podemos observar que existe diferencia estadística significativa entre los tratamientos. Estos resultados también evidencian que la variable fue influenciada por al menos uno de los tratamientos.

Cuadro 05. Análisis Kruskal - Wallis de las características físicas del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, en la profundidad de 0 – 10 cm.

Tratamiento.	N	Medias	Medianas	H	Valor p (0.05)
DENSIDAD					
T1	15	1.31	1.30	35.55	1.23 ^{-8***}
T2	15	1.21	1.20		
T3	15	1.19	1.20		
T4	15	0.83	0.90		
MICROPOROS					
T1	15	30.85	31.70	41.59	4.87 ^{-9***}
T2	15	33.81	34.10		
T3	15	27.53	28.00		
T4	15	51.89	52.00		
VOLUMEN TOTAL DE POROS					
T1	15	50.20	51.70	34.25	1.74 ^{-7***}
T2	15	50.16	49.90		
T3	15	49.71	50.00		
T4	15	68.36	67.00		

*significativo $\alpha = 0,05$

Al realizar la prueba de comparación de medias Tukey ($p < 0,05$) entre los tratamientos para la macroporosidad del suelo en la camada de 0 – 10 cm de profundidad, se observa que estas características físicas no presentan diferencia estadística significativa entre el BP y las áreas reforestadas (Cuadro 06).

Cuadro 06. Cuadro de comparación de medias de la macroporosidad del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, a una profundidad de 0-10 cm.

Tratamientos	Promedios	Macroporos		
T1	19.3	A		
T2	16.3		AB	
T3	22.1			AC
T4	16.4			ABD

Medias seguidas por letras iguales en cada columna no difieren entre sí por la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Contrariamente, en el caso de la densidad del suelo, microporosidad y el volumen total de poros, se observa que todos los tratamientos presentan diferencia significativa con el bosque primario (Cuadro 07). En el caso de las áreas reforestadas, no se observa diferencias significativas para la densidad del suelo y el volumen total de poros. Entretanto, los tratamientos T1 y T2 presentan diferencia significativa para los microporos con el tratamiento T3 (Cuadro 07).

Cuadro 07. Cuadro de comparación de medias de la densidad, microporosidad y del volumen total del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, a una profundidad de 0 – 10 cm.

Tratamiento	Ranquin	Densidad	
T4	8.00	A	
T3	33.23		B
T2	37.77		B
T1	43.00		B
		Microporos	
T3	13.57	A	
T1	23.10	A	B
T2	32.47		B
T4	52.87		C
		Volumen total de poros	
T2	20.90	A	
T3	21.33	A	
T1	26.77	A	
T4	53.00		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Analizando los resultados de las características físicas del suelo, en el cuadro 08 se observa que la menor D_s fue verificada en el área de BP (0.82 g dm^{-3}), en cuanto el tratamiento de 6 años mostró el mayor valor (1.31 g dm^{-3}). Según Souza et al. (2009), estos elevados valores de D_s en las áreas reforestadas son el resultado de diferentes prácticas de manejo y principalmente de diferentes profundidades de excavación en esas áreas, que exponen en la superficie del terreno los horizontes originalmente superficiales (horizontes B y C) que presentan compacidad natural.

Cuadro 08. Valores medios de las características físicas del suelo de áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, a una profundidad de 0 – 10 cm.

Tratamientos	Características físicas			
	Ds	Mi	Ma	VTP
	g dm ⁻³	----- % -----		
6 años	1.31	30.8	19.3	50.2
9 años	1.30	33.8	16.3	50.1
14 años	1.18	27.5	22.1	49.7
BP	0.82	51.9	16.4	68.3

BP: Bosque primario; Ds: densidad del suelo; Mi: microporos; Ma: macroporos; VTP: volumen total de poros.

Los resultados de la Ds también presentan una tendencia a disminuir conforme pasan los años de reforestación (Cuadro 08), indicando una lenta recuperación y aproximándose de su condición original. Estos resultados, probablemente estarían relacionados al efecto que provoca la materia orgánica en el suelo, toda vez que cuanto menor cantidad, hay una mayor Ds y viceversa (Marcolin, 2006). Esto nos permite inferir que, en el área de 6 años, la Ds fue mayor debido a la menor cantidad de materia orgánica presente en esta área (Cuadro 13).

4.1.2. La microporosidad del suelo en las áreas

En el caso de los microporos (Mi), se observa que hubo diferencia estadística significativa entre las áreas reforestadas de 6 con la de 9 y la de 9 con la de 14 años (Cuadro 07). Entretanto, el mayor valor fue observado en el BP, con 51.9%, seguido con mucha diferencia por el área de 9, 6 y 14 años, con 33.8, 30.8 y 27.5%, respectivamente (Cuadro 08). En estudios realizados en áreas próximas de este estudio, Souza et al., (2010) reportan valores de Mi próximos a los encontrados en este estudio, mientras que Bertol et al., (2004), en su estudio sobre propiedades físicas del suelo sobre diferentes manejos, reporta valores superiores para los primeros 10 cm del suelo.

Vale la pena resaltar que aun habiendo diferencia estadística de los Mi entre las áreas reforestadas, los valores son muy próximos, lo que nos permite inferir que no hubo influencia de las edades de reforestación, debido a que no muestran una tendencia clara en relación al BP.

4.1.3. La macroporosidad del suelo en las áreas

En lo que respecta a los macroporos (Ma), podemos observar que el área de 6 años no presenta diferencia significativa con ninguna de las áreas, así como el área de 9 años con el BP. Entretanto, el área de 9 años presenta diferencia significativa con la de 14, y la de 14 años con el BP (Cuadro 06). El área que presentó el mayor porcentaje de Ma fue la de 14 años (22.1%), seguida por la de 6 años (19.3%), BP (16.4%) y la de 9 años (16.3%) (Cuadro 08).

Al igual que en los Mi, aun habiendo diferencia estadística entre todas las áreas, este mismo comportamiento también fue observado en los Ma, no mostrando una tendencia clara, lo que nos permite inferir que no hubo influencia de las edades de reforestación con respecto al BP.

4.1.4. El volumen total de poros del suelo en las áreas

En el caso del volumen total de poros (VTP), como mencionado líneas arriba, las áreas reforestadas presentan diferencia significativa con el BP (Cuadro 07). Entretanto, no se observa diferencia significativa entre ellas. En el cuadro 08 podemos observar que las áreas reforestadas presentan una reducción de aproximadamente 26% en relación al BP.

La reducción en el VTP en todas las áreas reforestadas también está de acuerdo con las observaciones de Tormena et al. (1998), quienes verificaron una reducción de hasta 24 % en el VTP, cuando comparado con áreas que no sufrieron acción antrópica. El pisoteo de animales, maquinaria agrícola y manejo inadecuado irán acarrear interferencias en la estructura del suelo, promoviendo reducción en el VTP. En ese sentido, la retirada de la camada superficial del suelo y el uso de maquinaria pesada en las áreas reforestadas de este estudio, contribuyeron significativamente para la disminución del VTP.

Observando y analizando conjuntamente las características físicas del suelo, el VTP de todas las áreas es compuesta en su gran mayoría de Mi, siendo ambos, superiores en el BP (Cuadro 08). La alteración ocurrida en la Ds fue más expresiva sobre el VTP y la Mi. La pequeña variación en

los Ma en relación a la variación ocurrida en los microporos entre las áreas reforestadas, indica que esta variable fue modificada más lentamente y con menor intensidad por el manejo, cosa que también fue constatado por Bertol et al (2001).

4.2. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

En el cuadro 09, son presentados los resultados del análisis de variancia de las características químicas del suelo (pH, potasio y aluminio) de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario que presentaron normalidad y homogeneidad. Podemos observar que existe diferencia estadística significativa entre los tratamientos para estas variables, lo que evidencia que hubo interacción y que las variables en estudio fueron influenciadas por al menos uno de los tratamientos.

Cuadro 09. Análisis de variancia de las características químicas del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, en la profundidad de 0 – 10 cm.

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fc.	Valor - p (0.05)
pH					
Tratamientos	3	2.37	0.79	10.7	1.12 ⁻⁵ ***
Error	56	4.12	0.07		
Total	59	6.49			
POTASIO (K)					
Tratamientos	3	1795.11	598.37	19.4	9.19 ⁻⁹ ***
Error	56	1723.39	30.77		
Total	59	3518.50			
ALUMINIO (Al)					
Tratamientos	3	24.55	8.18	13.1	3.13 ⁻⁵ ***
Error	56	34.95	0.62		
Total	59	59.50			

*** Significativo $\alpha = 0.05$; ^{ns} No significativo.

Seguidamente, son presentados en el cuadro 10 los resultados del análisis de las características químicas del suelo (materia orgánica, fósforo, calcio y magnesio) de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario que no presentaron normalidad y homogeneidad. En ella podemos observar que existe diferencia estadística significativa entre los tratamientos, con excepción del fósforo. Estos resultados también evidencian que las variables fueron influenciadas por al menos uno de los tratamientos.

Cuadro 10. Análisis Kruskal - Wallis de las características químicas del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, a una profundidad de 0 – 10 cm.

Tratamientos	N	Medias	Medianas	H	Valor p (0.05)
MATERIA ORGANICA (MO)					
T1	15	14.89	13.70	30.59	1.03 ^{-6***}
T2	15	16.51	15.80		
T3	15	18.15	17.70		
T4	15	32.01	29.50		
FOSFORO (P)					
T1	15	1.15	1.00	6.31	0.0729 ^{ns}
T2	15	1.19	1.00		
T3	15	1.33	1.00		
T4	15	1.74	1.70		
CALCIO (Ca)					
T1	15	0.24	0.20	35.48	4.83 ^{-9***}
T2	15	0.22	0.20		
T3	15	0.13	0.10		
T4	15	0.09	0.10		
MAGNESIO (Mg)					
T1	15	0.25	0.30	38.90	5.19 ^{-9***}
T2	15	0.20	0.20		
T3	15	0.12	0.10		
T4	15	0.43	0.40		

*** Significativo $\alpha = 0.05$; ^{ns} No significativo

En el cuadro 11 están presentados el test de comparación de medias Tukey ($p < 0,05$) del pH, fósforo, potasio y aluminio del suelo de las áreas reforestadas y del bosque primario. En ella se observa que todas las variables en estudio presentan diferencia estadística significativa entre el BP y las áreas reforestadas, con excepción del fósforo (P), que no muestra diferencia significativa.

Cuadro 11. Cuadro de comparación de medias del pH, fósforo, potasio y aluminio del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, a una profundidad de 0 – 10 cm.

Tratamientos	Promedios	
		pH
T1	4.5	A
T2	4.5	A
T3	4.4	A
T4	4.0	B
Fósforo		
T1	1.16	A
T2	1.19	A
T3	1.33	A
T4	1.74	A
Potasio		
T1	19.6	A
T2	26.9	B
T3	20.2	A
T4	33.0	C
Aluminio		
T1	3.25	A
T2	4.27	B
T3	4.18	B
T4	4.93	C

Medias seguidas por letras iguales en cada columna no difieren entre sí por la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

En el caso de la materia orgánica y del magnesio, todas las áreas reforestadas también presentan diferencia significativa con el bosque primario, con excepción del T3 del calcio (Cuadro 12). En el caso de las áreas reforestadas, no se observa diferencias significativas para la el pH y materia orgánica (Cuadro 11 y 12).

Cuadro 12. Cuadro de comparación de medias de la densidad, miucroporosidad y del volumen total del suelo de las áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, a una profundidad de 0 – 10 cm.

Tratamiento	Ranquin	
		Materia orgánica
T1	19.53	A
T2	23.03	A
T3	27.97	A
T4	51.47	B
		Calcio
T4	13.60	A
T3	21.17	A
T2	42.10	B
T1	45.13	B
		Magnesio
T3	12.00	A
T2	25.70	B
T1	33.37	B
T4	50.93	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

4.2.1. El pH del suelo en las áreas

Cuando analizamos en detalle los resultados del pH, se observa que todas las áreas en estudio presentan una característica ácida, con valores por debajo de 5 (Cuadro 13). Trabajos realizados por Campos et al. (2012), encontraron valores de pH por debajo de 5. De acuerdo con estos autores, bajos valores de pH son comunes en suelos Amazónicos. El área reforestada que presentó el mayor valor de pH fue la de 6 años (4.5), seguida por la de 9 (4.5) y 14 años (4.4), mostrando una leve tendencia a disminuir conforme aumenta la edad de reforestación (Cuadro 13).

Aun con el poder tampón decurrente de la presencia de la materia orgánica, lo que confiere al suelo resiliencia a los cambios de pH (Baldock & Nelson, 1999), en el presente estudio, el pH del suelo disminuye con la edad de reforestación de los claros y lo inverso sucede con los niveles de materia orgánica (Cuadro 13).

Cuadro 13. Valores medio de las características químicas del suelo de áreas con diferentes edades de reforestación y del bosque primario, a una profundidad de 0 – 10 cm.

Tratamientos	Características químicas						
	pH (H ₂ O)	MO g kg ⁻¹	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	Al
6 años	4.5	14.8	1.16	19.6	0.25	0.23	3.25
9 años	4.5	16.5	1.19	26.9	0.21	0.20	4.27
14 años	4.4	18.1	1.33	20.2	0.11	0.13	4.18
BP	4.0	32.0	1.74	33.0	0.06	0.43	4.93

BP: Bosque primario; Medias seguidas por letras iguales en cada columna no difieren entre sí por la prueba de Tukey ($p < 0,05$). MO: materia orgánica; P: fosforo; K⁺: potasio Ca²⁺: calcio, Mg²⁺: magnesio; Al³⁺: aluminio.

4.2.2. La materia orgánica del suelo en las áreas

En lo que respecta a la materia orgánica (MO), no hubo diferencia estadística significativa entre los valores medios de las áreas reforestadas (Cuadro 12). Además, se observa una tendencia, con valores que van aumentando desde los 14.8 g kg⁻¹ encontrados en el área con 6 años, hasta los 16.5 y 18.1 g kg⁻¹ en las áreas con 9 y 14 años, respectivamente (Cuadro 13). Estos valores de MO encontrados en las áreas reforestadas, son considerados bajos cuando comparamos con el BP y hasta cuatro veces menos cuando comparados con los estudios realizados por Zaninetti, (2012), en áreas de bosque primario.

La retirada del bosque primario altero significativamente el contenido de materia orgánica en el suelo (Cuadro 13), habiendo sido observada una recuperación de casi el 60% del stock de MO solamente después de 14 años de reforestación. Con la retirada de toda la camada superficial del suelo, ocurre un quiebre en el stock y en la dinámica de la MO, la cual está directamente relacionada con la presencia de la litera (Cerri, 1989). Johnson et al. (2001), al estudiar el stock de MO en bosques secundarios sin la retirada de la camada superficial, observaron que claros con 10 años de edad presentaron contenido de MO, en la camada de 0 – 10 cm, semejantes al del bosque primario.

Independientemente de la edad de reforestación o del bosque primario, el suelo de las áreas del presente estudio presenta baja fertilidad natural debido a los niveles de nutrientes considerados bajos dentro de la clasificación (Ribeiro et al., 1999), a saber: Ca: 0,15-0,82 cmol_c kg⁻¹; Mg: 0,05-0,40 cmol_c kg⁻¹; K: 19-39 mg dm⁻³ e P: 0,7-3,5 mg dm⁻³.

4.2.3. El fósforo del suelo en las áreas

En el caso del fósforo, aun no presentando diferencia significativa entre los tratamientos, la reforestación ocasionó aumento gradual en los niveles de este elemento, con valores que van de 1.16 a 1.33 mg dm⁻³, debido probablemente al aumento también gradual de la MO en las áreas reforestadas (Cuadro 13), evidenciando una leve recuperación cuando comparado al BP.

En la mayoría de suelos de la región Amazónica, los niveles de P generalmente son muy bajos, como muestran los estudios realizados por Campos et al. (2010). Entretanto, en su estudio Oliveira et al. (2015) encontraron niveles de fósforo elevados para los padrones amazónicos, en áreas de bosque primario (6.09 mg dm⁻³) y sistemas agroforestales (8.19 mg dm⁻³) en la camada de 0 – 10 cm, valores que están por encima de los encontrados en el presente estudio (Cuadro 13). Entretanto, los estudios realizados Moreira y Costa (2004) realizados en áreas próximas de este estudio, presentan niveles de P inferiores. Según estos autores, los niveles de P están directamente relacionados con los de la MO, pues presentan un aumento lineal y significativo.

4.2.4. El potasio del suelo en las áreas

En relación al potasio (K), los niveles más altos fueron observados en el BP (33.0 cmol_c kg⁻¹), seguido por las áreas reforestadas de 9 (26.9 cmol_c kg⁻¹), 14 (20.2 cmol_c kg⁻¹) y 6 (19.6 cmol_c kg⁻¹) años (Cuadro 13). Entretanto, las áreas de 6 y 14 años, presentan diferencias significativas con el área de 9 años de edad.

Vale resaltar que al igual que el P, los niveles de K encontrados en este estudio son considerados bajos. Entretanto, los niveles de K observados son inferiores a los encontrados por Aquino et al. (2014) y Oliveira et al. (2015) en suelos de la región Sur del estado de Amazonas.

Bajos niveles de K encontrados en los suelos estudiados, puede estar asociado a la fácil lixiviación de este elemento por el agua de la lluvia (Silva et al., 2011), que son comunes en la región de estudio. En ese sentido, las condiciones pluviométricas ($2.239 \text{ mm año}^{-1}$) del ambiente de muestreo, pueden haber influenciado los niveles de K.

Vale la pena recordar que el K no es un componente de la estructura de las plantas, estando preferencialmente ligado a procesos metabólicos. Esto hace que, en el proceso de liberación de nutrientes, él sea uno de los primeros a ser disponibilizado para la solución del suelo, y confiere a este elemento una alta tasa de renovación interna o recolocación (Miller, 1984). En ese sentido, probablemente, los resultados de K de las áreas reforestadas no muestren una tendencia clara en relación al BP, indicando que no hubo influencia de la edad de reforestación en relación a este elemento.

4.2.5. El calcio del suelo en las áreas

Cuanto al Calcio (Ca), se observa diferencia estadística significativa entre los tratamientos T1 y T2 con el T3. Entretanto, Los tratamientos T1 y T9 no presentan diferencia significativa, apenas hubo una media estadística superior del T1 (Cuadro 12). El mayor valor fue observado en el área de 6 años, con $0.25 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, seguida de las áreas de 9,

14 años y del BP, con 0.21, 0.11 y 0.06 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente (Cuadro 13).

En el cuadro 13 también podemos observar que los niveles de Ca van disminuyendo conforme aumenta la edad de reforestación, aproximándose del BP. La disminución del Ca en las áreas reforestadas se debe probablemente a que está siendo absorbido y almacenado en las estructuras de la planta, toda vez que cuanto mayor edad de reforestación, la biomasa de la vegetación también aumenta.

Los niveles de Ca obtenidos en las áreas de BP de este estudio, están muy por debajo de los encontrados por Jordão (2018), en áreas de bosque primario. Por otro lado, Jakelaitis et al. (2008) relatan que la disminución del Ca se debe a la retirada del bosque original para la prospección de gas y petróleo. Entretanto, esta afirmación no coincide con los resultados de este estudio, pues aun observándose niveles bajos de Ca en todas las áreas reforestadas, este elemento sigue siendo superiores al del BP (Cuadro 13). Esto probablemente se deba al ingreso de Ca antes de la reforestación de las áreas, a través de las ruedas de los vehículos, pues estos transitaban por carreteras donde se aplicaron cal para la afirmación de las mismas, y también debido a su baja movilidad de este elemento, pues una vez dentro de las áreas reforestadas, este quedo probablemente establecido.

4.2.6. El magnesio del suelo en las áreas

Para el caso del Magnesio (Mg), los resultados nos muestran que existe diferencia significativa de los tratamientos T1 y T2 con el T3. Entretanto, no se observa diferencia significativa entre el T1 y el T2, apenas hubo una media estadística superior del área de 6 años (Cuadro 12).

Los suelos Amazónicos son caracterizados, en su mayor parte, por bajos niveles de Mg (Alfaia & Muraoka, 1997), lo que puede ser confirmado por los resultados obtenidos en este estudio en las diferentes áreas estudiadas.

Al igual que en los niveles del Ca, también se observa disminución de los niveles de Mg conforme la edad de reforestación va aumentando (Cuadro 13). Estos mismos resultados fueron observados por Macedo et al. (2009).

4.2.7. El aluminio del suelo en las áreas

Al realizar la prueba de comparación de medias en el caso del Aluminio (Al), podemos observar diferencia significativa entre el tratamiento T1 con los tratamientos T2 y T3 (Cuadro 12). Estas diferencias se ven reflejadas con un aumento gradual de los niveles de Al en las áreas reforestadas, pasando de 3,25 a 4.18 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ del área de 6 a la de 14 años, respectivamente (Cuadro 13). Estos resultados son contrarios a los encontrados por Moreira y Costa (2004), quienes afirman que la reforestación ocasiona disminución del nivel de Al.

El aumento gradual del Al en las áreas reforestadas puede ser atribuido a la disminución gradual del Ca. Corroborando, Mantovanelli et al. (2015) afirman que la disminución del Al en ambientes manejados, ocurre principalmente por los efectos del Ca, el cual contribuye para la neutralización del Al en el suelo. Según Mantovanelli et al. (2016), en ambientes amazónicos, como los bosques primarios, los elevados niveles de Al puede ser un indicador del efecto del bajo aporte y producción de compuestos orgánicos en esos ambientes, que no presentan capacidad de complexar el Al.

De acuerdo con la guía práctica para interpretación de resultados de análisis de suelos de Sobral et al. (2015), niveles superiores a los 3 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, son considerados elevados. En ese sentido, en todas las áreas estudiadas, el Al presentó niveles elevados (Cuadro 13), siendo que esta condición no es considerada deseable para el buen desarrollo de las plantas. Complementando, Sobral et al. (2015) afirman que la presencia de Al en el suelo puede inhibir el crecimiento radicular e influenciar en la disponibilidad de otros nutrientes y procesos como la mineralización de la materia orgánica.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Todas las características físicas del suelo que fueron evaluadas en el presente estudio fueron influenciadas por las diferentes edades de reforestación.

Con excepción del fósforo, todas las características químicas del suelo fueron influenciados por las diferentes edades de reforestación.

Con la retirada del bosque primario y del horizonte superficial del suelo, las características físicas y químicas del suelo de las áreas en estudio fueron alteradas.

Los 10 primeros cm del suelo de las áreas reforestadas presentan una lenta recuperación de algunas características físicas y químicas.

5.2. RECOMENDACIONES

Realizar un aporte inicial de materia orgánica antes del trasplante de las especies nativas en toda el área a ser reforestada, permitiendo de esta manera elevar los niveles de nutrientes y de microorganismos que permitan una más rápida recuperación de estas áreas, así como una forma de protección contra los factores climáticos, minimizando los procesos erosivos. Utilizar las características físicas y químicas del suelo como indicadores de recuperación en futuros estudios de áreas degradadas por la actividad humana.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- AMARAL, I.L. 1996.** Diversidade florística em floresta de terra firme, na região do rio Urucu – AM. Tesis de Maestría. Universidade Federal do Amazonas, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Manaus. 104 pp.
- ALFAIA & MURAOKA (1997).** Efeito residual de calagem e micronutrientes e Latossolo Amarelo sob rotação de culturas. *Acta Amazonica*, v.27(3): 153-162.
- AQUINO, R.E. et al (2014).** Distribuição espacial de atributos químicos de solo em área de pastagem e floresta. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 44(1): 32-41.
- ARAÚJO & MONTEIRO (2007).** Indicadores Biológicos de Qualidade do Solo. *Bioscien Journal*, Uberlândia, v. 23(3): 66 - 75.
- ARRUDA, W. da C. 2005.** Estimativa dos processos erosivos na Base de Operações Geólogo Pedro de Moura, Urucu – Coari – AM. Tesis de Maestria. Manaus. Brasil. Universidade Federal do Amazonas. 80 pp.
- BALDOCK & NELSON, (1999).** Soil organic matter. En: Sumner, M. (Ed.), *Handbook of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 825 – 884.
- BARNETT, J.P., BAKER, J.B. 1991.** Regeneration methods. En: Dureya, L.; Dougherty, P.M. *Forest regeneration manual*. Dordrecht: Kluwer. 1991. pp. 35-50.
- ERTOL, I. et al (2004).** Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas as do campo nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 155-163.

- BERTOL, I. (2001).** Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. *Sci. Agric.* 58:555-560, 2001.
- BIANCHI, M. de O. 2009.** Avaliação da funcionalidade do solo em sistemas florestais enriquecidos com leguminosas. Tesis de Maestria. Rio de Janeiro. Brasil. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 56 pp.
- BURROUGH, P.A. 1993.** Soil variability: a late 20th century view. *Soil and Fertilizers*, v. 56: 529-562.**BLAKE, G.R., HARTGE, K.H. 1986.** Particle density. En: KLUTE, A. ed. *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. Madison: American Society of Agronomy. 1986. pp. 363-375.
- CAMPOS, M.C.C. et al (2012).** Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. *Revista Agro@mbiente*. v. 6(2): 102-109.
- CAMPOS, M.C.C. et al (2010).** Interferências dos pedoambientes nos atributos do solo em uma toposequência de transição Campo/Floresta. *Revista Ciência Agronômica*, v. 4(4): 527-535.
- CERRI, C.C. (1989).** Dinâmica da matéria orgânica em solo de pastagem. In: *Simpósio sobre ecossistemas de pastagens, Piracicaba. Anais...* Piracicaba: Universidade de São Paulo, p.135-147, 1989.
- COELHO, A.M. (2003).** Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. En: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ VENEGAS, V.H. (Ed.). *Tópicos em Ciência do Solo*, Viçosa: SBCS, v. 3: p. 243-290.

- DALAL, R.C. 1998.** Soil microbial biomass – what do the numbers really means?
Australian Journal of Experimental Agriculture, 38: 649-665.
- DIAS, L.E. 1998.** Caracterização de substratos para fins de recuperação de áreas degradadas. En: Dias, L.E.; Meilo, J.W.V. de. Recuperação de áreas degradadas. Viçosa: UFV, Departamento de Solos; Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas. 1998. pp. 27-44.
- DIAS & GRIFFITH (1998).** Conceituação e caracterização de áreas degradadas. En: DIAS, L.E.; MELLO, J.W.U. (Ed) Recuperação de áreas degradadas. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998. p. 1-7.
- DORAN & PARKIN 1994.** Defining and Assessing Soil Quality. En: Doran, J.B.; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F.; Stewart, B.A. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America Madison. SSSA Special Publication. 1994. pp. 244.
- DUBOIS, J.C.L., VIANA, V.M. & ANDERSON A.B. 1996.** Manual agroflorestal para a Amazônia. Rio de Janeiro, R.J. REBRAF, 228 pp.
- EMBRAPA (2015).** Sistema Brasileiro de Classificação de solos. 2a ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro, Pp 306.
- EMBRAPA (2016).** Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. SILVA, F.C. (Ed.). Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 623 pp.
- FERREIRA, P.V. 2000.** Estatística experimental aplicada à agronomia. 3.ed. Maceió, EDUFAL: 419 pp.
- GOMES-POMPA, A., WIECHERS, L. 1979.** Regeneracion de los ecosistemas tropicales y subtropicales. En: Gomes-Pompa, A.; Vazquez-Yanez, C.;

Amo Rodrigues, S. del et al. (Ed.). Investigaciones sobre la regeneración de selvas altas em Vera Cruz. 2. ed. México: Continental, 1979. p.11 - 30.

JAKELAITIS, A. et al (2008). Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 38(2): 118-127.

JOHNSON, C.M. et al (2001). Carbon and nutrient storage in primary and secondary forests in eastern Amazônia. Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 147: 245-252.

JORDÃO, C.H.W. 2018. Atributos químicos de solos sob ambientes naturais e antropizados no município de Humaitá, AM. Tesis de Maestría, Universidade Federal do Amazonas. 51 pp.

KLUTE A., DIRKSEN C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. En: Klute A. (Ed.) Methods of soil analysis. Madison: American Society of Agronomy. 1986. pp. 687- 734.

LAL, R. 1997. Degradation and resilience of soils. Phil. Trans. R. Soc. Lond. The Royal Society Printed in Great Britain, 352 pp.

MILLER, H.G. 1984. Dynamics of nutrient cycling in plantation ecosystems. En: Bowen, G.D., Nambiar, E.K.S. **Nutrition of plantation forests.** London, 1984. pp. 53-78.

MACEDO, R.S. et al (2009). Dinâmica do carbono e nutrientes em solos sob floresta primária e em áreas com diferentes idades de reflorestamento na Província Petrolífera de Urucu, Coari - AM. En: XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2009, Fortaleza. Universidade Federal do Ceará, p. 535-535.

- MANTOVANELLI, B.C. (2016).** Distribuição espacial dos componentes da acidez do solo em área de campo natural na região de Humaitá, Amazonas. *Revista de Ciências Agroambientais*, v. 14(1): 01-09.
- MANTOVANELLI, B.C. et al (2015).** Avaliação dos atributos do solo sob diferentes usos na região de Humaitá, Amazonas. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 58(2): 122-130.
- MARCOLIN, C.D. 2006.** Propriedades físicas de nitossolo y latossolo argiloso sob plantio direto. Tesis de Maestría, Universidade de passo fundo. 98 pp.
- MOREIRA & COSTA (2004).** Dinâmica da matéria orgânica na recuperação de clareiras da floresta amazônica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39(10): 1013-1020.
- NASCIMENTO, J.G.C. 2009.** A influência da erosão na regeneração de clareiras. Tesis de Doctorado. Manaus. Brasil. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, INPA/UFAM, Manaus-AM. 162 pp.
- OLIVEIRA, I.A. et al (2015).** Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. *Acta Amazonica*, v. 45(1): 1-12.
- PARROTTA, J.A. (1992).** The role of plantation forest in rehabilitating degraded tropical ecosystems. *Agroecosyst. Envir.* 41: 115-133.
- PIRES, J.M. (1973).** Tipos de vegetação da Amazônia. Belém, CNPq/INPA/MPEG (*Publicações avulsas*): 179-202.
- PRANCE, G.T. 1987. VEGETATION.** En: Whitmore, T.C.C.; Prance, G.T. (Eds). *Biogeography and quaternary history in tropical America*. Oxford: Clarendon Press. 1987. p. 28 - 44.

PRUDENTE, A.L.C. et al (2010). Serpentes da Bacia petrolífera de Urucu, Município de Coari, Amazonas, Brasil. *Acta Amazonica*. 40: 381-386.

RADAMBRASIL. 1978. Ministerio das Minas e Energia. Programa de Integração Nacional: levantamento de recursos naturais. Rio de Janeiro, 17 (Folha SB, 20 Purus): 556 pp.

RESENDE, M., CURI, N., REZENDE, S.B., CORREA, G.F. 2002. Pedologia Base para distinção de Ambientes. 4 ed. Viçosa, MG: NEPUT, 338 pp.

RIBEIRO, A.C., GUIMARÃES, P.T.G., ALVAREZ V.V.H. 1999. Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5a. Aproximação. Viçosa: SFSEMG. 359p.

RODRIGUES, R.R. 1999. Colonização e enriquecimento de um fragmento florestal urbano após a ocorrência de fogo. Fazenda Santa Elisa, Campinas, SP: Avaliação temporal da regeneração natural (66 meses) e do crescimento (51 meses) de 30 espécies florestais plantadas em consórcios sucessionais. Tesis de Doctorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 167 pp.

R CORE TEAM (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

SEITZ, R.A. et al (1998). A regeneração natural de *Pinus taeda*. In: Simpósio Florestal do Rio Grande do Sul, 5. Associação Gaúcha de Empresas Florestais (AGEFLOR), Sindicato das Indústrias da Madeira da Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul (SINDIMADEIRA), Centro de pesquisas Florestais (CEPEF), Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Florestal da UFSM (PPGEF), 1998, Caxias do Sul. Anais...
Caxias do Sul. p. 37-53.

TEIXEIRA, W.G. et al (2006). Processos erosivos na Base Geólogo Pedro de Moura – Coari – AM: A presença de “demoisseles” e a relação com a intensidade e erosividade das chuvas e erodibilidade do solo. In: II Workshop Técnico Científico da rede CT-Petro Amazônia, Manaus. Rede CT Petro Amazônia. Manaus: Fundação Djalma Batista, CD-ROM.

TEIXEIRA, W.G. et al (2007). Parâmetros físicos e hídricos para monitoramento da recuperação de uma área degradada pela retirada dos horizontes superficiais do solo na Província Petrolífera de Urucu – AM. In: XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo Gramado-RS. Núcleo Regional Sul. CD ROM.

TEIXEIRA, W.G. ET AL (2009). Caracterização dos principais ambientes pedológicos na Base de Operações Geólogo Pedro de Moura, Amazônia Central Brasileira. In: XVIII Congresso latinoamericano de la ciencia del suelo. San José, Costa Rica. CD - ROM.

TORMENA, C.A. et al (1998). Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo roxo sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do solo, 22: 573 – 581.

SILVA, A.M. et al (2011). Propriedades químicas de solo sob reflorestamento ciliar após 20 anos de plantio em área de cerrado. Revista *Árvore*, v. 35(1): 97-106.

SOANE & OUWERKERK (1994). Soil compaction problems in world agriculture.

En: SOANE, B.D., OUWERKERK, C. van, (eds). Soil compaction in crop production. Netherlands: Elsevier, p. 1-21.

SOUZA, A.C. (2009). Atributos físicos do solo como indicadores de recuperação

de áreas com diferentes idades de reflorestamento na Província Petrolífera de Urucu, Coari - AM. En: XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2009, Universidade Federal do Ceará, 2009. p. 129-129.

SOBRAL, L.F. et al (2015). Guia prático para interpretação de resultados de

análises de solo. Embrapa Tabuleiros Costeiros: Aracaju, 2015, 13 p. (Documentos, 206).

UCHOA, J.I. et al (2006). Caracterização química dos compostos orgânicos

produzidos na Estação de Tratamentos de Resíduos da Base Petrolífera de Urucu. In Workshop de Avaliação Técnica e Científica Manaus, AM, CTPetro Amazônia. 4 p.

ZANINETTI, R.A. 2012. Variação de atributos do solo na conversão de floresta

primária em seringais em Latossolo amarelo na Amazônia ocidental, Manaus – AM, Teisis de doctorado. Universidade Federal do Amazonas. 105 pp.

ANEXOS

Anexo 01. Datos originales de la densidad del suelo (g dm^{-3}) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.

Repeticiones	TRATAMIENTOS			
	T1	T2	T3	T4
	(6 años)	(9 años)	(14 años)	(BP)
R1	1,32	1,16	1,15	0,98
R2	1,37	1,20	1,12	0,85
R3	1,32	1,16	1,20	0,98
R4	1,43	1,19	1,16	0,85
R5	1,37	1,22	1,18	1,01
R6	1,46	1,22	1,20	0,71
R7	1,26	1,23	1,17	0,83
R8	1,10	1,21	1,17	0,58
R9	1,10	1,23	1,21	0,70
R10	1,08	1,24	1,19	0,57
R11	1,95	1,24	1,21	0,82
R12	1,22	1,24	1,19	0,75
R13	1,20	1,26	1,21	0,87
R14	1,15	1,25	1,15	0,91
R15	1,27	1,23	1,13	0,90
* Σ	19,61	18,27	17,63	12,30
**X	1,31	1,22	1,18	0,82

*Sumatoria; **Promedio

Anexo 02. Datos originales de la microporosidad del suelo (%) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.

Repeticiones	TRATAMIENTOS			
	T1	T2	T3	T4
	(6 años)	(9 años)	(14 años)	(BP)
R1	34,60	33,84	32,32	40,00
R2	32,30	29,08	38,54	52,00
R3	31,33	35,85	23,86	40,00
R4	28,72	34,51	25,03	52,00
R5	26,40	33,63	28,71	38,00
R6	26,37	35,39	28,80	53,89
R7	29,97	34,12	27,99	48,55
R8	38,51	35,74	29,36	66,66
R9	32,81	31,74	26,98	55,88
R10	32,09	35,07	27,57	68,15
R11	18,43	36,73	28,98	55,95
R12	27,39	33,05	23,78	54,93
R13	35,10	34,77	22,33	49,93
R14	37,00	33,06	20,74	51,57
R15	31,69	30,66	27,96	50,75
*Σ	462,72	507,23	412,95	778,24
**X	30,85	33,82	27,53	51,88

*Sumatoria; **Promedio

Anexo 03. Datos originales de la macroporosidad del suelo (%) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.

Repeticiones	TRATAMIENTOS			
	T1	T2	T3	T4
	(6 años)	(9 años)	(14 años)	(BP)
R1	18,98	15,61	13,89	22,00
R2	18,94	18,14	18,64	15,00
R3	19,06	21,09	23,36	22,00
R4	16,18	15,37	20,80	15,00
R5	18,35	15,95	25,54	23,00
R6	17,41	17,74	23,79	18,98
R7	21,71	16,04	27,06	19,45
R8	19,29	15,08	25,76	11,13
R9	24,80	19,89	23,19	17,30
R10	26,23	13,09	24,93	9,93
R11	6,56	13,13	20,92	12,44
R12	25,79	14,96	20,58	16,39
R13	18,65	16,89	20,91	16,61
R14	18,88	16,01	21,29	13,36
R15	19,42	16,14	22,04	14,56
*Σ	290,25	245,12	332,72	247,16
**X	19,35	16,34	22,18	16,48

*Sumatoria; **Promedio

Anexo 04. Datos originales del volumen total de poros del suelo (%) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.

Repeticiones	TRATAMIENTOS			
	T1	T2	T3	T4
	(6 años)	(9 años)	(14 años)	(BP)
R1	53,58	49,45	46,21	62,00
R2	51,24	47,22	57,18	67,00
R3	50,39	56,93	47,22	62,00
R4	44,91	49,88	45,83	67,00
R5	44,76	49,58	54,25	61,00
R6	43,78	53,13	52,59	72,87
R7	51,68	50,16	55,05	68,00
R8	57,80	50,82	55,12	77,78
R9	57,61	51,62	50,17	73,18
R10	58,32	48,16	52,50	78,08
R11	24,98	49,86	49,89	68,39
R12	53,18	48,01	44,37	71,32
R13	53,75	51,65	43,24	66,54
R14	55,88	49,06	42,03	64,93
R15	51,11	46,80	50,00	65,31
*Σ	752,97	752,35	745,67	1025,40
**X	50,20	50,16	49,71	68,36

*Sumatoria; **Promedio

Anexo 05. Datos originales del pH del suelo de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.

Repeticiones	TRATAMIENTOS			
	T1	T2	T3	T4
	(6 años)	(9 años)	(14 años)	(BP)
R1	4,28	4,20	3,67	3,86
R2	4,50	3,97	4,27	3,82
R3	4,37	3,99	4,30	3,93
R4	4,47	4,42	4,13	4,03
R5	4,49	4,66	4,25	3,84
R6	4,40	4,26	4,14	3,80
R7	4,74	4,56	4,32	3,82
R8	4,53	4,65	4,29	3,93
R9	4,78	4,79	4,31	3,83
R10	4,52	4,46	4,77	3,92
R11	4,95	4,40	4,85	4,70
R12	4,30	4,83	4,74	4,09
R13	4,36	4,77	4,56	4,14
R14	4,18	4,72	4,44	4,41
R15	4,30	5,07	4,47	4,07
*Σ	67,17	67,75	65,51	60,19
**X	4,48	4,52	4,37	4,01

*Sumatoria; **Promedio

Anexo 06. Datos originales de la materia orgánica del suelo (g kg^{-1}) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.

Repeticiones	TRATAMIENTOS			
	T1	T2	T3	T4
	(6 años)	(9 años)	(14 años)	(BP)
R1	11,41	10,94	12,84	36,79
R2	6,54	10,35	12,70	32,23
R3	9,96	13,50	15,72	49,46
R4	9,65	14,15	14,22	48,12
R5	8,22	15,76	14,61	38,60
R6	8,38	24,88	23,33	26,01
R7	16,82	28,73	20,43	26,56
R8	20,31	21,77	17,57	23,78
R9	23,25	19,37	19,37	28,48
R10	15,03	16,65	18,16	29,10
R11	20,25	15,38	17,03	29,54
R12	13,70	9,36	18,24	27,76
R13	20,62	18,58	26,49	31,81
R14	12,80	11,76	23,95	19,90
R15	26,39	16,33	17,72	31,91
*Σ	223,34	247,50	272,38	480,05
**X	14,89	16,50	18,16	32,00

*Sumatoria; **Promedio

Anexo 07. Datos originales del fosforo del suelo (mg dm^{-3}) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.

Repeticiones	TRATAMIENTOS			
	T1	T2	T3	T4
	(6 años)	(9 años)	(14 años)	(BP)
R1	1,00	1,00	1,67	2,00
R2	1,00	1,00	1,25	3,00
R3	1,00	1,00	1,20	2,50
R4	1,00	1,00	1,67	2,80
R5	1,33	2,00	1,00	2,10
R6	1,00	2,00	2,00	1,00
R7	1,00	2,00	1,00	1,00
R8	1,00	3,00	3,00	1,00
R9	1,00	0,40	0,40	1,00
R10	1,00	1,00	0,40	1,30
R11	2,00	0,40	1,00	1,00
R12	2,00	0,30	1,00	1,65
R13	1,00	0,30	1,00	1,90
R14	1,00	2,00	0,30	2,30
R15	1,00	0,40	3,00	1,50
*Σ	17,33	17,80	19,88	26,05
**X	1,16	1,19	1,33	1,74

*Sumatoria; **Promedio

Anexo 08. Datos originales del potasio del suelo (mg dm^{-3}) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.

Repeticiones	TRATAMIENTOS			
	T1	T2	T3	T4
	(6 años)	(9 años)	(14 años)	(BP)
R1	12,20	19,40	20,33	33,40
R2	14,33	15,67	23,67	31,48
R3	12,67	22,35	20,33	39,54
R4	17,33	26,67	26,14	36,24
R5	13,67	29,34	26,67	31,20
R6	28,36	30,22	19,30	30,86
R7	22,69	31,40	16,25	27,98
R8	15,25	35,10	25,33	36,54
R9	14,25	29,24	12,04	43,22
R10	24,38	31,60	14,98	31,06
R11	28,05	35,20	19,50	39,92
R12	22,12	24,98	15,33	23,48
R13	14,24	29,45	17,85	32,31
R14	26,20	23,65	19,78	26,55
R15	29,14	20,10	26,28	31,94
*Σ	294,88	404,36	303,78	495,72
**\bar{X}	19,66	26,96	20,25	33,05

*Sumatoria; **Promedio

Anexo 09. Datos originales del calcio del suelo ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.

Repeticiones	TRATAMIENTOS			
	T1	T2	T3	T4
	(6 años)	(9 años)	(14 años)	(BP)
R1	0,21	0,19	0,05	0,05
R2	0,27	0,23	0,06	0,06
R3	0,24	0,21	0,10	0,07
R4	0,23	0,15	0,09	0,05
R5	0,25	0,22	0,13	0,04
R6	0,22	0,18	0,14	0,05
R7	0,19	0,27	0,09	0,05
R8	0,18	0,18	0,17	0,06
R9	0,33	0,25	0,15	0,06
R10	0,31	0,16	0,20	0,05
R11	0,18	0,27	0,21	0,06
R12	0,37	0,19	0,09	0,06
R13	0,15	0,11	0,07	0,06
R14	0,23	0,31	0,06	0,06
R15	0,18	0,29	0,07	0,06
* Σ	3,53	3,21	1,68	0,84
**X	0,24	0,21	0,11	0,06

*Sumatoria; **Promedio

Anexo 10. Datos originales del magnesio del suelo (cmol.
kg⁻¹) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las
áreas en estudio.

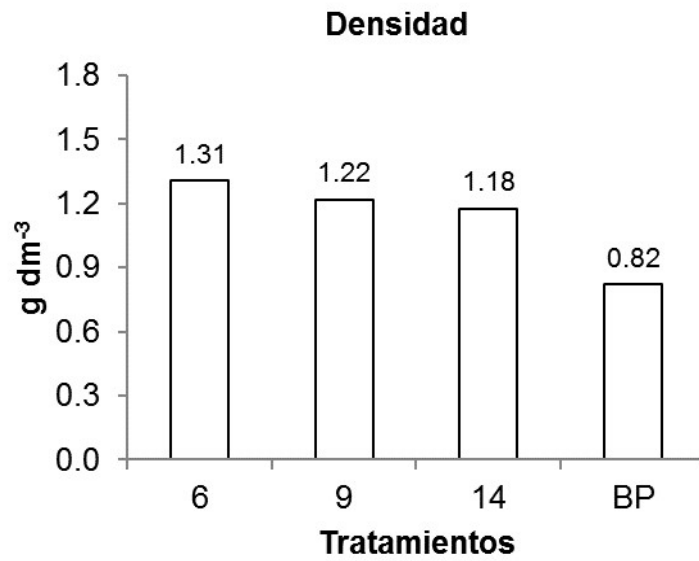
Repeticiones	TRATAMIENTOS			
	T1	T2	T3	T4
	(6 años)	(9 años)	(14 años)	(BP)
R1	0,27	0,21	0,13	0,54
R2	0,25	0,30	0,14	0,61
R3	0,25	0,23	0,11	0,70
R4	0,30	0,18	0,09	0,44
R5	0,22	0,18	0,12	0,38
R6	0,13	0,19	0,12	0,37
R7	0,16	0,22	0,11	0,26
R8	0,19	0,29	0,13	0,47
R9	0,21	0,21	0,11	0,35
R10	0,26	0,25	0,12	0,28
R11	0,32	0,14	0,17	0,51
R12	0,31	0,18	0,13	0,36
R13	0,21	0,16	0,13	0,22
R14	0,18	0,10	0,17	0,44
R15	0,25	0,12	0,15	0,51
*Σ	3,52	2,96	1,93	6,44
**X	0,23	0,20	0,13	0,43

*Sumatoria; **Promedio

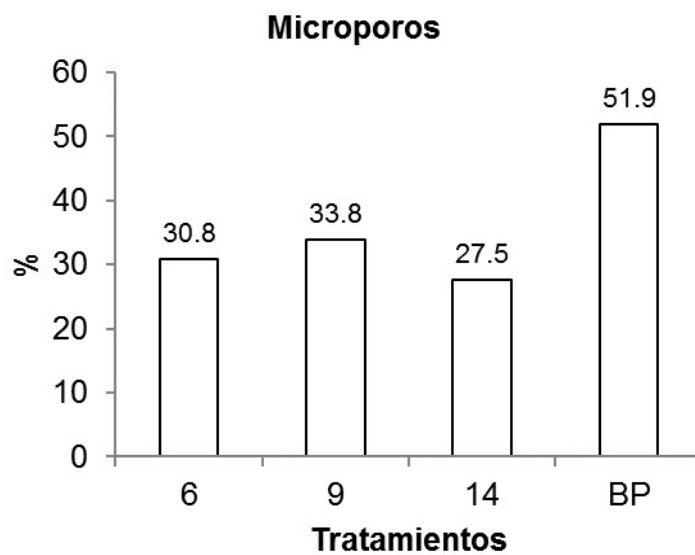
Anexo 11. Datos originales del aluminio del suelo (cmol_c kg⁻¹) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.

Repeticiones	TRATAMIENTOS			
	T1	T2	T3	T4
	(6 años)	(9 años)	(14 años)	(BP)
R1	3,40	4,16	4,58	5,11
R2	3,50	4,39	4,10	6,44
R3	4,22	3,85	4,64	5,47
R4	4,31	4,53	5,17	6,33
R5	3,96	4,40	4,98	6,21
R6	2,48	4,57	4,66	4,68
R7	1,94	4,35	4,31	5,16
R8	2,45	5,44	3,96	5,17
R9	1,10	4,24	4,18	5,21
R10	2,53	4,55	4,04	5,34
R11	2,43	4,22	3,98	4,66
R12	3,65	3,83	3,26	3,79
R13	4,46	4,28	4,81	3,81
R14	4,44	3,99	3,73	4,49
R15	3,95	3,31	2,41	4,01
*Σ	48,81	64,10	62,82	75,88
**X	3,25	4,27	4,19	5,06

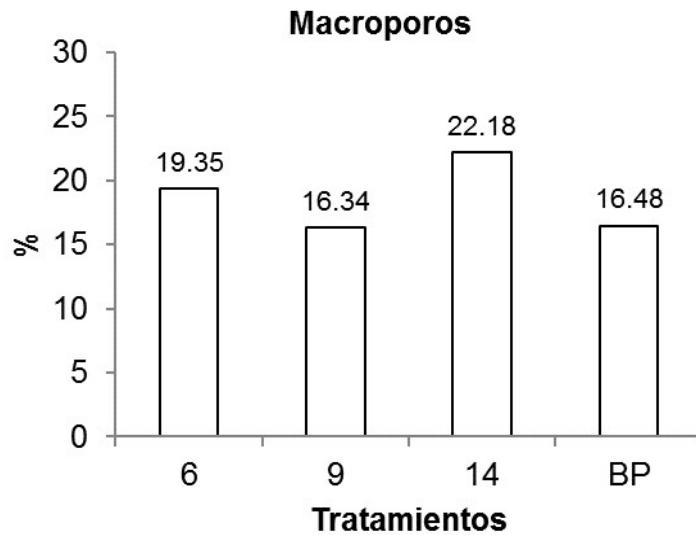
*Sumatoria; **Promedio



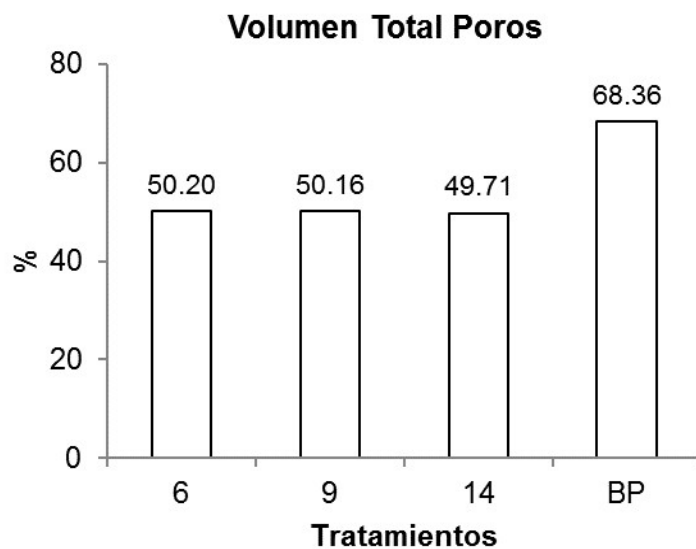
Anexo 12. Valores medios de la densidad del suelo (g dm⁻³) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.



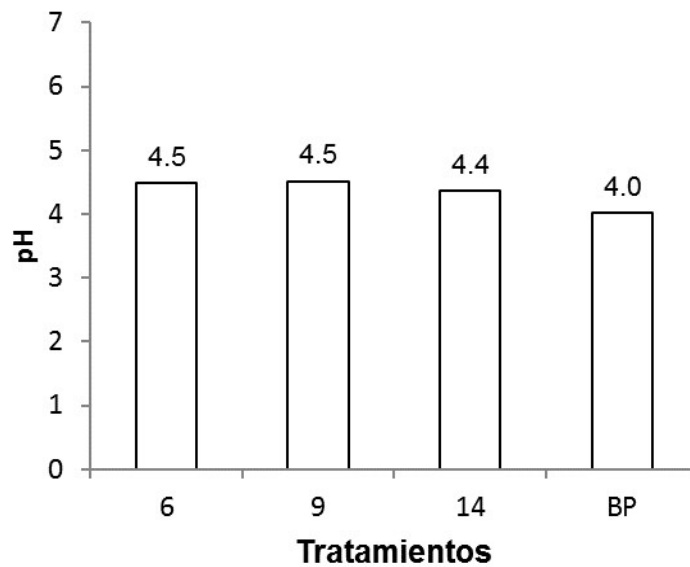
Anexo 13. Valores medios de la microporosidad del suelo (%) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.



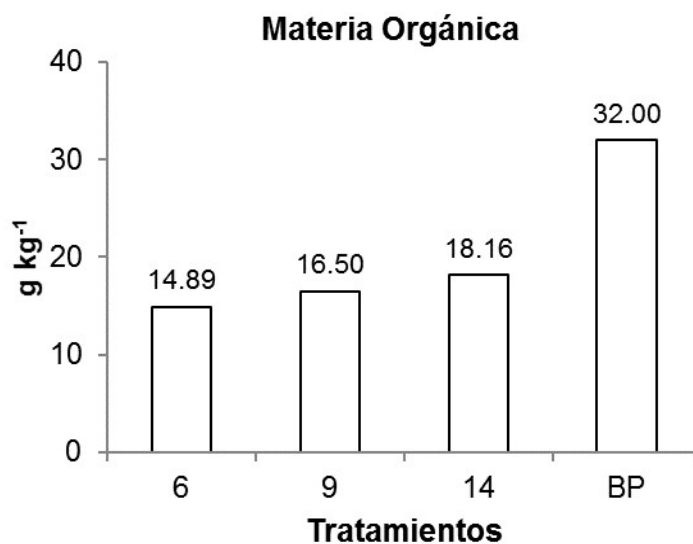
Anexo 14. Valores medios de la macroporosidad del suelo (%) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.



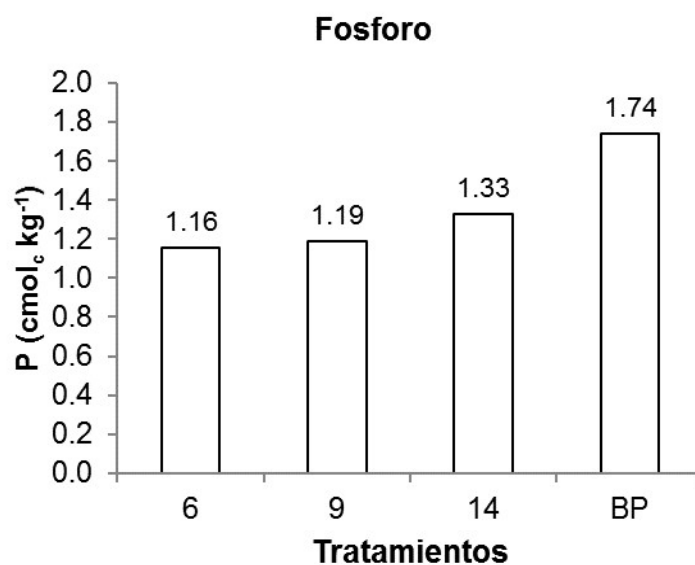
Anexo 15. Valores medios del volumen total de poros (%) de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.



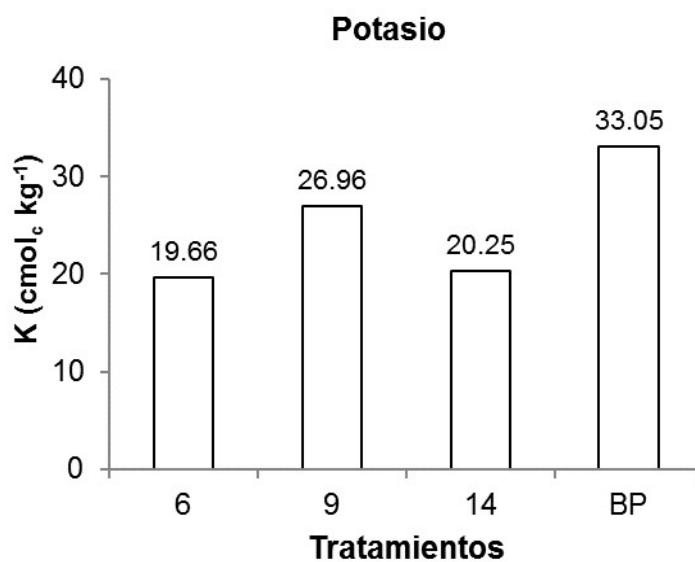
Anexo 16. Valores medios del pH del suelo de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.



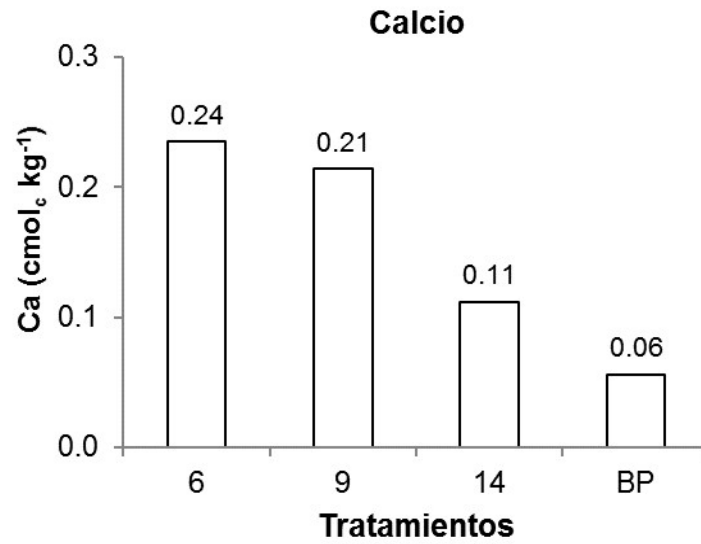
Anexo 17. Valores medios de la materia orgánica del suelo de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.



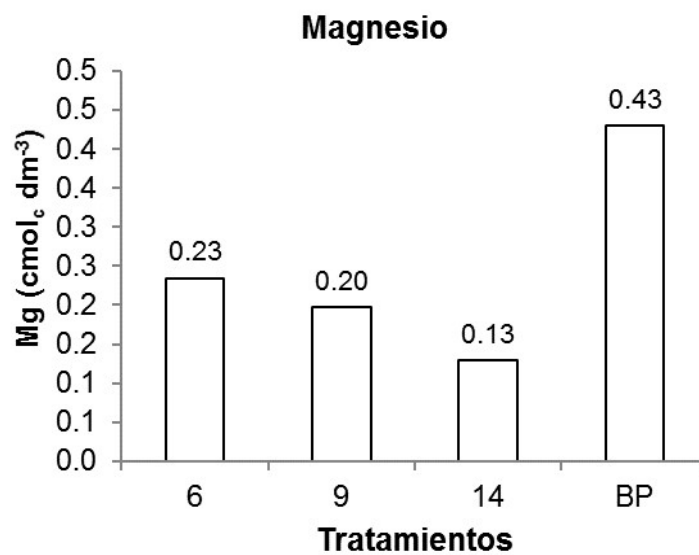
Anexo 18. Valores medios del fosforo del suelo de la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.



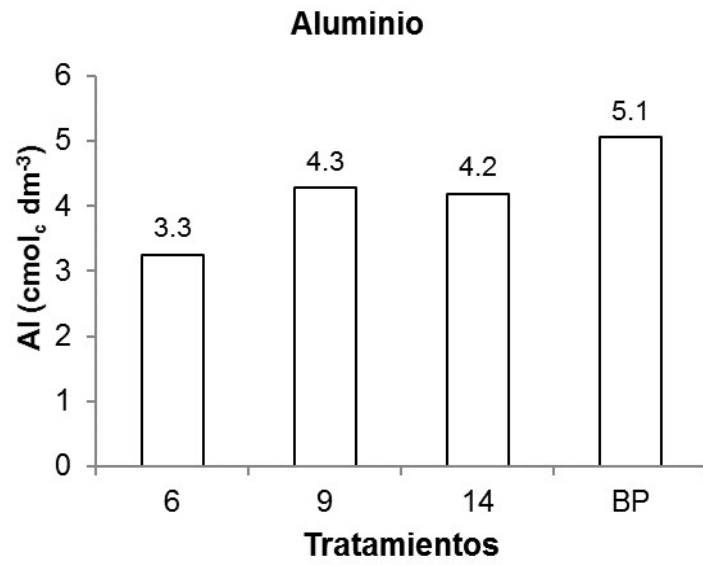
Anexo 19. Valores medios del potasio del suelo en la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.



Anexo 20. Valores medios del calcio del suelo en la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.



Anexo 21. Valores medios del magnesio del suelo en la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.



Anexo 22. Valores medios del aluminio del suelo en la camada de 0 – 10 cm de profundidad de las áreas en estudio.