

EVALUACIÓN DE LODOS PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE
EFLUENTES DE LA INDUSTRIA DE PALMICOLA Y SU USO NUTRICIONAL EN
VIVERO DE *Elaeis guineensis* Jack



ANDREA LIZETH ONOFRE REY
MÓNICA JULIANA RIVERA HERRERA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERIA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO
2021

EVALUACIÓN DE LODOS PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE
EFLUENTES DE LA INDUSTRIA DE PALMICOLA Y SU USO NUTRICIONAL EN
VIVERO DE *Elaeis guineensis* Jack

ANDREA LIZETH ONOFRE REY
MÓNICA JULIANA RIVERA HERRERA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero ambiental.

Asesor

CESAR AUGUSTO RIVEROS ROMERO
Ingeniero Agrónomo. MSc. agroforestería Tropical

Co-Asesor

CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA
Ingeniero Químico. PhD ingeniería ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2021

Autoridades Académicas

P. JOSÉ GABRIEL MESA ANGULO, O.P.

Rector General

P. EDUARDO GONZÁLEZ GIL, O.P.

Vicerrector Académico General

P. JOSÉ ANTONIO BALAGUERA, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. RODRIGO GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

JULIETH ANDREA SIERRA TABÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

WILLIAM PEÑARANDA ZARATE

Decano Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota De Aceptación

WILLIAM PEÑARANDA ZÁRATE

Decano de Facultad

CESAR AUGUSTO RIVEROS ROMERO

Director Trabajo de Grado

RODRIGO ISAAC VELOSA CAICEDO

Jurado

JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO

Jurado

Villavicencio, Julio de 2021

Dedicatoria

En memoria de mi madre, que con su ejemplo me enseñó a persistir en los sueños, por brindarme fuerza y estabilidad emocional desde pequeña, por creer en mis habilidades y sobre todo sentir mis logros como los suyos.

A mi hermano que con palabras fuertes y siempre con actitud ensanchada me hizo ver que yo podía dar más, así mismo me aconsejó e intervino cuando lo necesité.

A mis hijos que a pesar de sus cortas edades me dieron determinación, afecto en los momentos más difíciles, me impulsaron a exigirme cada día para conseguir mis metas, por no cuestionar mis decisiones y sobre todo por sacrificar el tiempo de calidad juntos.

A mi pareja, por motivarme, darme fuerza y apoyarme de manera incondicional, por ser parte de mi proceso de resiliencia y siempre estar dispuesto a escucharme para encontrar soluciones, por acompañarme siempre en cada travesía por donde nos condujo este proyecto.

Andrea Onofre

Dedicado a mis padres que con su esfuerzo me han regalado el privilegio de recorrer este camino de tanto aprendizaje y crecimiento personal, a ellos por siempre confiar en mis capacidades, acompañarme en mis momentos de frustración e impulsarme a dar siempre lo mejor de mí.

A mis hermanos que siempre estuvieron dispuestos a apoyarme durante la realización de este trabajo y con palabras de ánimo me acompañaron hasta su culminación. A mi sobrinita, que con dulzura me ha motivado a ser mi mejor versión.

A ustedes, mi familia, muchas gracias.

Mónica Rivera

Agradecimientos

En primera instancia queremos agradecer a Dios por permitirnos culminar nuestro proceso de educación superior, por no desampararnos y motivarnos durante el camino hacia nuestra meta profesional, que engloba diversos momentos de alegría, tristezas, logros y derrotas en los que se forjaron amistades que hicieron mejor nuestra experiencia en la universidad.

A nuestra Alma Mater por brindarnos las herramientas para avanzar pese a las dificultades, por confiar en nuestras capacidades e impulsarnos a ser cada día mejores profesionales.

A la empresa Oleaginosas San Marcos S.A. por abrirnos sus puertas, contestar a nuestra solicitud y recibirnos de la mejor manera, brindándonos así la oportunidad de desarrollar nuestro proyecto investigativo.

A nuestro director y codirector de trabajo de grado ingenieros Cesar Augusto Riveros y Christian José Rojas por la paciencia y exigencia, por aportarnos sus valiosos conocimientos para la correcta orientación de nuestra tesis de grado.

A nuestra decana y docentes que hicieron parte del proceso de formación y ofrecieron sus conocimientos con paciencia y dedicación, en especial a la docente Alfonsina Bocanegra que fue incondicional durante el proceso de construcción de este trabajo investigativo.

Tabla de contenido

Resumen	14
Abstract	15
Introducción	16
1. Planteamiento del problema.....	18
2. Objetivos.....	20
2.1 Objetivo general	20
2.2 Objetivos específicos	20
3. Justificación.....	21
4. Alcance	23
5. Antecedentes.....	24
6. Marco referencial	27
6.1 Marco teórico.....	27
6.1.1 Generalidades de la palma de aceite	27
6.1.2 Producción de aceite de palma Colombia-Meta	27
6.1.3 Obtención del lodo seco para cultivos de palma.....	28
6.1.4 Requerimiento nutricional de la palma africana	28
6.2 Marco Conceptual	30
6.2.1 Secador solar de invernadero	30
6.2.2 Medición morfométrica de la palma de aceite africana.....	32
6.2.2.1 Medición de diferentes características individuales de cada plántula.....	32
6.2.3 Tipos de viveros plántulas	33
6.2.4 Diseño de bloques completos al azar (DBCA).....	33
6.2.5 Análisis de varianza (ANOVA)	34
6.2.6 Prueba de hipótesis o prueba F.....	36
6.3 Marco Legal	36
7. Metodología	37

7.1 Fase 1: Obtención y secado de la muestra de lodo residual.....	37
7.1.1 Muestreo compuesto	37
7.1.2 Deshidratación de lodos.....	37
7.1.3 Preparación de tratamientos con lodo seco y fertilizante urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	38
7.2 Fase 2: Análisis fisicoquímico del lodo residual y suelo de vivero.....	39
7.2.1 Obtención y almacenamiento de muestras para aplicación de métodos analíticos	39
7.2.2 Métodos analíticos aplicados	40
7.3 Fase 3: Montaje experimental y manejo de plántulas	42
7.3.1 Extracción y acondicionamiento del suelo para llenado de bolsas	42
7.3.2 Trasplante de plántulas y aplicación de fertilizantes.....	43
7.3.3 Identificación y trazado de la zona de vivero.	43
7.4 Fase 4: Cuidados de vivero y medidas morfométricas	44
7.4.1 Medidas morfométricas.	44
7.5 Análisis estadístico de los datos	46
8. Resultados y análisis de resultados	47
8.1 Deshidratación de lodos de la industria de palma africana.....	47
8.1.1 Variación de propiedades físicas durante la deshidratación	48
8.1.2 Variación de propiedades químicas durante la deshidratación	49
8.2 Caracterización nutricional de lodos deshidratados y análisis del suelo para llenado de bolsas de vivero.....	51
8.3 Comparación del contenido nutricional del lodo seco con la Norma Técnica Colombiana 5167.....	54
8.4 Análisis foliares de plántulas de palma africana fertilizadas con lodo seco y urea	56
8.4.1 Número de hojas emitidas y área foliar.....	56
8.4.2 Diámetro del tallo.....	59
8.4.3 Altura de palma y longitud de hojas.	61
8.4.4 Niveles de coloración y presencia de moteados.....	64
9. Impacto social y humanístico.....	67

Conclusiones	68
Recomendaciones.....	70
Referencias Bibliográficas	71
Apéndices.....	79

Lista de tablas

Tabla 1. Programa de fertilización líquida para previvero utilizado en algunas plantaciones de la zona central de Colombia.....	29
Tabla 2. Programa de fertilización sólida para vivero utilizado para algunas plantaciones de la zona central de Colombia.....	29
Tabla 3. Composición teórica de lodos de fondo de la producción de palma africana.	30
Tabla 4. Requerimiento nutricional exigidos por la NTC 5167 para clasificación como fertilizantes orgánico- minerales.	30
Tabla 5. Análisis de varianza de un diseño de bloques completos al azar.....	35
Tabla 6. Composición de los tratamientos establecidos para el acondicionamiento del suelo de vivero de plántulas de palma africana.	39
Tabla 7. Métodos analíticos para medición de parámetros fisicoquímicos.	40
Tabla 8. Procedimiento para el registro de medidas morfométricas en plántulas de palma.	44
Tabla 9. Valores fisicoquímicos registrados durante la deshidratación de la muestra de lodo. ..	47
Tabla 10. Descripción fisicoquímica del sustrato utilizado para llenado de bolsas de vivero. ...	51
Tabla 11. Contenido de elementos nutritivos y propiedades fisicoquímicas registrados en la muestra de lodos de la industria palmícola del Meta.....	53
Tabla 12. Composición nutricional del lodo seco y mínimo garantizable (%) exigido en la NTC 5167 para clasificación como fertilizantes orgánico- minerales.....	54
Tabla 13 Análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la variable “número de hojas emitidas” obtenidas en el Software SPSS.....	56
Tabla 14. Análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la variable “Área foliar”	56
Tabla 15. Análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la variable “Diámetro de tallo” Obtenido en el Software SPSS.....	59
Tabla 16. Análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la variable “altura de la palma”	61
Tabla 17. Análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la variable “longitud de hoja”	61

Lista de figuras

Figura 1. Zonas de Montaje Experimental- Finca Los Ángeles-Vereda Chaparral.	23
Figura 2. Línea de tiempo de la utilización de lodos de fondo en la producción de palma africana.	26
Figura 3. Esquema de aleatorización para un DBCA con a tratamientos y b bloques.	34
Figura 4. Criterios para rechazar a hipótesis nula utilizando la distribución F de Snedecor (Ver tabla en apéndice C).	36
Figura 5. Construcción de la zona de deshidratación basado en un secador solar de invernadero y esparcimiento del lodo residual proveniente de una industria palmícola del Meta.	38
Figura 6. Extracción y acondicionamiento de suelo para llenado de bolsas de vivero.	42
Figura 7. Trasplante de plántulas y aplicación de fertilizante en círculo.	43
Figura 8. Vivero de plántulas de palma africana.	44
Figura 9. Porcentaje de pérdidas de humedad con respecto a la temperatura ambiente.	47
Figura 10. Variaciones en textura y color del lodo observados durante la deshidratación.	49
Figura 11. Correlación de Pearson entre porcentaje de humedad y los niveles de pH y conductividad registrados durante la deshidratación.	50
Figura 12. Promedio de hojas emitidas por tratamientos durante los 120 días de cultivo.	57
Figura 13. Promedio de crecimiento foliar por tratamientos durante los 120 días de cultivo.	57
Figura 14. Promedio de crecimiento de tallo por tratamiento durante los 120 días de cultivo. ..	60
Figura 15. Promedio de altura de la palma por tratamiento durante los 120 días de cultivo.	62
Figura 16. Promedio de longitud de la hoja por tratamiento durante los 120 días de cultivo.	62
Figura 17. Frecuencia de moteado por tratamiento observado durante los 120 días de cultivo. ..	64
Figura 18. Niveles de coloración en plántulas del tratamiento 1 (100% lodo seco), durante 120 días de cultivo.	65
Figura 19. Niveles de coloración en plántulas del tratamiento 2 (75% lodo seco-25% urea), durante 120 días de cultivo.	65
Figura 20. Niveles de coloración en plántulas del tratamiento 3 (50% lodo seco-50% urea), durante 120 días de cultivo.	65

Figura 21. Niveles de coloración en plántulas del tratamiento 4 (75%urea-25% lodo seco), durante 120 días de cultivo.....	65
Figura 22. Niveles de coloración en plántulas del tratamiento 5 (100% urea), durante 120 días de cultivo.....	66
Figura 23. Niveles de coloración en plántulas del tratamiento 6 (testigo), durante 120 días de cultivo.....	66

Lista Apéndices

Apéndice A. Resultados de análisis químico de muestra de suelo utilizado para llenado de bolsas.	79
Apéndice B. Resultados de análisis químico de muestra de lodo seco deshidratado.	80
Apéndice C. Normativa legal vigente que sustenta el aprovechamiento de subproductos de la producción y obtención del aceite de palma.	81
Apéndice D. Planilla para registro de humedad de lodo y suelo por el método gravimétrico.....	83
Apéndice E. Tabla valores críticos de la F de distribución de Snedecor.....	83
Apéndice F. Número de hojas registradas por las 30 plántulas de palma africana registrados cada 30 días durante 4 meses de cultivo.	84
Apéndice G. Crecimiento de área foliar registrado por las 30 plántulas de palma africana, cada 30 días durante 4 meses de cultivo.	85
Apéndice H. Propiedades físicas y contenido de nutrientes exigidos por la NTC 5167 para clasificación como fertilizantes orgánico-minerales.	87
Apéndice I. Procedimiento para la conversión de unidades de concentración a porcentaje.	88
Apéndice J. Tabla de elementos en concentraciones de meq/100g y ppm.....	88

Resumen

La producción de aceite de palma se enfrenta a un reto social y ambiental por la generación de grandes cantidades de agua residual durante los procesos de extracción del aceite. Si bien algunos estudios han explorado métodos para reducir los impactos al medio ambiente, son escasas las investigaciones que promueven la transformación de los desechos para uso agrícola. Esta investigación tuvo como propósito determinar el potencial fertilizante de los lodos residuales, obtenidos de lagunas de oxidación de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), mediante aplicación sobre un cultivo de plántulas de palma africana (*Elaeis guineensis* Jack) y análisis foliar. La aplicación de tratamientos se realizó a través de un diseño de bloques completos al azar tomando como tratamientos: 5 fertilizantes con diferentes composiciones lodo seco-urea más un tratamiento testigo y, como bloques: los intervalos de tiempo entre fertilización (día 30, 60, 90 y 120). La metodología tuvo cuatro fases: la primera constó de la deshidratación y preparación del lodo para su aplicación como fertilizante, la segunda fase abordó el análisis fisicoquímico del lodo y el suelo para el vivero, la tercera fase permitió el montaje experimental del vivero y la fertilización de plántulas, y la fase cuatro efectuó el análisis estadístico de las medidas morfométricas registradas en 30 plántulas de palma africana. Los resultados muestran que el lodo deshidratado obtuvo una remoción de 96,93% de humedad contenida en 24 días, además, de registrar contenido de elementos importantes para el crecimiento foliar en las plántulas tales como Nitrógeno (0,75%), calcio (0,30%), Potasio (0,40%), Magnesio (0,30%) y Boro (0,0003%), así mismo otros micronutrientes como el azufre y el cobre. Por otro lado, el tratamiento 2 (75% lodo- 25% urea) presentó los promedios de rendimiento más altos en las variables de número de hojas emitidas (1,1 hoja/mes), crecimiento de área foliar (187,52 cm²/mes) y diámetro del tallo (0,32 cm/mes). Este trabajo pretende ser un aporte para otros estudios que busquen potencializar los lodos de fondo como abono para cultivos de palma africana.

Palabras Clave: Abonos orgánico-minerales, Lodo de fondo, Lodo seco, Lagunas de oxidación, Vivero de palmas.

Abstract

Palm oil production faces a social and environmental challenge due to the generation of large amounts of wastewater during oil extraction processes. Although some studies have explored methods to reduce environmental impacts, there is little research that promotes the transformation of waste for agricultural use. The purpose of this research was to determine the fertilizer potential of waste sludge obtained from the oxidation ponds of a wastewater treatment plant (WWTP), through application to a crop of African palm (*Elaeis guineensis* Jack) seedlings and foliar analysis. The application of treatments was carried out using a randomized complete block design with 5 fertilizers with different compositions of dry sludge-urea plus a control treatment and, as blocks, the time intervals between fertilization (days 30, 60, 90 and 120). The methodology had four phases: the first phase consisted of the dehydration and preparation of the sludge for its application as fertilizer, the second phase dealt with the physicochemical analysis of the sludge and the soil for the nursery, the third phase allowed the experimental assembly of the nursery and the fertilization of seedlings, and the fourth phase carried out the statistical analysis of the morphometric measurements recorded in 30 African palm seedlings. The results show that the dehydrated sludge obtained a removal of 96.93% of moisture content in 24 days, in addition to registering important elements for leaf growth in the seedlings, such as nitrogen (0.75%), calcium (0.30%), potassium (0.40%), magnesium (0.30%) and boron (0.0003%), as well as other micronutrients such as sulfur and copper. On the other hand, treatment 2 (75% mud-25% urea) presented the highest yield averages in the variables of number of leaves emitted (1.1 leaf/month), leaf area growth (187.52 cm²/month) and stem diameter (0.32 cm/month). This work is intended to be a contribution to other studies that seek to use bottom sludge as fertilizer for African palm crops.

Keyword: Organic-mineral fertilizers, Bottom sludge, Dry sludge, Oxidation ponds, Palm nursery.

Introducción

Las aguas residuales de las plantas de beneficio de aceite de palma requieren ser tratadas antes de ser vertidas a aguas superficiales o ser incorporadas en algún tipo de uso en riegos. Este tipo de tratamientos genera grandes cantidades de agua purificada y abono orgánico, promoviendo la conversión de los residuos en recursos para los cultivos de palma de las industrias. (Santos et al., 2000)

La cantidad de aguas residuales de plantas de beneficio de aceite de palma son producidas principalmente en los procesos de esterilización de la fruta y en la clarificación del aceite, en promedio una planta típica de beneficio de aceite de palma produce aproximadamente $0,8 \text{ m}^3$ de efluente por cada tonelada procesada de racimo de fruta fresca, una planta extractora de medianas dimensiones puede producir 120.000 m^3 de aguas residuales. (Althausen, 2016, págs. 31-37).

Las aguas residuales de las plantas extractoras de aceites de palma contienen características agresivas para ser vertidas directamente a una fuente hídrica, contienen alta carga orgánica, con una demanda química de oxígeno (DQO) de 55000 mg/l y una demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 25000 mg/l , sólidos suspendidos de 20000 mg/l , temperatura alta entre $70 - 80^\circ\text{C}$ y un pH ácido entre 4 y 5. Por lo anterior, se requiere de un tratamiento previo al uso de los residuos para la reutilización en suelos o de la descarga a una fuente de agua superficial. Para el tratamiento de las aguas resultantes de las plantas de beneficio de aceite de palma, usualmente se usan lagunas abiertas de oxidación, que son procesos biológicos que implementan bacterias que digieren la materia orgánica, alcanzando la remoción hasta de 1500 mg/l . Los lodos de fondo resultantes de las lagunas de oxidación se acumulan en el fondo de este y van reduciendo el espacio disponible por lo que deben ser extraídos. El no aprovechamiento de estos lodos contribuye un problema ambiental y económico como: la emisión de gases de efecto invernadero, la acumulación de los rellenos sanitarios y el costo de la extracción y transporte para la disposición final de los lodos. (Althausen, 2016, págs. 31-37).

Teniendo en cuenta lo anterior, se halló la necesidad de proponer un sistema que resulte amigable con el medio ambiente, en el que se pueda aprovechar el material orgánico, incluidos sus macros y micronutrientes. Para esto se realizó una comparación con la normatividad existente para el adecuado manejo de estos residuos y la aplicación en el suelo.

En esta investigación se evaluó el potencial de fertilización de los lodos de fondo de una laguna de oxidación de una planta de beneficio de aceite de palma, mediante la estabilización del lodo por deshidratación, puesto que debe estar en condiciones óptimas de humedad y alto contenido de nutrientes para la aplicación en el suelo, y el análisis de crecimiento foliar de plántulas de palma africana *Elaeis guineensis* Jack a diferentes composiciones de lodo seco-fertilizante urea, utilizando herramientas estadísticas para determinar el tratamiento de mayor rendimiento en un periodo de cultivo de 120 días.

1. Planteamiento del problema

El cultivo de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jack) es una actividad productiva que supera en 10 veces las hectáreas sembradas de otras plantas oleaginosas. Colombia cuenta con 161 municipios en 21 departamentos que actualmente registran producción de aceite de palma; dicha producción representa el 2,4% de la producción total a nivel mundial lo que consolida al país como el primer productor en América y el cuarto en el mundo. (Fedepalma, 2018).

La producción de aceite de palma alcanzó, para el año 2018, una participación del 5,6% en el PBI (Producto interior bruto) agropecuario y 8% en el del sector agrícola nacional, por lo cual se considera como una de las actividades líderes del agro colombiano. (Fedepalma, 2021).

El aceite de palma tiene potencialidad en el desarrollo de productos comestibles (margarina, manteca, aceite de cocina, etc.), biocombustibles, y otras aplicaciones como producción de jabones y cosméticos por lo tanto cuenta con un elevado potencial económico, sin embargo, durante el proceso productivo y beneficio del fruto se generan múltiples subproductos sólidos y líquidos como las tusas o racimos vacíos, cenizas, fibras, cuesco y lodos de fondo extraídos de lagunas de oxidación; que al no contar con una correcta disposición final generan impactos ambientales sobre las fuentes hídricas superficiales y subterráneas, el suelo y vegetación. (Althausen, 2016, págs. 31-37). El lodo de fondo es un semisólido generado durante el tratamiento biológico de diferentes bacterias aerobias y anaerobias que digieren la materia orgánica presente en los efluentes de la planta extractora en una serie de lagunas abiertas, que a pesar de reducir hasta 1500 mg/l la DQO (Demanda química de oxígeno) en la mayoría de los casos no presentan condiciones ideales de mezcla y temperatura por lo tanto la materia orgánica digerida se acumula en el fondo de las lagunas reduciendo la capacidad del sistema; una planta de producción de 30 toneladas de RFF (Racimos de Fruta Fresca) por hora produce 450 m³ de efluente y 15 m³ de lodo por día, es decir que la producción de 150000 toneladas de RFF por año genera hasta 5475 m³ de lodo. (Ramírez et al., 2011). El lodo, al igual que la fibra y demás subproductos tiene un importante contenido de nutrientes como nitrógeno, potasio, calcio, magnesio, materia orgánica y otros micronutrientes que son esenciales en el suelo, ya que permiten mayor retención de agua, mejoramiento de estructura, textura de suelos y mayor coexistencia de microorganismos que estimulan la producción de vitaminas y aminoácidos. (Vargas & Liliana, 2018). No obstante, en la mayoría de los casos estos lodos son vertidos en cuerpos hídricos y dispuestos en el ambiente

(rellenos sanitarios a cielo abierto) sin ningún tratamiento previo. (Cortés et al., 2006). debido a que requieren de una deshidratación del 80% para su transformación en fertilizante, lo que implica costos por gasto energético o simplemente porque se subestima su valor como suplemento nutricional para producción de palma. (Avendaño Cárdenas & Martínez González, 2015) La inadecuada disposición de estos lodos genera contaminación en fuentes hídricas y altas emisiones de gases como Dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4).

La presente investigación tiene como objetivo el análisis del potencial nutricional de los lodos en la producción de palma africana a nivel de vivero en el departamento del Meta; aplicando métodos cuantitativos y cualitativos que permitirán la comparación del rendimiento del lodo seco frente a un fertilizante de uso convencional con el fin de determinar ¿Cómo será el potencial fertilizante de los lodos de fondo generados en la industria palmícola con diferentes proporciones de lodo seco – urea aplicados sobre un cultivo de plántulas de *Elaeis guineensis* Jack en un periodo de 120 días, y en condiciones de cultivo del departamento del Meta?

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar el potencial fertilizante de lodos de fondo provenientes de una planta extractora de aceite de palma africana, mediante su aplicación en plántulas de *Elaeis guineensis* Jack. con el fin de fomentar su uso como abono orgánico y reducir los impactos ambientales.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar las propiedades fisicoquímicas de los lodos de fondo mediante el análisis de una muestra compuesta extraída de una laguna de estabilización ubicada en una empresa palmicultora del Meta.
- Analizar el potencial fertilizante de los lodos de fondo frente a los requerimientos nutricionales de la palma africana en etapa de vivero (3 a 8 meses de edad) mediante aplicación de diferentes dosis de lodo seco - urea y estudio de las medidas morfométricas registradas en 30 plántulas durante 120 días.
- Estimar la viabilidad de lodo seco como fertilizante comparando la composición fisicoquímica de los lodos de fondo con los parámetros de calidad exigidos por la NTC 5167 para abonos orgánico-minerales sólidos.

3. Justificación.

Las industrias extractoras de aceite de palma han implementado el uso de plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de disminuir los residuos contaminantes provenientes del efluente resultante de la planta de beneficio de obtención de aceite. El uso frecuente de piscinas de oxidación para la disminución y/o degradación de materia orgánica y contaminantes por medio de bacterias, ha resuelto el tratamiento de grandes dimensiones de agua que son vertidas en fuentes hídricas, permitiendo dar un tratamiento viable, disminuyendo el impacto negativo al medio ambiente. Teniendo en cuenta lo anterior, en las piscinas de oxidación surgen un tipo de residuo sedimentable (lodo de fondo) que puede generar problemas, debido a que, por la acumulación de este, las piscinas pierden la eficiencia de remoción. (Ramírez et al., 2011). El manejo de los lodos de fondo genera pérdidas económicas a la empresa ya que tiene un costo alto de transporte y gasto energético para su disposición final. (Glatstein, 2017), por lo que las organizaciones requieren de alternativas económicas y eficaces que permitan el aprovechamiento de estos semisólidos, o lodos de fondo.

Diferentes investigaciones han permitido conocer las propiedades fisicoquímicas de los lodos de fondo, los cuales tienen un contenido importante de macronutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, y micronutrientes como hierro, manganeso, boro, cobre y zinc (Avendaño Cárdenas & Martínez González, 2015). Estos micro y macronutrientes permiten una mejor aireación del suelo, infiltración del agua, un crecimiento óptimo de las plantas e incremento en la producción de frutos de palma africana. (Vargas & Liliana, 2018). Por otra parte, los lodos también contienen importantes cantidades de materia orgánica que permite, mediante el intercambio catiónico, mayor retención de nutrientes esenciales como el magnesio, calcio y potasio valorados por el potencial de sustitución que tienen frente a fertilizantes químicos convencionales. A pesar de esto, muchas veces estos lodos terminan en cárcavas, incinerados o en rellenos sanitarios debido a la falta de gestión para adecuarlos en usos como fertilización para hortícolas, plantas ornamentales, mejoramiento de suelos, etc. (Torres et al., 2005).

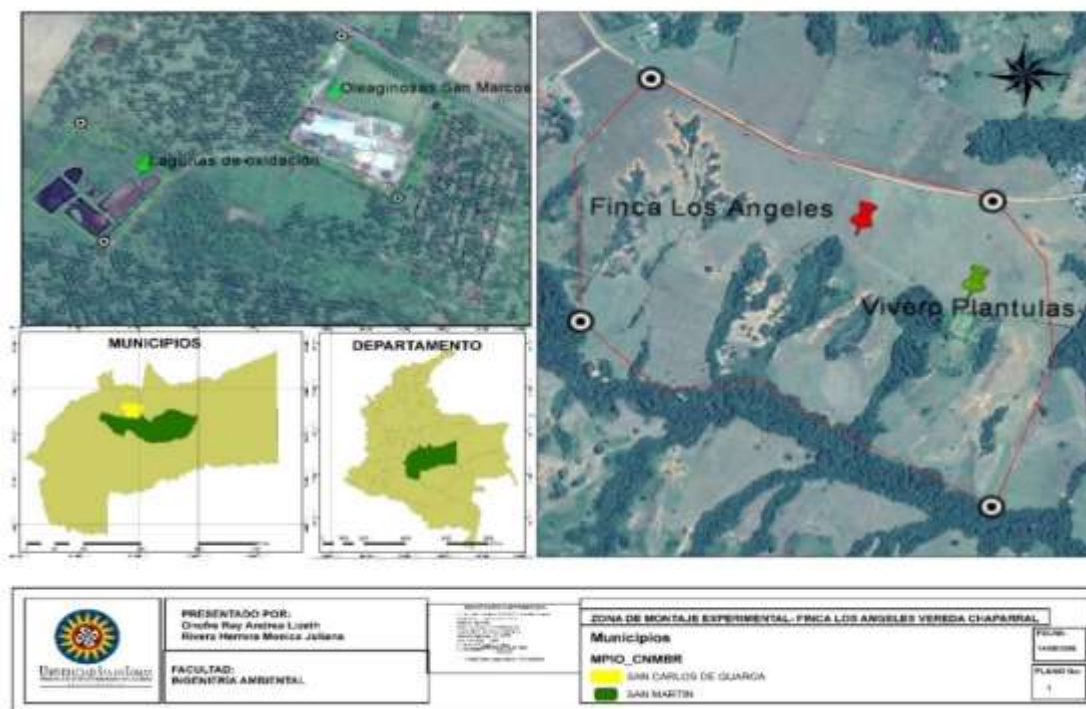
De acuerdo con lo anterior, se requieren conocer procedimientos que permitan la estabilización de lodos provenientes de lagunas anaerobias los cuales necesitan de una deshidratación para reducir su volumen y cantidad de materia orgánica y así poder ser empleados como abono orgánico en suelos y cultivos (Cortés, et al., 2006)

Es pertinente el desarrollo de un estudio que aplique técnicas de secado de lodos económicos, por ejemplo, los lechos de secado, que no representen un gasto energético alto, y permitan la obtención del lodo en base seca (humedad $< 15\%$) para su posterior evaluación fisicoquímica y de potencial nutricional en la fertilización de plántulas de palma africana, brindando una disposición final más sostenible. Además de esto, el estudio permitiría un mayor acercamiento a los porcentajes de abonos orgánicos óptimos para un crecimiento eficiente y productivo en los primeros meses de cultivo de la palma africana.

4. Alcance

El proyecto requirió del acercamiento con una empresa extractora de aceite de palma africana del Meta, generadora de lodos de fondo mediante lagunas de oxidación. La empresa Oleaginosas San Marcos S.A ubicada en San Carlos de Guaroa cuenta con planta de tratamiento de producción y transformación de la semilla de palma, y cuatro lagunas de oxidación para tratamiento de aguas residuales, de las cuales se extrajo el lodo de fondo para deshidratación y aplicación como fertilizante orgánico en un vivero de plántulas de *Elaeis guineensis* Jack, que se ubicó en el municipio San Martín – Meta, localizado en el piedemonte de la cordillera oriental. El vivero se instaló en la finca Los Ángeles (86 hectáreas de área) con coordenadas geográficas 73°27'37,162''W 3°31'37,162''N en la vereda Chaparral, el trayecto cuenta con un 80% de vías terciarias, se puede observar en el transcurso del recorrido la utilización de suelo en actividades agropecuarias como: cultivos de palma africana, patilla, piña y principalmente crianza de ganado bovino de producción de carne y leche. Este proyecto de investigación se llevó a cabo en un transcurso de aproximadamente de 6 meses, desde el momento de la recolección de lodos, hasta la última toma de medidas foliares de las plántulas de palma africana.

Figura 1. Zonas de Montaje Experimental- Finca Los Ángeles-Vereda Chaparral.



Nota. Por Onofre A, Rivera M, 2021

5. Antecedentes

El sureste asiático es uno de los principales abastecedores de aceite de palma a nivel mundial, principalmente Malasia e Indonesia, al haber una gran producción se tienen experiencias relevantes en cuanto al tratamiento de los residuos de los procesos de extracción. (Basiron & Abdullah, 1996). En Malasia se realizó un estudio en un periodo de dos años en el que se ejecutó el riego por aspersión del efluente y el lodo producto de los procesos de obtención de aceite de palma, sobre un cultivo del mismo; donde la parte foliar de las palmas aumentaron en nutrientes tales como fosforo, nitrógeno, calcio, magnesio, entre otros. Adicionalmente, no se halló rastro de contaminación, una muestra de esto es que la DBO fue menor de los 20 ppm y algunos metales inferiores a 1,5 ppm. Se destaca esta investigación pues no optó por la deshidratación de los lodos y obtuvo resultados beneficiosos para el cultivo de palma africana. (Wun et al., 2017) Por otro lado, el continente africano ha llevado a cabo la explotación de cultivos de palma africana en los bosques naturales y seminaturales de su territorio antes de que se cultivara en Asia, Centro y Suramérica, haciéndola el primero en tener ideas de manejo de subproductos. En Nigeria, (2009). Se evaluó las características y cambios fisicoquímicos del compostaje de fibra mesocarpio, lodos anaeróbicos efluentes de proceso anaerobio de la extracción de aceite de palma africana, con el fin de disminuir los impactos negativos que la industria de palma pueda generar. El compostaje se creó a partir de una tonelada de fibra de mesocarpio de palma, y se le adiciono lodos de una laguna anaeróbica. Esta mezcla fue dispuesta en un lecho de secado tecnificado el cual proporcionaba calor haciendo pasar agua caliente por medio de drenajes debajo de la cubierta de arena. Al cabo de 50 días se obtuvo una humedad del compost de 55% a 60%, para posteriormente hacer muestreos en el laboratorio comprobando la existencia de contenido de materia orgánica y nutrientes necesarios para el buen desarrollo de las palmas. (Hock, 2009).

La industria extractora de aceite de palma africana en Colombia, tiene un índice de demanda en aumento para el mercado local y de exportación. Los aceites comestibles y el desarrollo del mercado de biodiesel produjeron un crecimiento en materia prima notorio para los últimos años. Los procesos para obtención del aceite de palma generan grandes cantidades de residuos los cuales no tienen ningún tipo de utilidad y pasan a ser considerados desechos. A través del tiempo ha surgido el interés por la investigación de métodos para disminuir los impactos generados por los procesos ejecutados en estas industrias, una optimización de los procesos dentro

de una organización puede generar mayor productividad y una contribución positiva al medio ambiente.

En Colombia; Pérez Plata y Ríos Arredondo (2018), realizó un diseño conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales para una planta extractora de aceite de palma, en la que determinó que los efluentes vertidos al cuerpo de agua tenían parámetros inapropiados según la norma que los rige; por lo anterior, sugirió la producción de compost con la biomasa sólida extraída de los procesos de obtención de aceite y los lodos de las lagunas anaerobias, los cuales pueden ser apilados para dar inicio a una descomposición por oxidación, donde las bacterias actúan para descomponer las ceras, proteínas y hemicelulosa posteriormente, al transcurrir 3 meses desde la recolección se obtiene un compost que se puede suministrar como fertilizante al cultivo de aceite.

En cuanto a la empresa Indupalma S.A, en el año 2015 realizó una investigación experimental con el objetivo de obtener una mejora en las condiciones del suelo por medio de la aplicación de un fertilizante no convencional, tomando los lodos resultantes de lagunas de oxidación del proceso de extracción de aceite y dejándolos por un periodo de seis meses en lechos de secados al aire libre, adicionalmente tomaron una muestra de lodos y lo llevaron al laboratorio para determinar los porcentajes de carbono, nitrógeno y fósforo. Para estudiar el rendimiento del fertilizante en esta investigación, tomaron diferentes porcentajes de fertilizante lodo-fertilizante convencional para adicionarlo a palmas jóvenes, durante seis meses, donde pudieron concluir que porcentaje fue el que más rendimiento obtuvo (50% fertilizante lodo-50% fertilizante convencional). (Avendaño Cárdenas & Martínez González, 2015). En el año 2011, el centro de investigaciones de palma (Cenipalma) realizó un estudio para dar manejo a los subproductos del beneficio de la palma de aceite, con el objetivo de maximizar el uso eficiente de residuos y minimizar la contaminación emitida por estas empresas. Dentro de la investigación se destacó el contenido de nutrientes aprovechables para el cultivo, contenido en los lodos de fondo de lagunas de oxidación, ahora bien, que para obtener estos nutrientes era necesario que las lagunas de oxidación fueran eficientes en su mantenimiento de bacterias anaerobias. Por otra parte, para obtener el secado de lodos apropiado, debe contener una humedad por debajo del 75%, para eso se recomienda que los lechos de secado contengan una cubierta de arena con un espesor de entre 20-30 cm de espesor, una capa de grava de 20 cm y así se permite un adecuado drenado del lodo en un periodo equivalente a 2 o 3 semanas. (Ramírez et al., 2011).

Figura 2. Línea de tiempo de la utilización de lodos de fondo en la producción de palma africana.

Nota. Por Onofre A, Rivera M, 2021

6. Marco referencial

6.1 Marco teórico

6.1.1 Generalidades de la palma de aceite

La palma africana (*Elaeis guineensis* Jack), es una planta oleaginosa caracterizada por crecer en climas cálidos y en altitudes de 0 – 500 msnm, su crecimiento consta de cinco fases: embrión, plántula, establecimiento, fase adulta vegetativa y reproductiva. Está conformada por un tallo tipo pleonástico, quiere decir que las inflorescencias aparecen en las axilas de las hojas a medida que hay un crecimiento vegetativo; tiene un estípite erecto que en el transcurso del tiempo las bases peciolares de las hojas que se caen continúan visibles en el tallo, apreciando de esta manera las cicatrices en forma de entrenudos. Las hojas tienen un lento crecimiento inicial, dura entre dos a tres años hasta abrir los foliolos del centro de la corona. (Forero et al., 2012). La palma de aceite es una especie que produce inflorescencias masculina y femenina por separado, la inflorescencia femenina se convierte en fruto en el transcurso de cinco meses después de la apertura de las flores, este fruto posee varias capas: pericarpio, mesocarpio y endocarpio. En las capas pericarpio y el mesocarpio es donde se encuentra la pulpa de la cual se extrae el aceite, por último, el endocarpio es donde se halla la nuez de esta se extrae el aceite de palmiste. (TECHNOSERVE, 2009).

Este tipo de cultivo tiene alto rendimiento ya que la producción puede extenderse hasta 50 años, sin embargo, debido a que posee dificultades en la recolección del fruto por la altura del tallo se acortan los tiempos de producción de 22-25 años. Adicionalmente, el rendimiento de la obtención de aceite por hectárea está estimada entre 3000 - 5000 kg de aceite y 600 - 1000 kg de palmiste. (Torres et al., 2010).

6.1.2 Producción de aceite de palma Colombia-Meta

Colombia es el cuarto productor de aceite de palma africana a nivel mundial y el primero en América, cuenta con 65000 hectáreas sembradas a nivel nacional, y con un total de ventas aproximadas anuales de 1.620.624 toneladas. La versatilidad del aceite de palma permite diferentes usos en las industrias de alimento, oleoquímica energías renovables y de productos derivados de

la biomasa. El departamento del meta hasta el año 2019 contaba con 135.684 hectáreas en producción y 161.737 hectáreas sembradas, son 21 municipios palmeros con una productividad de 3.4 toneladas de aceite de palma crudo por hectárea; entre los que se destacan: San Carlos de Guaroa (30.597 Ha sembradas), Puerto Gaitán (20.421 Ha sembradas) y San Martín (20.281 Ha sembradas). (Mesa Dishington, 2013).

6.1.3 Obtención del lodo seco para cultivos de palma

Los procesos para la obtención del lodo más común en Colombia es el sistema de tratamiento lagunar, inicia en el efluente residual de la planta de beneficio de extracción de aceite de palma, el cual contiene carga orgánica en DBO y DQO, pH bajo y altas temperaturas, este efluente es recibido por el tanque de florentino (trampa de grasas) que permite la recuperación de grasas que se devuelven a la planta de beneficio, el efluente restante se lleva a la laguna ecualizadora que permite el control de pH y la temperatura, posteriormente es dirigido a la laguna anaerobia, donde se descomponen los compuestos orgánicos complejos removiendo el 85% de DQO, seguidamente se lleva el efluente a las lagunas facultativas que remueven las cargas permanentes y generan un residuo de lodos; debido a la humedad contenida en los lodos se disponen en lechos de secado para la utilización en las plántulas de palma africana. (Avendaño Cárdenas & Martínez González, 2015). Sin embargo, la desventaja del uso de los sistemas estáticos es que no permiten mantener una mezcla homogénea y una temperatura controlada, estas condiciones dificultan las condiciones óptimas para la digestión por parte de las bacterias (mezcla homogénea y una temperatura de 30 a 37°C. (Torres et al., 2005).

6.1.4 Requerimiento nutricional de la palma africana

Para asegurar el adecuado crecimiento de las plantas de palma africana es necesario suministrar los nutrientes por medio de fertilizaciones, las cuales son únicas para cada situación de vivero, pues varía según el tipo de suelo, clima y los requerimientos de las plántulas. Se requieren estudios de análisis de suelos para poder interpretar los resultados y así definir el diseño de programa específico del vivero, el cual determina qué tipo de fertilizante es óptimo, la dosis por planta y la frecuencia de aplicación. (Franco Bautista, 2003).

Las aplicaciones de fertilizante durante los dos primeros meses de la plántula de palma africana dependen de la calidad del suelo, si es de buena calidad no hay necesidad de aplicación de fertilizantes, es suficiente con los nutrientes que ofrece la almendra de la semilla; en caso contrario, si el suelo es de mala calidad, se opta por la aplicación de fertilizantes solubles completos. (Munévar, 2001).

En las tablas 1 y 2. se aprecia un programa de fertilización usado en los viveros de plantaciones de la zona central de Colombia.

Tabla 1. Programa de fertilización líquida para previvero utilizado en algunas plantaciones de la zona central de Colombia.

Edad Plántulas (semanas)	Tipo Fertilizante y Dosis
4	133g de Nitrón 30 por bomba de 20 litros
5	66.7g de Sulpomag + 66.7g de DAP por bomba de 20 litros
6	66.7g de Sulpomag + 66.7g de DAP por bomba de 20 litros
7	83.3g de Sulpomag + 83.3g de DAP por bomba de 20 litros
8	100g de Sulpomag + 100g de DAP por bomba de 20 litros

Nota. El volumen de mezcla de una bomba de 20 litros es suficiente para aproximadamente 450 plántula. Adaptado de “Manejo de viveros de palma de aceite. Manual técnico” (Franco Bautista, 2003).

Al pasar los dos primeros meses, la aplicación de fertilizantes debe ser determinada por un técnico en manejo de viveros. En esta etapa es recomendable usar nutrientes de formulaciones de gránulo fino cuando es riego por microaspersión y fertilizantes de gránulo grueso cuando es por aspersión de gota gruesa. (Franco Bautista, 2003).

Tabla 2. Programa de fertilización sólida para vivero utilizado para algunas plantaciones de la zona central de Colombia

Edad Plántulas (semanas)	Tipo de Fertilizantes y Dosis (g/plántula)
9-10	5g de 14:14:14:2
11-17	10g de 14:14:14:2
18-19	10 g de 14:14:14:2+10g MGSO ₄
20-21	10g de 14:14:14:2+1g Bórax
22-23	10g de 14:14:14:2
24-25	10g de 14:14:14:2+ 10g MGSO ₄ +15g Nitrón 30+15g DAP

Nota. Las fertilizaciones se realizan en horas de la tarde y después del riego. Adaptado de “Manejo de viveros de palma de aceite. Manual técnico” (Franco Bautista, 2003).

6.2 Marco Conceptual

6.2.1 Secador solar de invernadero

Debido a que el lodo contiene un porcentaje alto de humedad (90%) se requiere que se sequen al aire libre hasta reducirlo a valores por debajo de (75% p/p). (Ramírez et al., 2011), debido a los diferentes procesos de estabilización, los lodos adquieren las siguientes propiedades, sin embargo, para aplicar como fertilizante se acoge a la norma NTC 5167.

Tabla 3. Composición teórica de lodos de fondo de la producción de palma africana.

Parámetro	Unidad	Lodo
pH		8,4
Conductividad	dS/m	11
Carbono Orgánico	%	8,5
Nitrógeno	%	5,9
Fosforo	mg/kg	500
Potasio	meq/100g	31,8
Calcio	meq/100g	41,4
Magnesio	meq/100g	32,2
Sodio	meq/100g	0,7
CIC	meq/100g	11
Azufre	mg/kg	388
Boro	mg/kg	5,1
Cobre	mg/kg	0,9
Manganeso	mg/kg	4,1
Hierro	mg/kg	2,9
Zinc	mg/kg	0,5

Nota. La tabla presenta parámetros fisicoquímicos teóricos de lodos deshidratados provenientes de la producción de palma africana. Adaptado de Ramírez et al. (2011).

Tabla 4. Requerimiento nutricional exigidos por la NTC 5167 para clasificación como fertilizantes orgánico- minerales.

Parámetro	Unidad	Norma NTC 5167
Humedad	%	< 15
pH		>5
Conductividad		N/A
Carbono orgánico	%	> 5
Nitrógeno total	%	Mínimo 2
Fosforo total	%	Mínimo 1
Potasio total	%	Mínimo 2
Calcio total	%	Mínimo 1
Magnesio total	%	Mínimo 1
Sodio		N/A
CIC	meq/100g	Mínimo 30
Azufre total	%	Mínimo 1
Boro	%	Mínimo 0,02
Cobre	%	Mínimo 0,02
Manganeso		Mínimo 0,01
Hierro		Mínimo 0,01
Zinc		Mínimo 0,02
Densidad	g/cc	Máximo 0.6

Nota. * Parámetros fisicoquímicos requeridos por la normatividad para fertilizantes orgánicos-minerales sólidos. Los parámetros que presentan N/A significa que no están vigilados por la norma. Adaptado de la Norma Técnica Colombiana 5167/2011.

El secador solar de invernadero consiste en transformar la energía solar en calórica, por medio de la transposición de una estructura tipo invernadero, con una mecánica de secado de lodos

por deshidratación. Este tipo de estructuras para la deshidratación de lodos tiene como ventajas: minimizar los costes de mantenimiento, ya que no tiene complejidad técnica, reducción en costos de demanda y monetarios por el uso de energía primaria, control sobre el proceso de secado y permite la recuperación de sustratos, este último puede reducir considerablemente la contaminación generada por la disposición final de lodos de aguas residuales. (Díaz, 2016). Sin embargo, este método de secado tiene algunas desventajas como el requerimiento de área extensa para la estructura, la dependencia de las condiciones climáticas y la baja tasa de drenajes que puede generar olores y no permite una eficiente eliminación de patógenos. (Kurt, 2014).

El secador solar de invernadero tiene una infraestructura que consta de una edificación que es cubierta parcial o completamente con láminas gruesas de policarbonato transparente, vidrio o plástico de polietileno con el fin de permitir el ingreso de la radiación solar en su interior. (Rivera, 2019). Esta radiación calienta los objetos que se encuentran dentro, a su vez, se emite una radiación infrarroja de longitud de onda mayor que la solar, las cuales no pueden atravesar el material traslucido, quedando atrapadas y produciendo el calor. (Astudillo Córdoba & Bermeo, 2011). Para mantener una aireación por acción del viento que permita eliminar la humedad interior y mantenerla estable, se recurre a dejar la parte inferior de la infraestructura descubierta o adicionar una malla, otra solución puede ser adquirir un ventilador que realice este proceso (este tipo de elementos puede aumentar el consumo de energías primarias). (Valencia Bonilla, 2008). Convencionalmente se usa una cama solar pavimentada o lechos de secado de arena, una cama solar pavimentada es un área pavimentada de asfalto u hormigón que contienen desagües los cuales permiten recolectar los lixiviados originados por el porcentaje de humedad que contenga el lodo. (Silva Tipantasig, 2019).

El tiempo de secado depende del porcentaje de humedad que se desee dejar en el lodo y de las condiciones climáticas del lugar, el espesor recomendado para lechos de secado de arena es de 200 a 300 mm de espesor. A pesar de ser un método simple, existe la necesidad de una atención operativa, en la que se realice la dispersión del lodo en el secador solar, un mezclado del lodo periódicamente, para que se pueda secar de manera homogénea y una toma de muestras para comprobar en qué porcentaje de humedad se encuentra el lodo. Existe la incorporación de tecnologías para transmitir calor, con el fin de disminuir el tiempo de secado de lodos, en una sola árida, con 30 cm de espesor de lodo se puede alcanzar entre un 40% o 50% de humedad en 30 o 40 días, sin contar con elementos tecnológicos. (Kurt, 2014).

6.2.2 Medición morfométrica de la palma de aceite africana

Las mediciones morfométricas pueden ser tomadas desde que las plántulas están en etapa de vivero, esto permite que haya una mejor selección de las plantas. Para tomar las medidas se necesita referenciar una hoja por planta, a la cual se le llevara a cabo las mediciones de largo de peciolo, área transversal del peciolo, largo de raquis, numero de largo y ancho de foliolos.

6.2.2.1 Medición de diferentes características individuales de cada plántula.

- **Número de hojas verdes:** existe un orden en forma de espiral, tienen dos direcciones, hacia la izquierda o la derecha, una vez identificada la dirección se detecta la hoja número 1 se clasifican por grupos de coronas, que es un grupo de ocho hojas y así se identifica el número final del grupo de coronas, ejemplo si la palma tiene 49 hojas entonces son la corona de la hoja 1,9,17, 25, 33, 41 y 49.
- **La tasa de emisión de hojas:** es el conteo de las hojas identificadas en un periodo de tiempo, se identifica la hoja 1 y se resalta con un color, permite reconocer la cantidad de hojas nuevas.
- **El largo del peciolo:** es la medida tomada a partir del tronco, hasta la inserción del primer foliolo.
- **Largo de raquis:** es la medida de la parte de la hoja que contiene los foliolos, la medida se calcula desde el primer foliolo verdadero, hasta la parte apical de la hoja en la unión de los foliolos terminales.
- **Medición sección transversal del peciolo:** Es usada para conocer la masa foliar, por medio de un vernier se mide el ancho y la altura del punto de inserción del foliolo verdadero.
- **El número de foliolos:** la cuenta de los foliolos se realiza en el lado derecho de la hoja, desde la parte de los foliolos verdaderos, hasta los foliolos terminales en la parte apical. Para el número de foliolos total se usa la siguiente ecuación:
$$\text{Numero de foliolos} = 2 * N$$
- **Ancho y largo de los foliolos:** estas medidas se usan para el cálculo del área foliar, los foliolos que se tienen en cuenta para esta medición son los que se encuentran en la parte

media de la hoja, para tomar el largo del foliolo se hace desde la base de la nervadura central, hasta la punta del foliolo. La medida de ancho se realiza en la parte media del foliolo.

- **Altura del estípite:** Es la altura que hay desde la base del estípite hasta la base peciolar de la hoja.
- **Circunferencia del estípite:** es definido también como el grosor de la palma, se toma alrededor del estípite. (Corzo, 2017)

6.2.3 Tipos de viveros plántulas

Existen dos tipos de viveros, vivero de una fase y vivero de dos fases, la primera consiste en plantar la semilla en bolsas inicialmente grandes se organizan después de tres meses en hileras y hasta la edad de 10 a 12 meses son trasplantadas al lugar definitivo. El vivero de dos fases consiste en plantar la semilla en bolsas pequeñas hasta los tres meses de edad, seguido se trasplantan a bolsas más grandes para luego de 7 a 8 meses ser nuevamente trasplantadas a un lugar definitivo. (Franco Bautista, 2003).

6.2.4 Diseño de bloques completos al azar (DBCA)

El diseño de bloques completos al azar es utilizado en experimentación de campo cuando no es posible garantizar alta homogeneidad en las unidades experimentales, y, por tanto, la respuesta a un mismo tratamiento puede ser significativamente diferente. El bloque corresponde a la partición de la variabilidad existente en el estudio experimental en campo una vez asignados los tratamientos en componentes como: Variación entre los tratamientos, que corresponde a diferencias entre los tratamientos, variación dentro de los bloques y entre bloques. El DBCA se caracteriza porque los tratamientos se asignan de manera aleatoria a las unidades experimentales y todos los tratamientos aparecen solo una vez en cada uno de los bloques, por tanto, de realizarse n repeticiones por tratamiento se tomará el promedio. Los bloques pueden estar constituidos, por ejemplo, por áreas compactas de un campo, diferentes tiempos de aplicación de tratamientos a unidades experimentales, entre otros, y se conforman de manera que, la variación dentro de bloques sea

mínima y máxima entre bloques (Argüelles & Carvajal, 2013). El esquema de aleatorización considerando a) tratamientos que van a compararse y b) bloques se observa en la siguiente figura:

Figura 3. Esquema de aleatorización para un DBCA con a tratamientos y b bloques.



Nota. Representación de un diseño de bloques compuestos al azar. Adaptado de Montgomery (2014).

De acuerdo con Montgomery (2004), el modelo estadístico tradicional del DBCA es el modelo de los efectos y está dado por:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \end{cases}$$

Dónde: μ corresponde a la media global, τ_i es el efecto del tratamiento i -ésimo, β_j es el efecto del bloque j -ésimo y ε_{ij} es el término del error experimental NID $(0, \sigma^2)$ usual. Según (Argüelles & Carvajal, 2013), en un experimento con diseño DBCA el interés se encuentra en probar igualdad de medias de los tratamientos, por lo cual, la principal hipótesis de interés es con respecto al efecto de los tratamientos:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ para al menos una } i$$

Dónde: H_0 = Hipótesis nula, significa que no hay diferencia estadística entre tratamientos.

H_1 = Hipótesis alternativa, al menos un par de tratamientos produce efectos diferentes.

6.2.5 Análisis de varianza (ANOVA)

Los modelos ANOVA son técnicas de análisis multivariante utilizadas en el análisis de datos obtenidos gracias a diseños realizados con una o más variables independientes llamadas “factores” y una variable dependiente llamada “respuesta”, que permiten básicamente comparar las medias de la variable dependiente en J poblaciones con niveles de factores distintos, con el fin de precisar

si “existen diferencias significativas o, si la respuesta en cada población es independiente de los niveles de factores” (Ordaz et al., 2010).

Los modelos ANOVA se clasifican teniendo en cuenta tres criterios: el número de factores (ANOVA *de un factor* y ANOVA *factorial*), el tipo de muestreo efectuado sobre los niveles de los factores o tratamientos (ANOVA *efectos fijos* y ANOVA *efectos aleatorios*), y el tipo de aleatorización para seleccionar las muestras representativas (*independientes* y *relacionadas*).

El análisis de varianza aplicado a un diseño DBCA separa la variación total de los datos analizados en la variación dentro de los tratamientos aplicados más la variación entre tratamientos, y para determinar si hay o no diferencias significativas entre los niveles de los factores o tratamientos se utiliza el estadístico F_o , ya que su valor se toma como criterio de decisión para rechazar la hipótesis nula (H_o) de la siguiente manera:

$$F_o = \frac{\text{Variación entre tratamientos}}{\text{Variación dentro del tratamiento}}$$

De acuerdo con Kuehl (2001). Los valores altos de F sugieren el rechazo de la hipótesis nula. Los componentes del análisis de varianza son: Fuentes de variación (FV) que en el diseño DBCA corresponde a los tratamientos, bloques y error; grados de libertad (G.L.); suma de cuadrados (S.C), cuadrados medios o varianzas (C.M.) y el valor de F_o . A continuación, se presenta la tabla ANOVA para diseño de bloques completos al azar, algunos símbolos y formulas usados para su desarrollo:

Tabla 5. *Análisis de varianza de un diseño de bloques completos al azar.*

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_o
Tratamientos	$SS_{\text{Tratamientos}}$	$a - 1$	$\frac{SS_{\text{Tratamientos}}}{a - 1}$	$\frac{MS_{\text{Tratamientos}}}{MS_E}$
Bloques	SS_{Bloque}	$b - 1$	$\frac{SS_{\text{Bloques}}}{b - 1}$	
Error	SS_E	$(a - 1)(b - 1)$	$\frac{SS_E}{(a - 1)(b - 1)}$	
Total	SS_T	$N - 1$		

Nota. *SS= Suma de cuadrados, SS_E = Suma de cuadrados del error, SS_T =Suma de cuadrados del total, $MS_{\text{tratamiento}}$ = cuadrado medio o varianza de los tratamientos, MS_E = cuadrado medio varianza del error. Adaptado de Montgomery, (2004).

6.2.6 Prueba de hipótesis o prueba F

Se requiere una prueba de hipótesis cuando “la variación en los tratamientos es significativamente mayor que el error experimental aleatorio” (Kuehl, 2001). Para probar la hipótesis se utiliza la distribución de F de Snedecor. donde se utiliza los grados de libertad del tratamiento como numerador y, grados de libertad del error como denominador (Argüelles & Carvajal, 2013), los valores críticos (F_c) obtenidos de la tabla de distribución con probabilidad (p) del 5 % ($\alpha = 0,05$) se compara con el valor de F_o calculado con ANOVA, por tanto, la hipótesis nula (H_o) se rechaza o no teniendo en cuenta lo siguiente:

Figura 4. Criterios para rechazar a hipótesis nula utilizando la distribución F de Snedecor (Ver tabla en apéndice C).

Rechazar la H_o si $\rightarrow F_o > F_c$
Rechazar la H_o si $\rightarrow \text{valor } p < 0,05$

Nota. Adaptado de Kuehl, (2001).

6.3 Marco Legal

La normatividad legal vigente para la correcta gestión de subproductos sólidos y efluentes provenientes de la industria extractora de aceite de palma, requiere de un manejo de los residuos, el cual debe ser documentado y controlado por lo tanto, se implementan regulaciones para definir la clasificación del lodo por sus características, el transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición final, que tenga como fin permitir un adecuado manejo, que no implique negativamente la salud de la población, ni el medio ambiente. La normativa vigente se presenta en el Apéndice C.

7. Metodología

La metodología empleada en el estudio es de tipo experimental de campo adoptando un diseño de bloques completos al azar (DBCA). Para su ejecución se establecieron cuatro fases: la primera, permitió la recolección, deshidratación y preparación física de los lodos de fondo para su posterior aplicación como fertilizante; la segunda fase tuvo como objetivo el análisis fisicoquímico del lodo seco y el suelo de vivero; la fase tres consistió en el montaje experimental del vivero y fertilización de plántulas con los 5 tratamientos lodo seco-urea; por último, la fase cuatro permitió análisis estadístico de las medidas morfométricas registradas en las 30 plántulas de palma africana empleadas para el estudio, lo anterior mediante análisis de varianza (ANOVA) para un diseño DBCA y prueba de Duncan para comparación de medias entre los tratamientos.

7.1 Fase 1: Obtención y secado de la muestra de lodo residual

Durante esta fase se recolectó una muestra compuesta de lodos de fondo de la laguna primaria o de estabilización de la empresa OLEAGINOSAS SAN MARCOS S.A. ubicada en el municipio de San Carlos de Guaroa-Meta, mediante un muestreo aleatorio simple teniendo en cuenta las directrices de la NTC-ISO 5667-13; que especifica el uso de contenedores de polietileno para el almacenamiento de lodos y utensilios de acero para su recolección. Además, para efectos de seguridad, todo el proceso de muestreo se ejecutó adoptando códigos estrictos de higiene personal, uso de guantes, tapabocas y botas de caucho.

7.1.1 Muestreo compuesto

Para esta actividad se solicitó el acompañamiento de un técnico del área de manejo de aguas residuales. Se realizó el muestreo a lo largo de la laguna aerobia utilizando una pala de acero inoxidable; se tomaron muestras de aproximadamente 5 kilogramos hasta obtener una muestra total de 83 kilogramos, la cual se almacenó en un contenedor de plástico sellado herméticamente hasta el área de deshidratación.

7.1.2 Deshidratación de lodos

La muestra de 83 kilogramos de lodo se transportó hasta un sitio ventilado previamente construido con bambú y cubierta de polietileno de baja densidad transparente para una adecuada transferencia de calor y protección en época de lluvias, además se habilitó un termómetro tradicional para medición de temperatura ambiente. En el lugar se instaló una estiba de madera con dimensiones de 4 m de largo, 3 m de ancho y 0,07 m de alto, revestida con una geomembrana (PEBD) previamente perforada para drenaje de lixiviados. A pesar de que, en lechos de secado se recomienda que los lodos mantengan un espesor de 20 a 30 cm, por limitación en el tiempo estimado para el desarrollo de este proyecto se optó por un espesor más delgado de 5 cm y se registró el tiempo en días de deshidratado; durante este periodo se extrajo mediante mezcla y cuarteos, una submuestra de aproximadamente 100 gramos cada 3 días para determinar, por el método gravimétrico, porcentaje de humedad hasta obtener un valor igual o inferior a 15%.

Figura 5. Construcción de la zona de deshidratación basado en un secador solar de invernadero y esparcimiento del lodo residual proveniente de una industria palmícola del Meta.



Nota. Instalación de la zona de deshidratación y esparcimiento del lodo con espesor de 5 cm a fin de obtener secado de la muestra en menor tiempo. Por Onofre A, Rivera M, 2021

7.1.3 Preparación de tratamientos con lodo seco y fertilizante urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$

La muestra de lodo seco (<15% humedad) se trasladó desde el área de deshidratación hasta un suelo de concreto limpio y seco, allí se mezcló completamente y se procedió a desmoronar manualmente los gránulos más grandes con el fin de obtener partículas de lodo seco más finos (< 2 mm), posteriormente, con una balanza de precisión se obtuvieron diferentes cantidades de lodo seco y urea para la composición de 5 tratamientos mezclados de la siguiente manera:

Tabla 6. Composición de los tratamientos establecidos para el acondicionamiento del suelo de vivero de plántulas de palma africana.

Tratamiento	Composición	Lodo seco (g/planta)	Urea CO(NH ₂) ₂ (g/planta)
1	100% lodo seco	50	0
2	75% lodo seco-25% urea	37,5	1,8
3	50% lodo seco- 50% urea	25	3,5
4	75 % urea-25% lodo seco	5,3	12,5
5	100% urea	0	7
6	Testigo	0	0

Nota. La fertilización se realizó mensualmente durante un periodo de 4 meses. Por Onofre A, Rivera M, 2021

Se almacenó muestra de 1 kilogramo de lodo seco y suelo extraído (Figura 5) para análisis fisicoquímico. Las cantidades restantes de lodo seco y urea se acopiaron en un sitio cerrado y seco hasta ser utilizados para el acondicionamiento de suelos para el vivero.

7.2 Fase 2: Análisis fisicoquímico del lodo residual y suelo de vivero

El lodo residual seco se interpretó como análogo a un suelo, por lo cual se implementó la NTC 5167 y “Manual de Prácticas de Campo del Laboratorio de Suelos (2013)” para análisis de muestras. Los parámetros de humedad (%H), densidad real (Dr), pH y conductividad se analizaron en el laboratorio de suelos de la universidad Santo Tomás, mientras que la capacidad de intercambio catiónico, y contenido de nitrógeno total (Nt), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), materia orgánica (MO), y otros microelementos (Fe, B, Cu, Mn, Zn, Na, Al) se determinaron contratando los servicios del Laboratorio de Suelos de la Universidad de los Llanos.

7.2.1 Obtención y almacenamiento de muestras para aplicación de métodos analíticos

La obtención de muestras de suelo y lodo seco se realizó mediante el método del cuarteo (NTC 5667-13/1998); por tanto, la muestra total se mezcló tres veces desde la base a la superficie, se

dividió en cuatro partes, se mezcló solo dos y se repitió el procedimiento hasta obtener 1 kilogramo respectivamente. Las muestras se almacenaron en bolsas ziplóc y recipiente térmico hasta el laboratorio.

7.2.2 Métodos analíticos aplicados

La tabla 7 presenta los métodos analíticos utilizados para determinar propiedades fisicoquímicas del lodo de fondo y suelo empleado en el cultivo de plántulas.

Tabla 7. Métodos analíticos para medición de parámetros fisicoquímicos.

Parámetro	Método analítico	Procedimiento
Humedad (%)	Gravimétrico	El método se aplicó por triplicado. Inicialmente se realizó el secado de 3 capsulas de aluminio utilizando un horno a 105 °C durante 30 minutos, posteriormente se registró el peso de las capsulas vacías, se rotularon y adicionó a cada una 20 g de lodo, se introdujeron en el horno durante 24 horas a 105 °C. Culminado el tiempo se registró el peso de la capsula más la muestra seca y se aplicó la siguiente fórmula: $\%H = \frac{\text{Peso de suelo húmedo} - \text{peso de suelo secado a } 105^{\circ}}{\text{peso de suelo húmedo}}$ <i>Ecuación 1.</i> Cálculo de contenido de humedad. Adaptado del “Manual de prácticas” por Gómez Giraldo (2013).
Densidad real	Método del picnómetro	Como primer paso se registró el peso de un picnómetro de 25 ml (Wa) e introdujo 10 gr de muestra, se tomó el peso del picnómetro más muestra (Ws) y agregó agua destilada hasta la mitad de su capacidad, se calentó suavemente hasta ebullición y, posteriormente se agregó más agua hasta llenar el picnómetro, se pesó (Wsw). Por último, se llenó el picnómetro con agua destilada hervida a la que se midió la temperatura (dw) y se registró su peso. (Ww) Con los valores obtenidos se aplicó la siguiente ecuación: $Dr = \frac{dw (Ws - Wa)}{(Ws - Wa) - (Wsw - Ww)}$ <i>Ecuación 2.</i> Cálculo de densidad real. Adaptado del “Manual de prácticas” por Gómez Giraldo (2013)

Tabla 7. Continuación.

Color	Método Munsell	Para determinación de color se empleó la tabla de colores Munsell. Con una espátula de aluminio se tomó muestras del lodo sin secar al horno cada 3 días durante la deshidratación, se observó y registró el color y notación Munsell.
pH y Conductividad	Multiparámetro (Lectura directa)	Inicialmente se diluyó la muestra en una relación 1:1, es decir 10 g de muestra en 10 ml de agua destilada, se agitó hasta homogenizar y dejó en reposo durante 30 minutos. Se introdujo la sonda de pH y registró lecturas estables, después se filtró al vacío el total de la solución y se procedió a introducir la sonda de conductividad hasta registrar lecturas estables.
Materia orgánica (%) *	Titulación de Walkley – Black	En un erlenmeyer vacío (blanco) y uno donde se agregó 0,5 gr de muestra se adicionó 20 ml de $K_2Cr_2O_7$ concentrado y agitó durante 30 minutos. Posteriormente, se agregó 200 ml de agua destilada, 5 ml de H_2PO_4, 3 gotas de difenilamina y se procedió a titulación con sulfato ferroso 1N hasta virar a un verde brillante. Con el volumen de solución ferrosa gastada en la muestra (M), el gastado en el blanco (B), la normalidad de la solución (N) y peso de la muestra (pm), se aplicó la siguiente ecuación: $\%M.O = \frac{0,6708 (B - M)N}{pm}$ Ecuación 3. Cálculo de materia orgánica. Obtenida del manual del SENA por Gómez Giraldo (2013).
Azufre aprovechable (%) *	Test espectrofotométrico	Con solución de Fosfato monobásico de Calcio.
Cationes intercambiables (Ca, Na, Mg, K) *		Con solución de $AcNH_4$, concentración de 7N y pH 7,0.
Elementos menores disponibles (Cu, Zn, Fe, Mn) *		Con solución de DTPA (ácido dietilenotriaminopentaacético)
Fosforo disponible (%) *		Con solución extractora de Bray II.
Boro disponible *		Solución en frío de HCl, concentración de 0,05M.
Aluminio (%)*		Con solución de KCl, concentración de 1N.

Nota: * La concentración de materia orgánica, azufre aprovechable, cationes intercambiables, elementos menores disponibles, fósforo disponible, boro disponible y aluminio se determinaron

contratando los servicios de laboratorio de la Universidad de los Llanos. Ver apéndice A. Por Onofre A, Rivera M, 2021

7.3 Fase 3: Montaje experimental y manejo de plántulas

El montaje de vivero se realizó siguiendo los lineamientos de un diseño de bloques completos al azar. Por consiguiente, la aplicación de tratamientos (establecidos en la Tabla 6) se realizó de forma aleatoria en un total de 30 plántulas de *Elaeis Guineensis* Jack, permitiendo que cada uno de los 6 tratamientos se aplicara sobre 5 unidades experimentales o plántulas. Adicionalmente, se verificó que todas las plántulas contaran con 4 meses de edad, condiciones físicas similares (No hojas emitidas, diámetro tallo, longitud de hoja, área foliar, altura de la palma), y ausencia de enfermedades (libre de moteados y coloración).

7.3.1 Extracción y acondicionamiento del suelo para llenado de bolsas

El suelo para llenado de las 30 bolsas de vivero se extrajo de la finca “Los Ángeles” ubicada en el municipio de San Martín- Meta, a una hora de la zona urbana y coordenadas de 73°27'992” W y 3°31'162” N. Como primer paso, se realizó una calicata con área de 1 m² y se extrajo suelo hasta una profundidad de 50 cm, posteriormente se encaló ya que se registró pH de 4,2, inferior al recomendado para este cultivo, por tanto, se aplicó al voleo 200 gr de cal viva (óxido de calcio (CaO) por cada 100 kg de suelo y mezcló hasta incorporar completamente.

Figura 6. Extracción y acondicionamiento de suelo para llenado de bolsas de vivero.



Nota. Extracción de suelo de la finca “Los Ángeles” ubicada en la vereda Chaparral municipio de San Martín-Meta mediante calicata de 1 m². Por Onofre A, Rivera M, 2021

7.3.2 *Trasplante de plántulas y aplicación de fertilizantes*

Las bolsas de vivero se llenaron y cuidaron por un periodo de cuatro semanas (28 días), durante este tiempo se proporcionó un riego de 10 ml de agua por bolsa diarios con el fin de facilitar la neutralización del suelo. Pasadas las cuatro semanas se procedió con el trasplante de plántulas; para esto se tomó un barreno e hizo un ahoyado en el centro de cada bolsa del vivero, después se retiró manualmente cada una de las bolsas de las plántulas y tomando desde el bloque húmedo formado por las raíces se trasplantó en las bolsas del vivero experimental presionando el suelo hasta dejar una distancia de 2 cm entre el borde de la bolsa y collar de la planta. Por último, se trasladó el total de plántulas al área de vivero, se fertilizó en círculo de manera aleatoria manteniendo 5 repeticiones por cada uno de los fertilizantes establecidos en la Tabla 3, se realizó riego manual y rotuló el número de planta y tratamiento.

Figura 7. *Trasplante de plántulas y aplicación de fertilizante en círculo.*



Nota. Trasplante de plántulas y aplicación de fertilizante en círculo. Técnicas adaptadas de “Manejo de viveros de palma de aceite” por Franco Bautista (2003).

7.3.3 *Identificación y trazado de la zona de vivero*

La instalación del vivero se realizó en la finca “Los Ángeles”. En el sitio se identificó un terreno sin cobertura arbórea o arbustiva e inclinación inferior a 10%, en él se delimitó un área de vivero de 3 m de largo x 4 m de ancho, donde se realizó un trazado rectangular compuesto por 5 filas y 6 columnas para espaciamiento de plántulas. Además, se instaló polisombra para evitar la radiación solar directa y vientos fuertes sobre el cultivo.

Figura 8. Vivero de plántulas de palma africana.

Nota. Trazado de la zona de vivero en Finca “Los Ángeles” vereda Chaparral municipio de San Martín-Meta. Por Onofre A, Rivera M, 2021

7.4 Fase 4: Cuidados de vivero y medidas morfométricas

Las plántulas se cultivaron durante un periodo de 120 días, tiempo en el cual se garantizó un riego manual de 300 ml por plántula cada 2 días durante el primer mes y 350 ml durante los meses restantes, además, se eliminó malezas generadas dentro de las bolsas. La aplicación de los tratamientos junto con las medidas morfométricas se realizó cada 30 días (1 mes).

7.4.1 Medidas morfométricas.

Las medidas morfométricas de las plántulas se realizaron con los siguientes procedimientos:

Tabla 8. Procedimiento para el registro de medidas morfométricas en plántulas de palma.

Parámetros	Ilustración	Procedimiento
Número de hojas emitidas		Inicialmente, se realizó el conteo total de hojas e identificó la hoja completamente abierta, se pintó su raquis y a partir de ella se determinó el número de hojas nuevas en los siguientes muestreos.
Longitud de la hoja (cm)		Se identificó la hoja número 3* de la planta y con ayuda de una cinta métrica se midió desde el extremo del peciolo hasta su ápice.

Tabla 8. Continuación.

Área foliar de la palma (cm²)		De la hoja número 3 se identificó el número de foliolos y se tomó el más grande, se midió el ancho en su parte central (W), longitud (L), y se aplicó la siguiente ecuación: $\text{Area foliar} = (N^{\circ} \text{ de foliolos} * L * W * N^{\circ} \text{ de hojas})$ <i>Ecuación 4.</i> Cálculo de área foliar. Obtenido de “Manual prácticas de campo” Por Gómez Giraldo (2013). En los casos donde la hoja no había desarrollado foliolos se tomó el ancho y longitud total y multiplicó por el número de hojas de la planta.
Diámetro del tallo		Con una cinta métrica se midió el tallo de la planta garantizando que los peciolos de las hojas no entraran en la medición.
Altura de la palma (cm)		Se tomó la cinta métrica y se ubicó en el inicio del primer peciolo del tallo, posteriormente se abrazó el total de hojas de la planta y se registró la medida hasta el ápice de la hoja más larga.
Niveles de coloración y presencia de moteado.		Durante cada muestreo se observó si las hojas presentaron coloración amarilla, anaranjado o marrón principalmente en sus hojas más jóvenes y viejas. Además, se observó el haz y envés de las hojas para registrar presencia de moteados. Se tomaron los siguientes rangos de calificación para coloración: 0 = Ausencia; 1 = coloración leve; 2 = coloración moderada; 3 = coloración severa. Por otra parte, para nivel de moteado se calificó: 1 = Presencia de moteado; 2 = Ausencia.

Nota. * La identificación de la hoja número 3 se realizó observando la dirección de crecimiento en forma de espiral. Se realizó el conteo desde la hoja más abierta u hoja número 1 hasta la 3 y se distinguió pintando levemente su raquis. El registro de medidas morfométricas se realizó el día 1, 30, 60, 90 y 120 de cultivo. Por Onofre A, Rivera M, 2021

7.5 Análisis estadístico de los datos

Los datos de humedad (%), pH, conductividad (mS/cm) del lodo, registrados durante su deshidratación, se analizaron mediante estadística descriptiva, específicamente gráficos combinados y correlación de Pearson.

Para determinar el potencial fertilizante de los lodos deshidratados en plántulas de palma africana se aplicó análisis de varianza (ANOVA) para determinar significancia estadística del estudio, utilizando software estadístico Microsoft Excel, para esto se estableció como variables dependientes las medidas morfométricas y se empleó un diseño de bloques completos al azar (Figura 3) tomando como tratamientos: 5 fertilizantes con diferentes composiciones lodo seco-urea más un tratamiento testigo (Tabla 6) y, como bloques: los intervalos de tiempo entre fertilización (día 30, 60, 90 y 120). Adicionalmente, mediante el paquete estadístico IBM SPSS Statistics 25 se realizó la prueba Duncan para comparación de medias entre los tratamientos.

8. Resultados y análisis de resultados

8.1 Deshidratación de lodos de la industria de palma africana

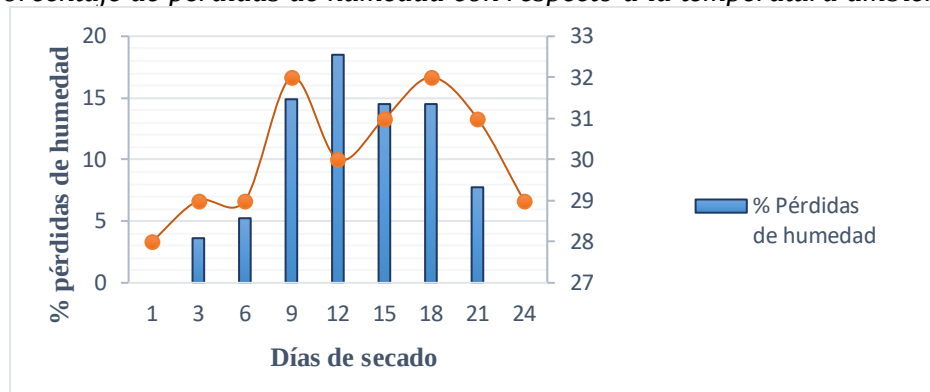
La deshidratación de la muestra total de lodo (83 kilogramos) se efectuó en 24 días. Durante este período, según el Boletín Climatológico Mensual del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2020), se registraron precipitaciones moderadas de 200 a 300 mm y temperaturas máximas de 30 a 32 °C. Como resultado se obtuvo un lodo con humedad de 2,50% es decir, inferior al 15% solicitado por la NTC 5167/2011. A continuación, la tabla 9 presenta valores de humedad registrada, temperatura ambiente y variaciones de pH, conductividad y color durante la deshidratación.

Tabla 9. Valores fisicoquímicos registrados durante la deshidratación de la muestra de lodo.

Días	N.º de muestra	Tº ambiente (°C)	Humedad registrada (%) *	Pérdidas de humedad (%)	Color del lodo	pH	Conductividad (mS/cm)
1	1	28	81,50	-		6,917	2,98
3	2	29	77,88	3,62		6,827	3,81
6	3	29	72,64	5,24	10YR2/1	6,853	4,03
9	4	32	57,75	14,89		6,615	4,50
12	5	30	39,25	18,50		6,503	6,17
15	6	31	24,75	14,50	7,5YR25/1	6,24	4,23
18	7	32	10,25	14,50	7,5YR3/1	6,608	9,70
21	8	31	2,50	7,75	10YR3/1	6,773	8,04
24	9	29	2,50	0,00		6,867	7,06

Nota. * El % de humedad se realizó tomando muestras de 100 gramos cada 3 días; la Tº se midió a diario y se promedió por los días de secado entre submuestras. Por Onofre A, Rivera M, 2021

Figura 9. Porcentaje de pérdidas de humedad con respecto a la temperatura ambiente.



Nota. Registro del porcentaje de pérdidas de humedad y temperatura ambiente durante los 24 días de deshidratación de la muestra de lodo. Por Onofre A, Rivera M, 2021

Durante los primeros 12 días de secado se observó pérdida exponencial de agua hasta alcanzarse un valor de 39,2% en el lodo en deshidratación, es decir que, durante este tiempo el lodo perdió 52% de su humedad inicial. Posteriormente se registró, entre los días 15 a 18 de secado, humedad constante y, por último, decrecimiento en las pérdidas de humedad hasta alcanzar una remoción del 96,93% de la humedad que presentaba el lodo previo a su deshidratación. De acuerdo con Ramalho (1991) el descenso en pérdidas de humedad entre los días 15 a 24 sucede porque se alcanza una humedad crítica donde el agua no emigra a la superficie del lodo con la misma velocidad a la que se evapora, por tanto, en este período la celeridad de evaporación depende principalmente del espesor de secado y condiciones atmosféricas. Finalmente, el día 21 se alcanzó una humedad de equilibrio correspondiente a 2,50% de humedad que se mantuvo constante hasta la muestra final.

De acuerdo con la Figura 9 se registraron temperaturas ambiente más altas a partir del noveno día de secado, puesto que incrementaron de 1 a 3 °C frente a los 29 °C registrados hasta el día 6, es posible que por esta razón en los siguientes 18 días se alcanzaran pérdidas de humedad que iban desde los 7,75% a 18,50%, superiores a las pérdidas de 3,62% y 5,24% registradas los días 3 y 6 de secado. Según Kurt (2014), la velocidad de deshidratación depende principalmente del sistema de drenaje para lixiviación y, la temperatura ambiente, ya que a medida que la energía solar penetra el interior del área de deshidratación la temperatura ambiente incrementa y calienta el lecho del lodo hasta alcanzar la evaporación del contenido de agua, por otro lado, si el secador solar no tiene una ventilación apropiada la humedad relativa se incrementa generando disminución en la tasa de evaporación y problemas de moho por condensación del agua.

8.1.1 Variación de propiedades físicas durante la deshidratación

La pérdida de humedad se percibió inicialmente con la contracción volumétrica de la muestra de lodo y su peso, que pasó de 85 a 15 kilogramos lo que, según Glatstein (2017), implica una ventaja económica por reducción en costos de transporte. Por otra parte, el día 3 de secado se observó la formación de una capa verdosa con textura aterciopelada sobre la superficie del manto de lodos (Figura 10) que permaneció hasta el día 6, al respecto Ramírez et al. (2011). Determina que estos lodos contienen carbohidratos y otros compuestos orgánicos, por tanto, es posible que la pigmentación se desarrollara por presencia de moho ya que, según Camacho et al. (2009), este tipo

de hongo se desarrolla sobre sustratos húmedos a temperaturas 25 a 30 °C con contenido de sales y carbohidratos. Adicionalmente, en un estudio realizado por Castellanos Rozo (2018). Se determinó alta presencia de mohos y levaduras al inicio de la deshidratación de lodos provenientes de aguas residuales domésticas y, a medida que se incrementó el porcentaje de pérdida de humedad por el secado, se evidenció disminución significativa de las poblaciones de hongos ya que el bajo contenido de agua inhibió la actividad enzimática.

Figura 10. Variaciones en textura y color del lodo observados durante la deshidratación.



Nota. Variación de las propiedades físicas de la muestra de lodos durante los 24 días de secado. Por Onofre A, Rivera M, 2021

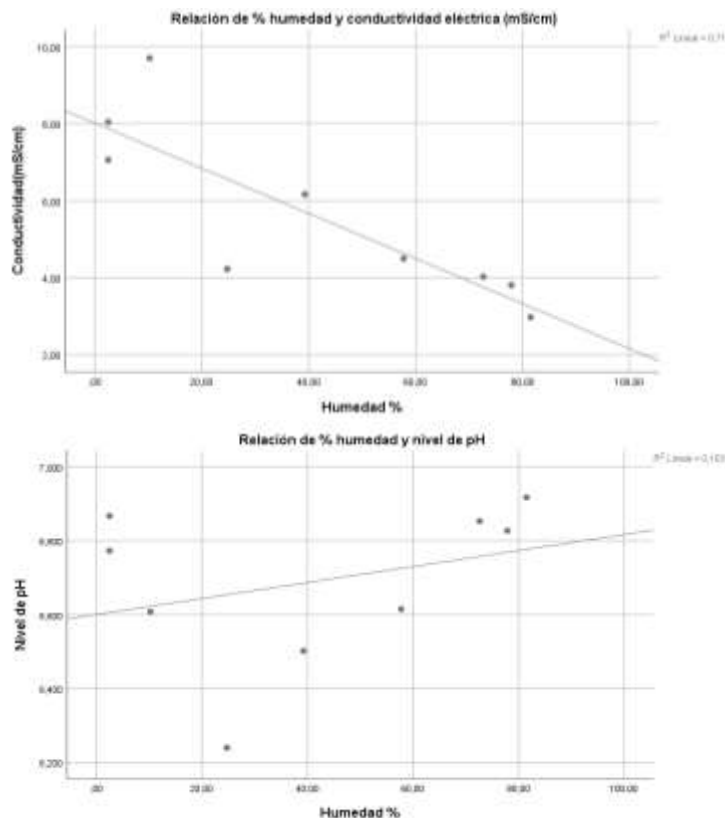
Al transcurrir los días de secado también fue posible observar el agrietamiento del lodo y formación de gránulos con diámetros entre 0,85 mm a 30 mm cada vez más resistentes al quiebre, además se registró variación de color (Tabla 9), observándose, hasta la muestra 5, color negro similar al humus que más adelante se tornó a gris muy oscuro lo que, de acuerdo con Moreno et al. (2010) posiblemente significa que la materia orgánica contenida en el lodo se encuentra en el último nivel de polimerización y condensación de los ácidos húmicos (AH). De acuerdo con González et al., (2009), en este proceso de “maduración térmica” los AH potencializan sus beneficios, por tanto, al aplicarse al suelo se presenta mayor calidad en la mejora de su estructura, estabilidad y regulación de la CIC.

8.1.2 Variación de propiedades químicas durante la deshidratación

El pH se mantuvo entre 6,24 a 6,91 lo que lo categoriza como ligeramente ácido. Los niveles de pH y humedad del lodo presentaron una correlación de 0,32, lo que significa que existe relación lineal y proporcionalidad muy baja entre variables (Figura 11), según Bastidas et al. (2019), esto se debe a que los lodos no contienen concentración significativa de microorganismos, por lo cual

no se genera alta acción microbiana a medida que incrementa la temperatura y pérdidas de agua que descomponga la materia orgánica y por tanto disminuya considerablemente los niveles de pH Santos, et al, (2017). Por otra parte, la conductividad presentó correlación de -0,84 con respecto a la humedad lo que corresponde a una relación inversamente proporcional entre variables, esto puede atribuirse a que, a medida que disminuye el contenido de agua se incrementa la aglomeración y porcentaje de sólidos totales (ST). En el estudio desarrollado por Santos, et al, (2017), los ST se incrementaron un 90% a medida que se deshidrató el lodo; entre los ST se incluyen sólidos fijos inorgánicos como los cationes de sodio, calcio, magnesio, potasio, formadores de sales que incrementan la conductividad eléctrica.

Figura 11. Correlación de Pearson entre porcentaje de humedad y los niveles de pH y conductividad registrados durante la deshidratación.



Nota. Gráficos de correlación de las variables conductividad (mS/cm) y pH frente a porcentaje de humedad contenido en el lodo. Realizados mediante software IBM SPSS statistics 25. Por Onofre A, Rivera M, 2021

8.2 Caracterización nutricional de lodos deshidratados y análisis del suelo para llenado de bolsas de vivero

El análisis fisicoquímico determinó las concentraciones de macro y microelementos, y algunos parámetros físicos en las muestras de suelo de vivero y lodos deshidratados con el fin de precisar la importancia de estos últimos en el cubrimiento de las necesidades nutricionales de las plántulas de palma africana. A continuación, la tabla 10 presenta las características fisicoquímicas registradas en el suelo para llenado de bolsas de vivero.

Tabla 10. Descripción fisicoquímica del sustrato utilizado para llenado de bolsas de vivero.

Parámetros	Unidades	Resultado
pH	-	4,20
Densidad real	g/cm ³	2,17
Humedad	%	14,33
Carbono orgánico	%	1,04
Materia orgánica	%	1,80
Arena	%	72
Arcilla	%	8
Limo	%	20
Textura	-	F. A
N. total* (N)	%	0,09
Al. Intercambiable* (Al ³⁺)	meq/100g	2,30
CICA*	meq/100g	10
CICe*	meq/100g	2,95
Potasio (K ⁺)	meq/100g	0,09
Calcio (Ca ²⁺)	meq/100g	0,50
Magnesio (Mg ²⁺)	meq/100g	0,01
Sodio (Na ⁺)	meq/100g	0,05
Bases totales	meq/100g	0,65
Fosforo (P)	mg/kg	9,1

Nota. *F. A= Franco-arenosa, N=Nitrógeno, Al= Aluminio, CICA= capacidad de intercambio catiónico real, CICe= capacidad de intercambio catiónico efectiva. Resultados fisicoquímicos, obtenidos de laboratorios de la Universidad de los llanos y Santo Tomás de Villavicencio, a la muestra de suelo utilizado para llenado de bolsas, extraído de la Finca “Los Ángeles” ubicada en el municipio de San Martín-Meta. Por Onofre A, Rivera M, 2021

El sustrato utilizado para el cultivo de plántulas de palma africana presentó baja concentración de macroelementos primarios (N, P, K^+) y secundarios (Mg^{2+} , Ca^{2+}) en comparación con los requeridos para este cultivo en fase de vivero, ya que, la Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite recomienda suelos de cultivo con porcentaje entre 0,15-0,20 % de N y valores por encima de 25 mg/kg en P, de 0,2 meq/100g en K^+ y de 0,4 meq/100g en Mg^{2+} , además considera óptimo un pH superior a 4,5 y rangos de 2-3 % en carbono orgánico (Franco Bautista, 2003). Es posible que el bajo nivel de nutrimentos disponibles en el suelo se deba a su textura franco-arenosa, debido a que, los recomendables en cultivos de palma africana son los de tipo limoso, profundos y con adecuado drenaje, puesto que, las texturas con alto porcentaje de arena tienen problemas en la retención de humedad y nutrientes aprovechables por las plantas. (Technoserve, 2009). Adicionalmente, el análisis determinó la necesidad de incrementar el nivel de pH, ya que en condiciones de extrema acidez se presenta toxicidad por Al^{3+} e insuficiente capacidad de intercambio catiónico, por lo cual, se tienen deficiencias en la absorción de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ . (Patiño et al., 2017). Además, algunos elementos asimilables se transforman en su forma iónica no asimilable, por ejemplo, el P en suelos con pH entre 4,5 a 7 se encuentra como anión monovalente fosfato ($H_2PO_4^-$) mayormente absorbido por plantas, mientras que, en un pH alcalino se encuentra como anión divalente (HPO_4^{2-}) menos asimilable. (Florez & Rodriguez, 2004). Una alternativa eficaz para disminuir el pH es el encalado de suelos con roca caliza, ya que estos aportan grupos OH^- que neutralizan los iones ácidos (Baligar & Fageria, 2005). Durante la metodología de este estudio se aplicó óxido de calcio (CaO) en suelo húmedo 1 mes antes de la siembra, ya que por su grado de fineza tiene reacción más rápida en la remoción del exceso de H^+ y Al^{3+} al precipitarlos como H_2O y $Al(OH)_3$ respectivamente. (Marín & Lora, 1978).

Un suelo con bajo porcentaje de arcillas, materia orgánica y nitrógeno, como el utilizado en este estudio (Tabla 10), presenta limitaciones en nutrientes esenciales para el adecuado crecimiento de las plantas, por lo tanto, estos se les deben suministrar de forma artificial mediante fertilizantes. (FAO, 1986).

El análisis fisicoquímico del lodo seco determinó concentración considerable de nutrientes encargados del crecimiento foliar como el N, P, K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , B y otros microelementos (Tabla 11) que mejoran el régimen hídrico y protegen las plantas de enfermedades y altas temperaturas. (Florez & Rodriguez, 2004).

Tabla 11. Contenido de elementos nutritivos y propiedades físicoquímicas registrados en la muestra de lodos de la industria palmícola del Meta.

Parámetro	Unidades	Lodo seco
PH	-	6,9
Conductividad	mS/cm	7,06
Densidad real	g/cm ³	1,58
Humedad	%	2,50
Carbono orgánico	%	8,72
Materia orgánica	%	15
Nitrógeno total (Nt)	%	0,75
Al. Intercambiable* (Al ³⁺)	meq/100 g	20,00
CICA	meq/100 g	20,00
CICe	meq/100 g	53,27
Potasio (K ⁺)	meq/100 g	10,22
Calcio (Ca ²⁺)	meq/100 g	15
Magnesio (Mg ²⁺)	meq/100 g	27,50
Sodio (Na ⁺)	meq/100 g	0,15
Bases totales	meq/100 g	52,87
Fósforo (P)	mg/kg	378,50
Azufre (S)	mg/kg	232,30
Boro (B)	mg/kg	3,04
Cobre (Cu)	mg/kg	36,87
Manganeso (Mn)	mg/kg	195
Hierro (Fe ²⁺)	mg/kg	238,75
Zinc (Zn)	mg/kg	58,75

Nota. *El contenido de micro y macronutrientes, capacidad de capacidad de intercambio catiónico real (CICA), capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) y aluminio intercambiable se determinó gracias al análisis realizado por la Universidad de los Llanos (Apéndice B). Por Onofre A, Rivera M, 2021

La fertilización recomendada en viveros de palma africana de los 3 a 7 meses de edad se caracteriza en altos porcentajes de elementos como N, P, K⁺, y en una menor proporción Ca, Zn, B y Mg, según Franco Bautista (2003), en algunas plantaciones de la zona central de Colombia se aplican fertilizantes con 14% N, 14% P, 14% Mg, 2% B y 0.2% Zn hasta los 6 meses de edad. Estos planes de fertilización a menudo no consideran la aplicación de fertilizantes orgánico-minerales como los lodos deshidratados que reportaron alto porcentaje de materia orgánica (15%) lo cual, garantizaría incremento de la CIC, capacidad tampón, reserva de nutrientes y procesos de mineralización que incrementen la fertilidad del suelo. (Otiniano et al., 2006). Por otra parte, la aplicación de lodos deshidratados además de aportar todos los macro y microelementos

normalmente considerados en planes de fertilización en plántulas, proporciona otros elementos como el S, que permite la formación de clorofila y “en la mayoría de plantas suple del 0,2 al 0,3 (0,05 a 0,5) % del extracto seco” (FAO, 1986); El Fe^{2+} , que en suelos con pH entre 4,5 a 6, se asocia con la síntesis de ferredoxina, la cual participa en procesos metabólicos como la fotosíntesis (Florez & Rodriguez, 2004), y en viveros con fertilización exclusiva de N y P aportaría los demás nutrientes esenciales en la palma africana como el B, que permite el alargamiento de hojas y raíces al mismo tiempo que evita la pérdida y corrugamiento de la lámina foliar, y Mg, que al ser deficiente genera clorosis en los folíolos expuestos al sol. (Durán & Salas, 1999). Adicionalmente, al agregarse el lodo deshidratado en suelos ácidos se incrementa su posibilidad de retención de cationes debido a su alta concentración de bases totales (52,87 meq/100g), y poco contenido de Al^{3+} (0,40 meq/100g). (Agrolab, 2011).

8.3 Comparación del contenido nutricional del lodo seco con la Norma Técnica Colombiana 5167

La tabla 12 presenta la comparación entre el contenido nutricional registrado en el análisis químico de los lodos con los valores fisicoquímicos exigidos por la norma técnica colombiana 5167 (2011) para su clasificación como fertilizantes orgánico-minerales sólidos, ya que, de acuerdo con la normativa, este tipo de abonos o fertilizantes corresponde a “productos sólidos de origen animal o vegetal o provenientes de lodos de tratamiento de aguas residuales domésticas o agroindustriales estabilizados”

Tabla 12. Composición nutricional del lodo seco y mínimo garantizable (%) exigido en la NTC 5167 para clasificación como fertilizantes orgánico- minerales

Parámetro	Lodo seco	Unidades	Concentraciones en %	Norma NTC 5167. Mínimo garantizable (%)
Humedad	2,5	%	.	< 15
PH	6,9	.	.	>4 <9
Conductividad	7,06	mS/cm	.	N/A
Carbono orgánico	8,72	%	.	> 5
ClCe	20	meq/100 g	.	30 meq/100 g
Sodio	0,15	meq/100 g	0,003	N/A*
Nitrógeno total	.	%	0,75	2
Fosforo	378,5	mg/kg	0,04	1
Potasio	10,22	meq/100 g	0,40	2

Tabla 12. *Continuación.*

Calcio	15	meq/100 g	0,30	1
Magnesio	27,5	meq/100 g	0,33	1
Azufre	232,3	mg/kg	0,02	1
Boro ^b	3,04	mg/kg	0,0003	0,02
Cobre ^b	36,87	mg/kg	0,0037	0,01
Manganeso ^b	195	mg/kg	0,02	0,01
Hierro ^b	238,75	mg/kg	0,02	0,01
Zinc ^b	58,75	mg/kg	0,01	0,02
Total^a			2	10

Nota: Los valores exigidos por la norma se encuentran en porcentaje, por tanto, se realizó la conversión de unidades de concentración del lodo a porcentaje, ver apéndice I. a. El valor total corresponde a la sumatoria del contenido de los elementos, por tanto, para fertilizantes orgánico-minerales se debe garantizar una sumatoria mínima de 10%. ver apéndice H. * N/A: El sodio no se encuentra entre los parámetros a garantizar. Por Onofre A, Rivera M, 2021

La sumatoria de elementos contenidos en el lodo deshidratado fue de 2%, mientras que el mínimo a garantizar expresado por la normatividad es de 10%, lo que significa que, en este caso no es posible considerar la muestra de lodo de fondo de la industria de palma como un abono o fertilizante orgánico-mineral sólido.

A pesar de esto, al realizar la comparación de cada uno de los elementos se observa que el hierro y manganeso presentaron un porcentaje superior al requerido por la normativa (0,01% más), así como el carbono orgánico (3,72% más); el contenido de zinc y nitrógeno total corresponde a 50% y 37,5% del contenido exigido por la norma; los cationes Calcio y Magnesio tienen porcentajes que conforman la tercera parte del 1% requerido mientras que el potasio presentó 20% de lo exigido para este parámetro; los macronutrientes y micronutrientes restantes alcanzaron concentraciones que son el 1,5% a 4% de los valores solicitados por la NTC 5167 y resolución 00150 de 2003.

El considerable contenido de elementos esenciales para el suelo registrado en la muestra de lodo seco permite determinar que, aunque este no corresponda a un fertilizante si podría considerarse como un acondicionador órgano-mineral del suelo. Según la resolución 0012, los acondicionadores órgano-minerales son aquellos productos que contienen elementos útiles de origen orgánico y obtenidos mediante mezcla física o reacción bioquímica, y que generalmente contienen nutrientes primarios (NPK) con concentración menor del 2 % (p/p), que al aplicarse a suelos de cultivo garantizan mejor aprovechamiento de nutrientes, y por tanto, se disminuye las pérdidas por lixiviación, volatilización y fijación, además de promover la actividad biológica del suelo y reducir el efecto de sustancias tóxicas. (Blanco Sandoval, 2006)

8.4 Análisis foliares de plántulas de palma africana fertilizadas con lodo seco y urea

Las variables de crecimiento registradas durante el cultivo de plántulas de palma africana fueron: Número de hojas emitidas, área foliar (cm²), longitud de la hoja (cm), altura de la palma (cm), y diámetro del tallo (cm), adicionalmente se tuvo en cuenta los niveles de coloración y moteado en las hojas. A continuación, se presenta el análisis de varianza y diferencia de medias entre tratamientos mediante prueba de Duncan.

8.4.1 Número de hojas emitidas y área foliar

Las tablas 13 y 14 presentan los resultados de ANOVA para las variables número de hojas emitidas y área foliar respectivamente. El análisis de varianza se realizó tomando los promedios de crecimiento registrados cada 30 días en las 5 unidades experimentales (plántulas) de cada uno de los 6 tratamientos (fertilizantes lodo seco-urea) de estudio. (Apéndice F y G)

Tabla 13 Análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la variable “número de hojas emitidas” obtenidas en el Software SPSS

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Fo	Probabilidad (p)	Valor crítico para F
Tratamientos	0,38	5	0,076	0,67588933	0,64824887	2,90129454
Días	2,35333333	3	0,78444444	6,97628458	0,00367809	3,2873821
Error	1,68666667	15	0,11244444			
Total	4,42	23				

Nota: * Valor distribución de Fisher con $\alpha = 0,05$ (intervalos de confianza del 95%). Elaborado en software microsoft Excel 2019. Por Onofre A, Rivera M, 2021

Tabla 14. Análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la variable “Área foliar”

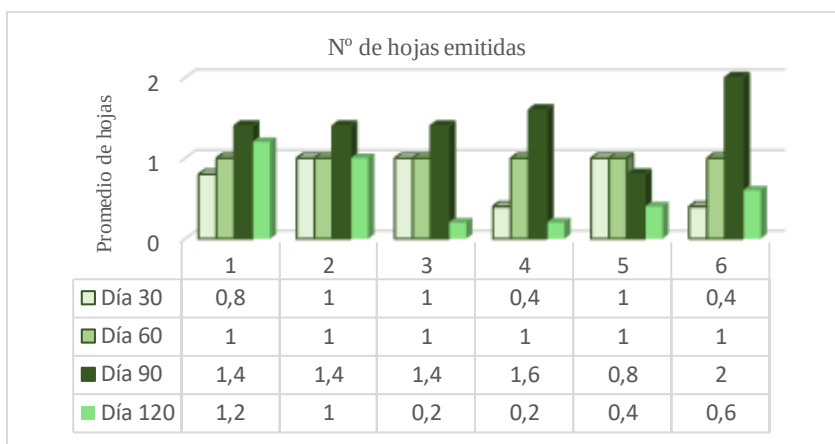
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Fo	Probabilidad	Valor crítico para F
Tratamientos	17256,04878	5	3451,20976	1,44358	0,26556	2,90129
Días	17059,51020	3	5686,50340	2,37856	0,11063	3,28738
Error	35861,00338	15	2390,73356			
Total	70176,56236	23				

Nota: * Valor distribución de Fisher con $\alpha = 0,05$ (intervalos de confianza del 95%). Elaborado en software microsoft Excel 2019. Por Onofre A, Rivera M, 2021

Teniendo en cuenta que, en los tratamientos se observó un valor (F_o) inferior al (F crítico) en ambos casos, por tanto, es posible determinar que no se presentó diferencias de medias significativas en las variables de área foliar y número de hojas emitidas entre los tratamientos aplicados (Kuehl, 2001), adicionalmente, se obtuvo una probabilidad del 26% (0,26556) de obtener rendimientos diferentes de área foliar y 64% (0,64824) en número de hojas emitidas, al aplicar los mismos tratamientos en la población real de plántulas de palma africana. (Molina Arias, 2017)

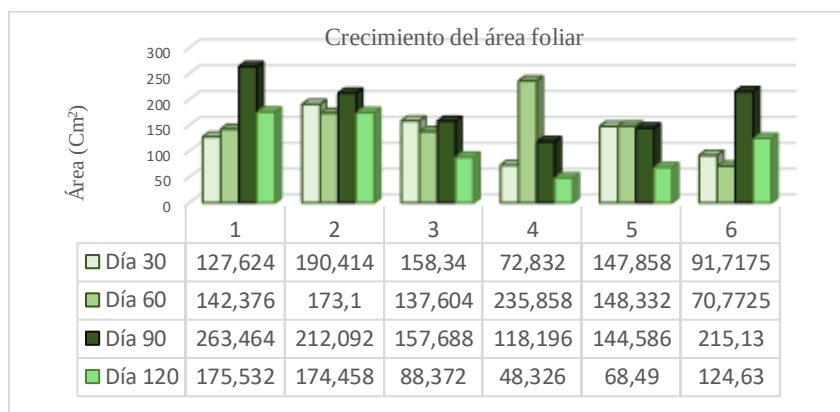
Las Figuras 12 y 13 presentan los promedios de rendimiento en área foliar y hojas emitidas, entre periodos de 30 días respectivamente.

Figura 12. Promedio de hojas emitidas por tratamientos durante los 120 días de cultivo.



Nota: Los valores presentados equivalen a la emisión de hojas registrado cada 30 días en las 5 unidades experimentales de los 6 tratamientos o fertilizantes (lodo seco-urea). Por Onofre A, Rivera M, 2021

Figura 13. Promedio de crecimiento foliar por tratamientos durante los 120 días de cultivo.



Nota: Los valores presentados equivalen al crecimiento promedio del área foliar registrado cada 30 días en las 5 unidades experimentales de los 6 tratamientos o fertilizantes (lodo seco-urea). Por Onofre A, Rivera M, 2021

El tiempo transcurrido desde el día 60 a 90 de cultivo se observó el mayor rendimiento en emisión de hojas y, por tanto, de área foliar en los fertilizantes 1, 2 y 6. Por otra parte, en el caso de la variable número de hojas emitidas, la fertilización 4 (75% urea- 25% lodo seco) y 5 (100% urea) emitieron el promedio más bajo con 0,8 hojas/mes durante los 120 días de cultivo, valor que resulta inferior a las 1,96 hojas/mes obtenido por Villegas (2015), en su estudio con fertilización tradicional (N, P K, Mg, B). En este caso, lo emitido por el tratamiento 5 equivalió al 72,7% del crecimiento promedio registrado en plántulas de los tratamientos 1 y 2 compuestos principalmente por lodo seco. En cuanto al promedio de crecimiento del área foliar, los tratamientos 4 (118,803 cm²) y 5 (127,316 cm²) estuvieron por debajo de los valores promedio de crecimiento observados en plántulas con fertilizantes 1 (177, 249 cm²) y 2 (187,516 cm²), por tanto, es el tratamiento 2 el que presentó el mayor rendimiento en esta variable.

Es posible que el bajo desarrollo foliar observado en las palmas del fertilizante 5 se deba a deficiencia de nutrientes, según (Arevalo, 2010), después de los 5 meses de edad, las plántulas requieren, además de nitrógeno (N), aplicación de fertilizantes con alto contenido de fósforo (P), potasio (K), y en menor proporción boro (B) para mantener el incremento de follaje en palmas de vivero; dichos compuestos se registraron en concentraciones significativas en el análisis químico realizado al lodo seco (Tabla 11), lo que posiblemente permitió que, en tratamientos 1 y 2, se conservara mayor tasa de crecimiento en plántulas hasta el día 120 de cultivo, en comparación con la composición de fertilizantes 3, 4 y 5 que presentaron decrecimiento del 44% 59% y 53% en medidas de área foliar, y 86%, 88% y 50% en emisión de hojas durante los últimos 30 días de cultivo. Además, es importante resaltar que, aunque la urea contiene alto porcentaje de nitrógeno, que en cultivo de palma africana beneficia la tasa de crecimiento foliar al formar parte de la clorofila, amidas, aminoácidos. (Owen E. , 1992), al mezclarse con otros fertilizantes que contengan potasio, como el lodo seco en este caso, se obtiene mejor transporte y absorción de este compuesto nitrogenado, ya que su presencia en suelos de cultivo evita acumulación de nitratos en las raíces que causan efecto negativo sobre la biosíntesis de proteínas (López et al. 2011) al respecto, Rojas, et al, (2015), agrega que la deficiencia de potasio tiene uno de los efectos más significativos sobre la velocidad de crecimiento del área foliar de la palma africana.

8.4.2 Diámetro del tallo

La varianza entre tratamientos presentada para la variable “Diámetro del tallo” tampoco presentó un valor de F_o calculado superior al F de distribución de Fisher, por tanto, no se rechaza la hipótesis nula para ANOVA, la cual indica que no se presenta diferencias estadísticas entre tratamientos sobre el crecimiento del tallo (Argüelles & Carvajal, 2013), adicionalmente se determina que existe un 51% de probabilidad que los rendimientos registrados en el estudio se deban al azar y por tanto se presenten rendimientos diferentes entre tratamientos sobre esta variable al aplicarse en viveros reales de palma africana, según (Manterola & Pineda, 2008) en estos casos se requiere un tamaño de muestra mayor e incremento del efecto a demostrar para afirmar con seguridad si existe o no diferencia entre tratamientos en población de cultivos reales.

Tabla 15. *Análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la variable “Diámetro de tallo” Obtenido en el Software SPSS.*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F_o	Probabilidad	Valor crítico para F
Tratamientos	0,02313	5	0,00463	0,89318	0,51015	2,90129
Días	0,25203	3	0,08401	16,21802	0,00006	3,28738
Error	0,07770	15	0,00518			
Total	0,35286	23				

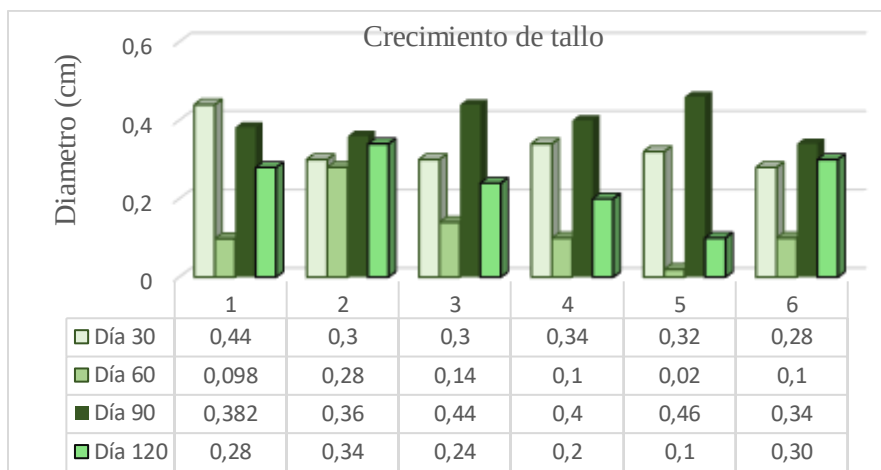
Nota: * Valor distribución de Fisher con $\alpha = 0,05$ (intervalos de confianza del 95%). Por Onofre A, Rivera M, 2021

Los tratamientos 2 y 1 que presentaron incremento promedio de 0,32 cm y 0,30 cm cada 30 días, mientras que las plántulas de los tratamientos 5 y 6 incrementaron su diámetro a una velocidad promedio de 0,22 cm y 0,25 cm lo cual demuestra mayor rendimiento de los tratamientos compuestos principalmente por lodo seco. El tratamiento 2, por tanto, tuvo un rendimiento 31,2% y 21,9% mayor frente a los tratamientos 5 y 6 respectivamente.

La figura 14 permite determinar que el tiempo transcurrido entre el día 60 a 90 de cultivo se presentó la mayor tasa de crecimiento de tallos en todos los tratamientos, principalmente, los de mayor composición de urea (3, 4 y 5); es probable que los tratamientos 1 y 2 no tuviesen durante esos 30 días el mayor rendimiento por un exceso de fósforo (378,5 mg/kg registrado en lodo); A pesar que, este elemento favorece el crecimiento de tallos y raíces (Franco Bautista, 2003), de acuerdo con Owen (1992) en suelos con moderado contenido de fosforo (P: 5-10 mg/kg), como el

utilizado en el llenado de bolsas (9,1 mg/kg) se debe fraccionar la dosis a 50% cada 6 meses debido a su baja respuesta a fertilización fosfórica y para evitar toxicidad en el suelo, además en suelos arenosos induce a deficiencias de Zn y Cu también importantes en el desarrollo de los tallos y prevención de manchas cloróticas en las hojas más jóvenes. (Rahman, 2010).

Figura 14. Promedio de crecimiento de tallo por tratamiento durante los 120 días de cultivo.



Nota: Los valores presentados equivalen al crecimiento promedio del tallo registrado cada 30 días en las 5 unidades experimentales de los 6 tratamientos o fertilizantes (lodo seco-urea). Por Onofre A, Rivera M, 2021

No obstante, los últimos 30 días de cultivo, se observó un decrecimiento de 45,4% 50% y 78,3% en los tratamientos 3,4 y 5 respectivamente, causado por agotamiento de las bajas reservas naturales de fósforo (P) registrados en el suelo, lo que, según Villegas (2015) rompe la relación 10:1 de N: P que favorece el crecimiento de tallos y raíces en las plántulas de palma. Durante este mismo tiempo se observó el mantenimiento de la tasa de crecimiento en el tratamiento 2, porque, además de contener una menor concentración de lodo seco (75%), lo que se traduce a una menor probabilidad de causar toxicidad en el suelo, aporta calcio (15 meq/100g registrado en lodo) que estabiliza la absorción del fósforo al garantizar su transporte a las membranas mitocondriales de las plántulas. (Rahman, 2010).

8.4.3 Altura de palma y longitud de hojas.

Para realizar el análisis de varianza, se tomó el promedio de crecimiento de la altura de la planta y de longitud de hoja cada 30 días en cada una de las 5 plántulas de los 6 tratamientos (fertilizante lodo seco-urea) del estudio.

Tabla 16. *Análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la variable “altura de la palma”*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tratamientos	12,84313	5	2,56863	1,56419	0,22975	2,90129
Días	96,50622	3	32,16874	19,58941	0,00002	3,28738
Error	24,63224	15	1,64215			
Total	133,98159	23				

Nota: * Valor distribución de Fisher con $\alpha = 0,05$ (intervalos de confianza del 95%). Elaborado en software microsoft Excel 2019. Por Onofre A, Rivera M, 2021

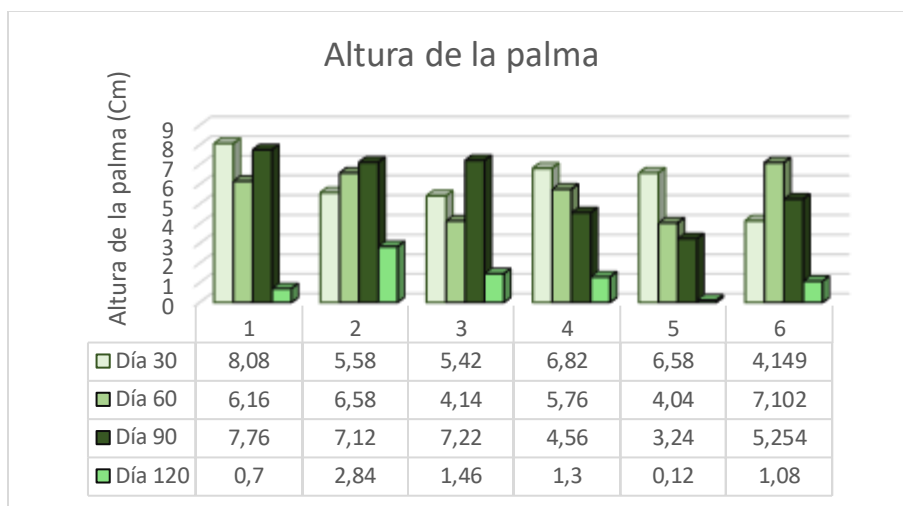
Tabla 17. *Análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la variable “longitud de hoja”*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tratamientos	0,39338	5	0,07868	0,65767	0,66073	2,90129
Días	1,39671	3	0,46557	3,89179	0,03063	3,28738
Error	1,79443	15	0,11963			
Total	3,58452	23				

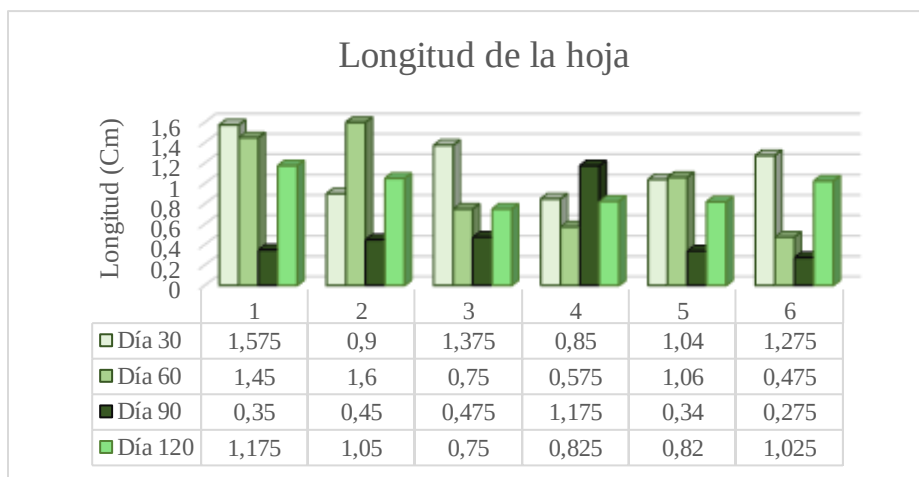
Nota: * Valor distribución de Fisher con $\alpha = 0,05$ (intervalos de confianza del 95%). Elaborado en software microsoft Excel 2019. Por Onofre A, Rivera M, 2021

Respecto a las anteriores tablas se puede observar que para ambas variables, altura de la palma y longitud de hoja, el valor de (F_o) es menor al de (F crítico) y, adicionalmente, la probabilidad es superior al 0,05, lo anterior deduce que no hubo diferencias de medias significativas entre tratamientos en ambas medidas morfométricas, por otra parte, se puede determinar que, para la variable altura de la palma hay un 23% (0,229) y para longitud de hoja un 66% (0,66) de probabilidad que el rendimiento entre tratamientos se deba al azar y, por tanto, se presenten rendimientos diferentes entre tratamientos sobre estas variables al aplicarse en viveros reales de palma africana.

Las figuras 15 y 16 presentan los promedios de crecimiento en las variables “altura de la palma” y “longitud de hoja” entre periodos de 30 días, respectivamente.

Figura 15. Promedio de altura de la palma por tratamiento durante los 120 días de cultivo.

Nota: Los valores presentados equivalen al crecimiento promedio de la altura de la palma registrado cada 30 días en las 5 unidades experimentales de los 6 tratamientos o fertilizantes (lodo seco-urea). Por Onofre A, Rivera M, 2021

Figura 16. Promedio de longitud de la hoja por tratamiento durante los 120 días de cultivo.

Nota: Los valores presentados equivalen al crecimiento promedio de longitud de hoja registrado cada 30 días en las 5 unidades experimentales de los 6 tratamientos o fertilizantes (lodo seco-urea). Por Onofre A, Rivera M, 2021

Las plántulas fertilizadas con el tratamiento 5 (100% urea) registraron los rendimientos de crecimiento más bajos los días 90 y 120 de cultivo en comparación con los demás tratamientos. La variable altura de la palma, por ejemplo, durante los primeros 30 días de cultivo tuvo un rendimiento 98% más alto que el registrado el día 120.

De acuerdo con los planes de fertilización de Franco Bautista (2003), el requerimiento de las plántulas durante las primeras cuatro semanas es del fertilizante Nitrón 30 que se compone de 30% de Nitrógeno, elemento principal también en la urea, el cual brinda a la planta un adecuado crecimiento durante esta etapa, no obstante, en el transcurso de las semanas la plántula requiere de otros nutrientes como potasio, magnesio y azufre para su óptimo desarrollo (Tabla 1), lo que probablemente ocasiona que partir del día 60 se observe reducción de rendimiento en el tratamiento 5, así como del tratamiento 4, que en sus primeros 30 días presentó un rendimiento 80,93% más alto que el día 120. Por el contrario, los tratamientos 1 y 2, registraron el día 90 de cultivo los crecimientos promedio más altos (7,76 cm/mes y 7,12 cm/mes, respectivamente) en la variable “altura de la palma”, adicionalmente, el tratamiento 2 tuvo un rendimiento 95,77% más alto que el tratamiento 5 y 54,23% mayor que el tratamiento 4 durante los últimos 30 días de cultivo.

En cuanto a la variable “longitud de la hoja” los tratamientos 1 y 2 presentaron los valores de crecimiento más altos en el registro del día 120. De hecho, el tratamiento 1 presentó rendimiento 30,21% más alto que el tratamiento 5 y 29,36% más respecto al tratamiento 4; de igual forma, las hojas de las plántulas del tratamiento 2 crecieron, en promedio, 0,22 cm más que las del tratamiento 4 y 0,23 cm más a las del tratamiento 5 durante los últimos 30 días de cultivo.

Es posible que el registro de mayor rendimiento durante los últimos 60 días de cultivo en los tratamientos 1 y 2 se deba al contenido de micro y macro nutrientes que componen al lodo seco y que contribuyen al incremento en la altura de la palma y longitud de la hoja (Tabla 11); entre estos elementos se encuentra el fósforo (P) que es esencial para el crecimiento de la raíz y tallo durante las primeras etapas, el nitrógeno (N) primordial para el desarrollo de follaje de las plantas y la ejecución de la fotosíntesis y el boro (B) que ayuda a la maduración y elongación de la planta, y que al ser deficiente en la fertilización, como en los tratamientos 4 y 5, inhibe el desarrollo y expansión de hojas nuevas, además originar que en hojas más viejas se desarrollen pinnas tiesas frágiles y quebradizas (Gutiérrez Soto & Torres Acuña, 2013). Adicionalmente, la ausencia o baja concentración de potasio y azufre en los tratamientos 4 y 5 genera, en el primer caso, decoloración y decadencia de las hojas más viejas e inhabilita su crecimiento, y en el segundo, disminución de la síntesis de proteínas y aminoácidos que contiene el azufre (metionina, cisteína y cistina). (Owen, 1992).

8.4.4 Niveles de coloración y presencia de moteados.

Al iniciar el estudio se garantizó un estado saludable en las plántulas de palma, es decir libre de moteados, coloración o necrosis en la totalidad de hojas. El porcentaje de presencia/ausencia de moteados en el total de plántulas por tratamiento, durante los 120 días de cultivo se presenta a continuación:

Figura 17. Frecuencia de moteado por tratamiento observado durante los 120 días de cultivo.

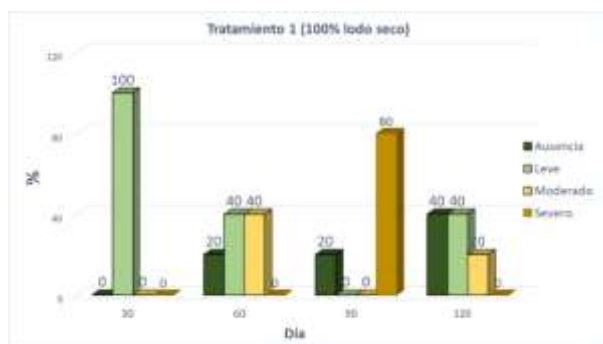


Nota: Porcentaje de presencia/ausencia de moteados registrados en las 5 unidades experimentales (plántulas de palma) asignadas a cada tratamiento o fertilización (lodo seco- urea). Por Onofre A, Rivera M, 2021

La mayor frecuencia de moteados se presentó en plántulas de los tratamientos 4, 5 con mayor concentración de urea, y el tratamiento 6 sin fertilización. De acuerdo con Franco Bautista (2003), la presencia de moteados verde oliva o anaranjados se debe a una deficiente o excesiva presencia de potasio en el suelo, las deficiencias generalmente se presentan en suelos arenosos o con arcillas tipo 2:1; por su parte, Owen (1992), determina que, esta condición también causa coloración marrón en bordes de las hojas y coloración verde amarillento o pálido, poco menos intenso a la clorosis por deficiencia de magnesio en el limbo o cerca de las nervaduras de la hoja, con lo anterior conviene decir que, las plántulas del tratamiento 1 y 2 registraron un bajo porcentaje de presencia de moteado debido a la concentración de potasio (10,22 meq/100g) proveído por las dosis de lodo seco aplicados, el cual favoreció la fotosíntesis, síntesis de proteínas y evito la generación de enfermedades por de hongos como *Pestalotia sp.* y *Curvalaria maculans*, que generalmente son las responsables de la aparición de estas manchas o moteados. (Sánchez, 1990).

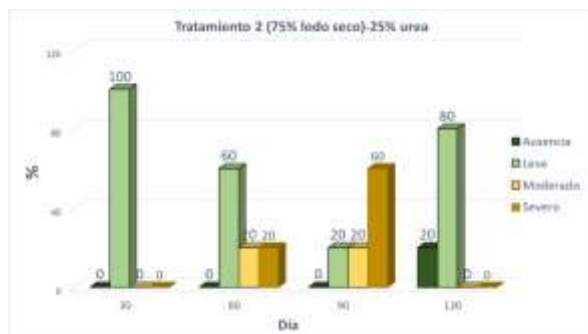
Por otra parte, los niveles de coloración o clorosis más severos se registraron en los tratamientos 1 y 5 (80% de plántulas con presencia severa) entre los días 60 a 90 de cultivo, cabe resaltar que la coloración observada en estos casos correspondió a marrón ocre rodeado de un halo amarillento pardo que se localizó principalmente en los bordes de las hojas más viejas y, con el paso de los días, se tornaron a amarillo más intenso. De acuerdo con Ross (2004) la producción de clorofila, que es el pigmento responsable del color natural las hojas, depende principalmente del magnesio, ya que es su átomo principal, asimismo, un bajo suministro de este elemento en el suelo incrementa la acumulación de fotosintetizados que forman radicales tóxicos de oxígeno responsables de la clorosis.

Figura 18. Niveles de coloración en plántulas del tratamiento 1 (100% lodo seco), durante 120 días de cultivo.



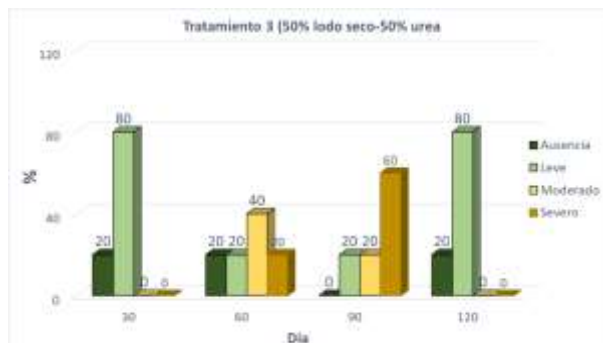
Nota. Por Onofre A, Rivera M, 2021

Figura 19. Niveles de coloración en plántulas del tratamiento 2 (75% lodo seco-25% urea), durante 120 días de cultivo.



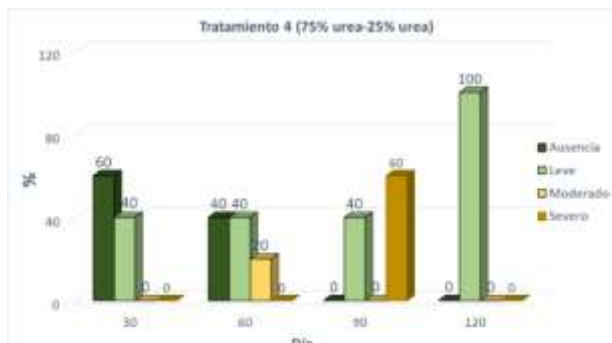
Nota. Por Onofre A, Rivera M, 2021

Figura 20. Niveles de coloración en plántulas del tratamiento 3 (50% lodo seco-50% urea), durante 120 días de cultivo.



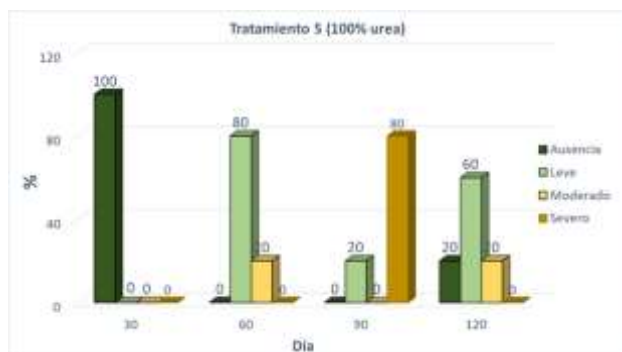
Nota. Por Onofre A, Rivera M, 2021

Figura 21. Niveles de coloración en plántulas del tratamiento 4 (75% urea-25% lodo seco), durante 120 días de cultivo.



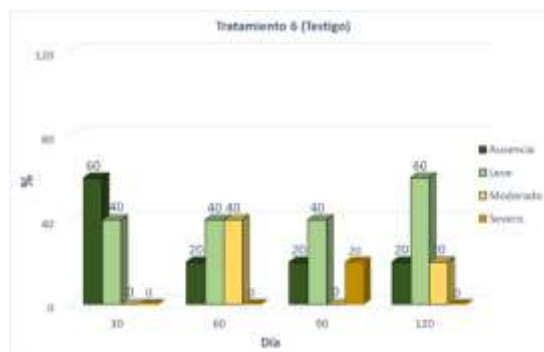
Nota. Por Onofre A, Rivera M, 2021

Figura 22. Niveles de coloración en plántulas del tratamiento 5 (100% urea), durante 120 días de cultivo.



Nota. Por Onofre A, Rivera M, 2021

Figura 23. Niveles de coloración en plántulas del tratamiento 6 (testigo), durante 120 días de cultivo.



Nota. Por Onofre A, Rivera M, 2021

En un suelo con altas concentraciones de nitrógeno y potasio se presenta deficiencia de magnesio. (Owen, 1992) por tanto, es posible que por esto el tratamiento testigo mantuviera una ausencia de clorosis del 20% desde el día 60 a 120 de cultivo, ya que, al no aplicarse urea ni lodo seco, que contienen estos elementos (N, K), no se agotó rápidamente la baja reserva de magnesio (0,01 meq/100g) registrada en el análisis de suelo.

Por otro lado, los tratamientos 1 y 3 mantuvieron mayor ausencia de cloro a lo largo de los 120 días de cultivo, posiblemente porque al contener lodo seco que aporta concentraciones de potasio (10,22 meq/100g) y magnesio (27,50 meq/100 g), y en menor proporción urea que contiene 32% de nitrógeno se presentarían relaciones magnesio-potasio-nitrógeno más equilibradas. Por otra parte, el suelo empleado en el estudio presentó una relación de cationes 0,11 Mg/K que corresponde a deficiencia de Magnesio. (Andrades & Martínez, 2014), por tanto, si se aplica altas concentraciones de nitrógeno (como en los tratamientos 4 y 5) es posible que se acelere la clorosis de las hojas.

La relación nitrógeno- potasio presentada en el tratamiento 2 al ser menos concentrada en nitrógeno evita su acumulación o encharcamiento en el suelo (Sánchez, 1990), y al ser mayormente compuesta por lodo, que presentó relación catiónica Mg/K de 2,69 aceptable en magnesio y relación Ca + Mg/K de 4,16 adecuado para potasio. (Andrades & Martínez, 2014), se corrige la deficiencia de estos dos elementos en el suelo de vivero, por tal razón se presenta menor porcentaje de coloración leve, con respecto al tratamiento 4, y ausencia de plántulas con coloración moderada con respecto al tratamiento 1 y 5 durante los últimos 30 días de cultivo.

9. Impacto social y humanístico

La adecuada disposición final de lodos de fondo generados en lagunas de oxidación hace parte del compromiso social, institucional, y de cumplimiento de normas de las empresas productoras de palma africana. En ese sentido, la aplicación de macro y micronutrientes registrados en los lodos de fondo sobre cultivos palma africana a nivel de vivero podría articularse a proyectos de innovación y modernización en empresas palmicultoras del Meta, puesto que, se evidenció su potencial como acondicionador orgánico-mineral en procesos de fertilización mediante el crecimiento morfométrico de las plantas. Este potencial fertilizante incentiva los procedimientos para reincorporar los lodos de fondo al proceso de producción de palma africana y realizar la investigación en otros cultivos.

A nivel ambiental, tras presentarse un rendimiento considerable en el crecimiento foliar de las palmas con aplicaciones de lodo seco, se pretende que más organizaciones de la industria palmícola del Meta eviten una inadecuada disposición final que incurra en riegos de contaminación de fuentes hídricas y altas emisiones de gases como dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) que afectan la calidad de vida de las poblaciones aledañas.

Conclusiones

La deshidratación mediante el prototipo de secador solar de invernadero aplicado en el estudio permitió la remoción del 96,93% de la humedad contenida en el lodo durante un tiempo total de deshidratado de 24 días. Posteriormente, se evaluó el potencial fertilizante del lodo seco mediante su aplicación como fertilizante a diferentes concentraciones, en un vivero de plántulas de *Elaeis guineensis* Jack.

El lodo deshidratado presentó características fisicoquímicas como: gránulos de diámetros entre 0,85 mm a 30 mm resistentes al quiebre, pH ligeramente ácido de 6,86, conductividad de 7,06 mS/cm, altas concentraciones en elementos esenciales para el crecimiento foliar como el N, P, K, Mg, Ca, B; microelementos como: S y Cu que mejoran la síntesis de proteínas, procesos fotosintéticos y protección contra enfermedades; y concentración de 15% en materia orgánica que garantiza mayor capacidad tampón, reserva de nutrientes y procesos de mineralización que aumenta la fertilidad y presencia de potasio y fosforo, necesarios en el metabolismo y desarrollo foliar en plántulas de palma africana.

La muestra de lodos de fondo de la industria de palma africana no registró el contenido nutricional exigido por la norma técnica colombiana 5167 para clasificación como abono orgánico-minerales sólido. Sin embargo, por la sumatoria de elementos esenciales registrados (2%) se consideró como un acondicionador órgano-mineral que garantiza mejor aprovechamiento de nutrientes aplicados al suelo.

El tratamiento 2 con composición de 75% lodo seco-25% urea presentó los promedios de rendimiento más altos en las variables de número de hojas emitidas (1,1 hojas/mes), crecimiento de área foliar (187,52 cm²/mes) y diámetro del tallo (0,32 cm/mes). Esto debido a las concentraciones de boro, fosforo y potasio, brindados por el lodo seco, que favorecen el incremento de follaje en palmas de vivero después de los 5 meses de edad, por lo cual, los tratamientos 3,4 y 5 presentaron decrecimiento en sus rendimientos los últimos 30 días de cultivo.

El tratamiento 1 (100% lodo seco) presentó el mayor crecimiento promedio en las variables longitud de hoja con 1,14 cm/mes y altura de la palma con 5,67 cm/mes, seguido por el tratamiento 2 que presentó rendimientos de 1 cm/mes y 5,53 cm/mes respectivamente. Estos tratamientos permitieron el mayor crecimiento dado que, a través de la aplicación de lodo seco, se aporta al suelo nutrientes como el boro, que ayuda a la maduración y elongación de la planta, y el azufre

que facilita la síntesis de proteínas y aminoácidos de crecimiento radicular y foliar como la metionina, cisteína y cistina.

La menor presencia de moteados se registró en plántulas de los tratamientos 1 y 2, puesto que, presentaron ausencia en el 90% y 80% de sus unidades experimentales posiblemente por la concentración de potasio (10,22 meq/100g) proveído por el lodo seco que favorece la fotosíntesis, síntesis de proteínas y evita enfermedades por hongos como *Pestalotia sp.* y *Curvalaria maculans*, generalmente responsables de la aparición de estas manchas o moteados.

El análisis de varianza no registró diferencias estadísticamente significativas en ninguna de las medidas morfométricas (presentaron probabilidad $> 0,05$), es decir que, las diferencias de crecimiento entre tratamientos se debe al azar, sin embargo, no significa un rechazo total de la hipótesis que estima un rendimiento confiable en el crecimiento foliar de las plántulas de palma africana por aplicación de lodo seco, puesto que, puede ocurrir que la diferencia entre tratamientos sea real estadísticamente, pero que el estudio no tuvo la suficiente potencia y por tanto, sugiere incrementar la cantidad de unidades experimentales, y el efecto a detectar en futuros estudios.

Recomendaciones

En futuros estudios relacionados con la evaluación del potencial fertilizante de lodos de fondo de la industria de palma africana, se recomienda el uso de mayor cantidad de unidades experimentales por tratamiento, por tanto, se sugiere establecer composiciones utilizando únicamente variaciones entre 50 a 100% del lodo deshidratado sobre el cultivo en estudio.

Se recomienda que para estudios posteriores se realice de forma experimental el deshidratado de lodos de fondo manteniendo un espesor de 200 a 300 mm, que es el establecido teóricamente en lechos de secado. Esto con el fin de registrar el tiempo en días necesario para alcanzar una humedad inferior al 15% (requerido en fertilizantes orgánico-minerales) bajo las condiciones meteorológicas propias de municipios del Meta productores de palma africana como San Martín y San Carlos de Guaroa. Lo anterior debido a que se tiene poca o nula información teórica al respecto.

Durante la deshidratación experimental se recomienda remover el lodo cada 2 a 3 días, esto con el fin de evitar la formación de gránulos muy grandes cada vez más difíciles al quiebre, que en mayor escala requiere, por ejemplo, de una máquina trituradora para obtención de partículas pequeñas de lodo seco y posterior aplicación como fertilizante.

Para evaluar el potencial de crecimiento y productividad que ofrece el lodo seco en plántulas de palma africana en próximas investigaciones, se sugiere adoptar más variables de crecimiento como peso seco de la hoja, densidad de raíces, y análisis químico de tejido vegetal.

Por último, se recomienda incrementar la investigación hacia las diferentes alternativas de secado de lodos de fondo con el objetivo de determinar las de mayor rendimiento y ventaja económica, puesto que, como se demostró en este estudio, estos lodos en base seca contienen alta concentración de macro y micronutrientes importantes en el suelo. Por otra parte, se aconseja valorar las propiedades químicas registradas en estos lodos de fondo en base seca en otros cultivos con requerimientos nutricionales similares a los de la palma africana, a diferentes composiciones, y en asociación con sus planes de fertilización convencional para incrementar el rendimiento de suelo.

Referencias Bibliográficas

- Agrolab. (2011). Análisis Técnicos, S.A. de C.V. Laboratorio Acreditado ISO 17025:2005. Recuperado el 15 de Febrero de 2021, de Guía de referencia para la interpretación análisis de suelos AGROLAB: http://www.agrolab.com.mx/sitev002/sitev001/assets/interpretacion_fertsuel.pdf
- Althausen, M. (2017). Tratamiento de Efluentes de la Planta de Beneficio-Convertir un residuo en un recurso. *Palmas*, 37(2), 31-37. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11918>
- Andrades, M., & Martinez, M. E. (2014). Fertilidad del suelo y parametros que lo definen. (3ra ed.). Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/267902.pdf>
- Arevalo, P. W. (2010). Manual técnico del cultivo de palma aceitera. Ministerio de agricultura de Perú. <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/direccionesyoficinas/dgca/Cartilla-de-difusion-Palma.pdf>
- Argüelles, J. H., & Carvajal, G. H. (2013). Estadística y diseño de experimentos: Aplicaciones prácticas para diseño de experimentos en sistemas agropecuarios tropicales. (1ra ed.) Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. <https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/34828/64854.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Astudillo Córdoba, F. L., & Bermeo B, L. F. (2011). Diseño de un sistema automatizado de secado, almacenamiento y despacho de lodos deshidratados de la planta de tratamientos de agua potable Sustag y simulación mediante un software especializado. [*Trabajo de grado, Universidad Politecnica Salesiana Ecuador*]. Repositorio institucional. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1369/14/UPS-CT002052.pdf>
- Avendaño Cardenas, F & Martínez González, J. (2015). Recuperación de lodos de lagunas de oxidación provenientes del proceso de extracción de aceite palma, para usar como abono en cultivos de palma africana. [*Trabajo de grado, Universidad Nacional abierta y a distancia UNAD*]. Repositorio institucional. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/3823/91530880.pdf;jsessionid=32BC36AB4659E4C28355712D0879F6F8.jvm1?sequence=3>

- Baligar , V., Virupax, C., & Fageria, N. K. (2005). Soil aluminum effects on growth and nutrition of cacao. *Soil Science and Plant Nutrition*, 51(5), 711. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2005.tb00097.x>
- Basiron, Y., & Abdullah, R. (1996). Situación del aceite de palma en el sureste asiático. *Palmas*, 17(1), 65-69. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/533>
- Bastidas, P., Malacatus, P., & Chuquitarco, P. (2019). Análisis químico y de peligrosidad de lodos del sistema de tratamiento de aguas residuales en la industria de palma. *FIGEMPA: Investigación Y Desarrollo*, 1(2), 30–38. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.1726>
- Blanco Sandoval, J. O. (2006). *Acondicionadores y mejoradores del suelo*. Instituto Colombiano Agropecuario – ICA. <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/handle/11348/4858>
- Camacho, A., Giles, M., Ortegón, A., Palao, M., Serrao, B. y Velázquez O. (2009). Técnicas para el Análisis Microbiológico de Alimentos. [Artículo, Universidad Nacional de México]. Repositorio institucional. http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/TecnicBasicas-Cuenta-mohos-levaduras_6530.pdf
- Castellanos Rozo, J., Merchán, N. A., Galvis, J., & Manjarres, E. H. (2018). Deshidratación de los lodos en lecho de secado y su influencia sobre la actividad biológica de los microorganismos. *Gestión y Ambiente*, 21(2), 242-251. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n2.75876>
- Cortés, C., Cayón, D., Aguirre, V. & Chaves, B. (2006). Respuestas de palmas de vivero a la aplicación de residuos de la planta extractora: I. Desarrollo vegetativo y distribución de materia seca. *Revista Palmas*, 27(3), 23-32. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1186>
- Corzo, J. M., Juracán, R. & Rogel, Sofia. (2017). Parámetros de crecimiento: una herramienta objetiva para la gestion de la productividad. Gremial de Palmicultores de Guatemala-Grepalma. <https://www.grepalma.org/wp-content/uploads/2018/09/boletin-no11-agosto-2017.pdf>
- Díaz, M. E. (2016). *Proceso de secado de lodos y fangos contaminantes utilizando efecto invernadero*. [Trabajo de grado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. Repositorio institucional. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/6638>

- Durán , N., Salas , R., Chinchilla, C., & Peralta, F. (1999). Manejo de la nutrición y fertilización en palma aceitera en Costa Rica. *Congreso nacional de suelos*. 3(3), 305-316. http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_xi/a50-6907-III_305.pdf
- Fallas , J. (2012). Análisis de varianza comparando tres o más medias. [Artículo académico. Universidad para la cooperacion Internacional]. Repositorio institucional. https://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-2/complementarias/analisis_de_varianza_2012.pdf
- FAO. (1986). Los fertilizantes y su uso. FIAT PANIS. <http://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite y Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite. (21 de abril del 2021). SISPA. <https://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Infografi%CC%81a%20Meta%202021.pdf>
- Federación nacional de cultivadores de palma de aceite FEDEPALMA (2018). Informe de Gestión. Fedepalma <http://fedepalma.info/wp-content/uploads/2021/06/Informe-Fedepalma-2018.pdf>
- Florez, V. J., & Rodriguez, M. (2004). Elementos esenciales y beneficiosos. [Artículo. Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional <https://core.ac.uk/download/pdf/143458034.pdf>
- Forero, D. C., Hormaza, P. A., Moreno, L. P., & Ruiz, R. (2012). Generalidades sobre la morfología y fenología de la palma de aceite. CenIpalma. <http://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/107644>
- Franco Bautista, P. (2003). Manual Técnico Manejo de viveros de palma de aceite. Cenipalma. Boletines técnicos. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/boletines/article/view/10500>
- Glatstein, D. A. (2017). Secado de lodos obtenidos en el proceso de purificación de agua. *facultad de ciencias exactas, físicas y naturales*, 4(2), 27-32. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFN/article/view/16434>
- Gómez Giraldo, J. C. (2013). Manual de prácticas de campo y laboratorio y del laboratorio de suelo. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. <https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/2785>

- González, H., Zapata, R. D., & Sadeghian, S. (2009). Caracterización de los ácidos húmicos en suelos de la zona cafetera de Caldas. *Cenicafé*, 60 (1), 25-40. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/156>
- Gutiérrez Soto, M. V., & Torres Acuña, J. (2013). Síntomas asociados a la deficiencia de boro en la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq) en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 24(2), 441-449. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v24i2.12547>
- Hock, L. S., Baharuddin, A. S., Ahmad, M. N., Md-Shah, U. K., Rahman, N. A., Aziz, S. A., Hassan, M. A. & Shirai, Y. (2009). Physicochemical Changes in Windrow Co-Composting Process of Oil Palm Mesocarp Fiber and Palm Oil Mill Effluent Anaerobic Sludge. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 3(3), 2-4. https://www.researchgate.net/publication/272294083_Physicochemical_Changes_in_Windrow_Co-Composting_Process_of_Oil_Palm_Mesocarp_Fiber_and_Palm_Oil_Mill_Effluent_Anaerobic_Sludge
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2020). Boletín climatológico septiembre. IDEAM. http://www.ideam.gov.co/web/tiempoyclima/climatologicomensual?p_p_id=110_INSTANCE_xYvIPc4uxk1Y&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column1&p_p_col_count=2&_110_INSTANCE_xYvIPc4uxk1Y_struts_action=%2Fdocument_library_display%2Fvie
- Kuehl, R. O. (2001). *Diseños de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. (2a. Ed.). Thomson learning. <https://docer.com.ar/doc/cc015n>
- Kurt, M. (2014). Evaluation of solar sludge drying alternatives on costs and area requirements [Trabajo de grado, Universidad Técnica del medio este]. Repositorio institucional <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12617786/index.pdf>
- Lopez, P. P., Montes, A. C., Rodriguez, S. G., Torres, N., Rodriguez, S. M., & Rodriguez, R. (2011). Efecto de diferentes concentraciones de potasio y nitrógeno en la productividad de tomate en cultivo hidropónico. *Tecnociencia*. Chihuahua, 5(2), 99. http://tecnociencia.uach.mx/numeros/v5n2/data/Efecto_de_diferentes_concentraciones_de_potasio_y_nitrogeno_en_la_productividad_de_tomate_en_cultivo_hidroponico.pdf

- Manterola , C., & Pineda, V. (2008). El valor de “p” y la “significación estadística”. Aspectos generales y su valor en la práctica clínica. *Chilena de Cirugía*, 60(1), 86-89.
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-40262008000100018
- Marín, J. G., & Lora, R. (1978). Acidez encalado de suelos. Agrosavia. Capitulo publicado.
<http://hdl.handle.net/20.500.12324/28835>
- Mendoza, H., & Bautista, G. (2002). Unidad 3 Comparaciones de tratamientos. Método Duncan. [Informe de práctica, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional
http://red.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000352/html/un3/cont_317-60.html
- Mesa Dishington, J. (5 de septiembre 2013). *La agroindustria de la palma de aceite en Colombia*. [presentación de diapositivas].
<https://web.fedepalma.org/bigdata/zonaprivada/laagroindustriadelapalmadeaceiteencolombia.pdf>
- Molina Arias, M. (2017). ¿Qué significa realmente el valor de p? *Rev Pediatr Aten Primaria*, 19(76), 377-381.
https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1139-76322017000500014&lng=es&nrm=iso
- Montgomery, D. C. (2004). Diseño y análisis de experimentos. (2ª ed.). LIMUSA S.A de CV GRUPO NORIEGA EDITORES. <https://es.slideshare.net/jairjosemunozsuarez/diseo-y-analisis-de-experimentos-montgomery-ocr>
- Moreno, R., Blanquer, J., & Ibañez, S. (2010). El color del suelo. [Informe de práctica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos]. Repositorio institucional. p.3-4.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/8008/Color%20del%20suelo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Munévar, F. (2001). Fertilización de la palma de aceite para obtener altos rendimientos. *Revista Palmas*, 22(4), 9-17.
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/888>
- Ross, M. (2004). Importancia del magnesio para altos rendimientos sostenibles en palma de aceite. *palmas*, 25(2), 98-104.
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1071>
- Ordaz Sanz, J. A., Melgar Hiraldo, M. C., & Rubio, C. M. (2010). Métodos estadísticos y econométricos en la empresa y para finanzas. *Universidad Pablo de Olavide*.
<http://libros.metabiblioteca.org/handle/001/362>

- Otiniano, A., Meneses Florián, L., Bello Amez, S., & Blas Sevillano, R. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>
- Owen, E. J. (1992). Fertilización de la palma (*Elaeis guineensis* Jacq) en Colombia. *Palmas*, 13(2), 39-64. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/344>
- Patiño, R., Puentes Paramo, Y. J., & Menjivar Flores, J. C. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria.*, 18(3), 529-541. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:742
- Pérez Plata, A. F., & Ríos Arredondo, M. C. (2018). Diseño conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales para la planta extractora de aceite de palma de la empresa SIGRA S.A. [*Trabajo de grado, Fundacion universidad de america*]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.11839/6730>
- Rahman, Z. A. (2010). El papel del fósforo en el desarrollo sostenible de la palma de aceite (*Elaeis Guineensis*, Jacq.) : producción en suelos tropicales. *Palmas*, 31(especial,), 205-218. de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1526>
- Ramalho, R. (1991). Tratamiento de aguas residuales. Reverté S.A. https://books.google.com.pe/books?id=30etGjzPXyWC&printsec=copyright&hl=es&source=gbps_pub_info_r#v=onepage&q&f=false
- Ramírez, N., Silva, A., Garzón, E. & Yáñez, E. (2011). Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. Boletín Técnico No. 30. Cenipalma. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/boletines/article/download/10502/10492>
- Restrepo, E. (1996). Establecimiento de viveros y previveros. Memorias Primer Curso Internacional de Palma de Aceite. Cenipalma. 434p. <https://es.slideshare.net/yurley88/unidad-1-previveros-y-viveros-de-cultivo-de-la-palma-de-aceite>
- Reyes, L., & Rodríguez, A. (Julio de 2017). Monografía de estudio sobre los impactos ambientales que generan el cultivo y producción de palma de aceite africana (*Elaeis Guineensis* Jacq) en el departamento del Meta. [Trabajo de grado. Universidad Nacional Abierta y a Distancia

- UNAD].<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13482/1121911388.pdf?sequence=7>.
- Rivera, L. E. (2019). Diseño de un secador solar directo de circulación natural tipo invernadero para cacao. [Trabajo de grado. Universidad de Piura]. Repositorio institucional. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4234/IME_270.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rojas , J. A., Cayón , D. G., & Torres, J. (2015). Efecto de la deficiencia de potasio sobre parámetros foliares de palma de aceite. *Revista Palmas*, 36(4), 34. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11643>
- Sanchez, A. (1990). Enfermedades de la palma de aceite en America Latina. *Palmas*, 11(4), 5-38. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/265>
- Santos, J., Ramírez, J., & Acosta, E. Y. (2000). Experiencias en la utilización de aguas residuales y lodos del fondo de las lagunas de estabilización en la plantación Palmar del Oriente. *Palmas*, 21 (especial), 241-249. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/791>
- Santos, D., Teshima, E., Furiam, S., Araújo, R., & Rodrigues, C. M. (2017). Efeito da secagem em leito nas características físico-químicas e microbiológicas de lodo de reator anaeróbico de fluxo ascendente usado no tratamento de esgoto sanitário. *Eng. Sanit. Ambient.* 22(2), 1-8. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016100531>
- Silva Tipantasig, L. G. (2019). Diseño de sistemas para el tratamiento de lodos mediante tecnologías de bajo coste para la Edar Valls Dels Alcalans. [Tesis de maestría, Universidad Politecnica de Valencia]. Repositorio Institucional. <https://riunet.upv.es/handle/10251/134489>
- Technoserve. (2009). Manual tecnico de palma africana. Technoserve. <https://palma.webcindario.com/manualpalma.pdf>
- Torres, E. D., Vargas, M., & Mujica, C. (2010). Evolucion del sector palmicultor. Universidad de investigación y desarrollo (UDI). <https://www.udi.edu.co/images/investigaciones/publicaciones/libros/porter/08/Libro-EvoluciondelSectorPalmicultor.pdf>

- Torres, P., Marmolejo, L. F., & Botina, F. (2005). Mejoramiento del potencial agrícola de lodos digeridos anaeróbicamente con el uso de cal. *Revista unal*, vol 23(2). <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/19978/21116>
- Valencia Bonilla, N. T. (2008). Secado solar de lodos. [*Trabajo de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México*]. Repositorio Institucional. http://132.248.9.41:8880/jspui/handle/DGB_UNAM/TES01000633014
- Vargas Corredor, Y. A., & Pérez, L. I. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 1(1), 59-72p. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>
- Villegas, D. M. (2015). Evaluación de la fertilización de liberación controlada para el primer año en palma aceitera híbrida (*elaeis oleífera* x *elaeis guineensis*). [*Trabajo de grado. Universidad central del Ecuador*]. Repositorio institucional. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/4803/1/T-UCE-0004-34.pdf>
- Wun, W., Chua, G. K. & Chin, S. Y. (2017). Effect of palm oil mill effluent pome treatment by activated sludge. *Journal CleanWAS*. (1)1. 6-9.. https://www.researchgate.net/publication/322002944_Effect_of_palm_oil_mill_effluent_pome_treatment_by_activated_sludge

Apéndices

Apéndice A. Resultados de análisis químico de muestra de suelo utilizado para llenado de bolsas.

 UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS	PROCESO DE GESTIÓN DE APOYO A LA ACADEMIA			
	FORMATO ENTREGA DE RESULTADOS ANÁLISIS QUIMICO DE SUELOS			
	Código: FO-GAA-92	Versión: 02	Fecha de aprobación: 04/06/2019	Página: 1 de 2

AGRICULTOR: MONICA JULIANA RIVERA HERRERA				Fecha: 07/12/2020	
Municipio: SAN MARTIN	Vereda: CHAPARRAL	Finca: LOS ANGELES	Lote: 1		
Altura (msnm)	Área: ha	Topografía: PLANA	Cultivo: PALMA AFRICANA		
Departamento: META		Muestra N°: 624			

ANALISIS DE FERTILIDAD										
Parámetro	pH	Nt (%)	MO (%)	P (ppm)	Al (meq/100 g)	K (meq/100 g)	Ca (meq/100 g)	Mg (meq/100 g)	Na (meq/100 g)	B. T. (meq/100 g)
Resultado	4.2	0.09	1.8	9.1	2.30	0.09	0.50	0.01	0.05	0.65
Valoración	Extremadamente Ácido	Bajo	Bajo	Bajo	Possible Toxicidad por el Al	Bajo	Bajo	Bajo	Nivel Normal	Muy Bajo

ELEMENTOS MENORES (ppm)						OTRAS DETERMINACIONES				
Parámetro	B	Cu	Mn	Fe	Zn	C.O (%)	S	CICA (meq/100 g)	CICe (meq/100 g)	CE (mmhos/cm)
Resultado						1.04		10.00	2.95	
Valoración						Bajo		Medio	Bajo	

FERTILIZACION		
Se recomienda, aplicar:		
1.- N = Nitrógeno	De	a Kg/ha
2.- P = Fósforo (como P ₂ O ₅)	De	a Kg/ha
3.- K = Potasio (como K ₂ O)	De	a Kg/ha

Se sugiere incorporar una de las siguientes cales – neutralizadoras de PH		
A. Carbonato de Calcio:	Ton/ha	C. Hidróxido de Calcio: Ton/ha
B. Cal Dolomita:	Ton/ha	D. Oxido de Calcio: Ton/ha
E. MgO:	Ton/ha	

Relaciones entre Cationes						
Relación	Ca/Mg	Mg/K	Ca/K	Ca+ Mg/K	Ca+ Mg+ K/Al	RAS
Resultado	50,0	0,11	5,56	5,67	0,26	0.10
Valoración	Deficiencia de Mg	Deficiencia de Mg	Margen Adecuado para K.	Dentro del Margen Adecuado para el K	Hay Necesidad de Encalar	Normal

Nota: Consulte al Ingeniero Agrónomo de la zona

TEXTURA			
% Arena	% Limo	% Arcilla	Textura
72	20	8	F.A

Método		 LUIS ALFONSO GUARIN G. Director Laboratorio de Suelos	Fecha de Entrega		
M.O: Walkley Black	B: en frio HCl 0,05M		Día	Mes	Año
S: Fosfato Monobásico de Calcio	P: Bray II				
Cationes: AcNH ₄ , 7N Ph 7,0	Ph 1.1 (Suelo : Agua)				
Elementos Menores: DTPA					
Al: KCl 1N.		14	12	2020	

Apéndice B. Resultados de análisis químico de muestra de lodo seco deshidratado.

 UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS	PROCESO DE GESTIÓN DE APOYO A LA ACADEMIA			
	FORMATO ENTREGA DE RESULTADOS ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS			
	Código: FO-GAA-92	Versión: 02	Fecha de aprobación: 04/06/2019	Página: 2 de 2

AGRICULTOR: MONICA JULIANA RIVERA HERRERA				Fecha: 07/12/2020	
Municipio: SAN CARLOS DE GUAROA		Vereda:	Finca:		Lote: 2 LODO SECO
Altura (msnm)		Área: ha	Topografía:	Cultivo: SUSTRATO ORGANICO PARA CULTIVO DE PALMA AFRICANA	
Departamento: META			Muestra N°: 625		

ANÁLISIS DE FERTILIDAD										
Parámetro	Ph	Nt (%)	MO (%)	P (ppm)	Al (meq/100 g)	K (meq/100 g)	Ca (meq/100 g)	Mg (meq/100 g)	Na (meq/100 g)	B. T. (meq/100 g)
Resultado	6.3	0.75	15.0	378.5	0.40	10.22	15.00	27.50	0.15	52.87
Valoración	Ligeramente Ácido	Alto	Alto	Alto	Probablemente no hay problemas con el Al	Alto	Alto	Alto	Nivel Normal	Alto

ELEMENTOS MENORES (ppm)						OTRAS DETERMINACIONES				
Parámetro	B	Cu	Mn	Fe	Zn	C.O (%)	S	CICA (meq/100 g)	CICe (meq/100 g)	CE (mmhos/cm)
Resultado	3.04	36.87	195.00	238.75	58.75	8.72	232.3	20.00	53.27	
Valoración	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	

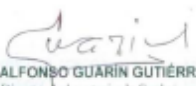
FERTILIZACIÓN		
Se recomienda, aplicar:		
1.- N = Nitrógeno	De	a Kg/ha
2.- P = Fósforo (como P ₂ O ₅)	De	a Kg/ha
3.- K = Potasio (como K ₂ O)	De	a Kg/ha

Se sugiere incorporar una de las siguientes cales – neutralizadoras de PH		
A. Carbonato de Calcio:	Ton/ha	C. Hidróxido de Calcio: Ton/ha
B. Cal Dolomita:	Ton/ha	D. Óxido de Calcio: Ton/ha

Relaciones entre Cationes						
Relación	Ca/Mg	Mg/K	Ca/K	Ca+ Mg/K	Ca+ Mg+ K/Al	RAS
Resultado	0,55	2,69	1,47	4,16	131,80	0.03
Valoración	Deficiencia de Ca	Aceptable	Margen Adecuado para K	Dentro del Margen Adecuado para el K	No hay problemas con el Al	Normal

Nota: Consulte al Ingeniero Agrónomo de la zona

TEXTURA			
% Arena	% Limo	% Arcilla	Textura

Método		 LUIS ALFONSO GUARÍN GUTIÉRREZ Director Laboratorio de Suelos	Fecha de Entrega		
M.O: Walkley Black	B: en frío HCl 0,05M		Día	Mes	Año
S: Fosfato Monobásico de Calcio	P: Bray II				
Cationes: AcNH ₄ , 7N pH 7,0	pH 1.1 (Suelo : Agua				
Elementos Menores: DTPA					
Al: KCl 1N.		14	12	2020	

Apéndice C. Normativa legal vigente que sustenta el aprovechamiento de subproductos de la producción y obtención del aceite de palma.

Normatividad	Lineamientos
Constitución Política de Colombia/1991	“En el Capítulo 3, para los Artículos 79 y 80, se consagran los derechos colectivos a gozar de un ambiente sano y el deber del estado de proteger la diversidad e integridad del ambiente, planificar el manejo de los recursos naturales renovables a fin de garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución y prevenir los factores del deterioro ambiental”. (Constitución política de Colombia, 1991)
Decreto-Ley 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Título III-artículo 34 determina que, se debe realizar esfuerzos para “Reintegrar al proceso natural y económico los desperdicios sólidos, líquidos y gaseosos,provenientes de industrias, actividades do-mésticas o de núcleos humanos en general.” (Decreto 2811, 1974).
Decreto 2667 de 2012	Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones. (Decreto 2667, 2012)
Resolución No. 068370 de 2020	Por el cual se establecen los requisitos para el registro de técnicos de ensayos de eficacia agronómica de bioinsumos para uso agrícola. (Resolución 068370, 2020)
Resolución No. 00150 de 2003	Por el cual se orienta el uso, manejo adecuado y racional de los fertilizantes y acondicionadores del suelo, entre los que se especifican contenidos mínimos permisibles, composición garantizada, entre otras. (Resolución 00150, 2003)
Norma RSPO:	La Mesa Redonda de Aceite de Palma Sostenible, ha establecido criterios para el

	manejo de estos subproductos que ayuden a mitigar el impacto ambiental negativo, evitar la degradación de los suelos asegurando el retorno de nutrientes al agroecosistema de la palma de aceite y que la palmicultura sea económicamente sostenible. (N-RSPO, 2006)
NTC ISO 5667-13/1998:	Guía para el muestro de lodos de aguas residuales y plantas de tratamientos de aguas, esta norma resalta dos tipos básicos de muestra para los lodos, primero muestra completa y segundo muestra aleatoria o puntual. (NTC-ISO 5667, 1998)
NTC 5167/2011	Por la cual se establecen los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, y los valores necesarios para calificarlos según el origen y materiales utilizados para la preparación del mismo, ya sea líquido o sólido, utilizado como abono orgánico en el desarrollo de las prácticas agrícolas. (NTC 5167, 2011)

Apéndice D. Planilla para registro de humedad de lodo y suelo por el método gravimétrico.

Humedad metodo gravimétrico								
Muestra	N°	Peso de capsula	Peso Húmedo	Peso Seco	% Humedad	Promedio % Humedad	pH	Conductividad
1	1.1							
	1.2							
2	2.1							
	2.2							
3	3.1							
	3.2							
4	4.1							
	4.2							
5	5.1							
	5.2							
6	6.1							
	6.2							
7	7.1							
	7.2							
8	8.1							
	8.2							
9	9.1							
	9.2							
Suelo	1							
	2							

Apéndice E. Tabla valores críticos de la F de distribución de Snedecor.

Table 10. Critical Values For The F Distribution																	
This table contains critical values F_{α, ν_1, ν_2} for the F distribution defined by $P(F \geq F_{\alpha, \nu_1, \nu_2}) = \alpha$.																	
$\alpha = .05$																	
ν_2	ν_1																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	40	60	120	∞
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	245.95	248.01	250.10	251.14	252.20	253.25	254.25
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.43	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.70	8.66	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.86	5.80	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.62	4.56	4.50	4.46	4.43	4.40	4.37
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	3.94	3.87	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.51	3.44	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.22	3.15	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.01	2.94	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.85	2.77	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.72	2.65	2.57	2.53	2.49	2.45	2.41
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.62	2.54	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.53	2.46	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.46	2.39	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.40	2.33	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.35	2.28	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.31	2.23	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.27	2.19	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.23	2.16	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.20	2.12	2.04	1.99	1.95	1.90	1.85
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.18	2.10	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.15	2.07	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.13	2.05	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.11	2.03	1.94	1.89	1.84	1.79	1.74
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.09	2.01	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.01	1.93	1.84	1.79	1.74	1.68	1.63
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	1.92	1.84	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03	1.87	1.78	1.69	1.63	1.58	1.51	1.44
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.84	1.75	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.75	1.66	1.55	1.50	1.43	1.35	1.26
∞	3.85	3.00	2.61	2.38	2.22	2.10	2.01	1.94	1.88	1.84	1.67	1.58	1.46	1.40	1.32	1.23	1.00

Apéndice F. Número de hojas registradas por las 30 plántulas de palma africana registrados cada 30 días durante 4 meses de cultivo.

Nº hojas emitidas (Día 1)						
Unidades experimentales	Tratamientos					
	T1	T2	T3	T4	T5	Testigo
1	4	4	4	4	4	4
2	4	4	4	4	4	4
3	4	4	4	4	5	4
4	4	4	4	4	3	4
5	4	4	4	4	4	4
Total	20	20	20	20	20	20
Promedio	4	4	4	4	4,0	4
%CV	0	0	0	0	18	0

Nº hojas emitidas (Día 30)						
Unidades experimentales	Tratamientos					
	T1	T2	T3	T4	T5	Testigo
1	5	5	5	4	5	5
2	4	5	5	5	5	4
3	5	5	5	5	6	5
4	5	5	5	4	4	4
5	5	5	5	4	5	4
Total	24	25	25	22	5	22
Promedio	4,8	5	5	4,4	5	4,4
%CV	9	0	0	12	14	12

Nº hojas emitidas (Día 60)						
Unidades experimentales	Tratamientos					
	T1	T2	T3	T4	T5	Testigo
1	6	6	6	5	6	6
2	5	5	6	6	6	5
3	6	6	6	6	7	6
4	6	6	6	5	5	5
5	6	7	6	5	6	5
Total	29	30	30	27	30	27
Promedio	5,8	6	6	5,4	6	5,4
%CV	8	12	0	10	12	10

Nº hojas emitidas (Día 90)						
Unidades experimentales	Tratamientos					

	T1	T2	T3	T4	T5	Testigo
1	7	7	7	7	7	8
2	7	7	7	7	7	7
3	8	7	8	7	7	8
4	7	8	8	7	6	7
5	7	8	7	7	7	7,0
Total	36	37	37	35	34	37
Promedio	7,2	7,4	7,4	7	6,8	7,4
%CV	6	7	7	0	7	7

Nº hojas emitidas (Día 120)						
Unidades experimentales	Tratamientos					
	T1	T2	T3	T4	T5	Testigo
1	9	8	7	7	7	8
2	8	8	7	8	8	7
3	9	9	8	7	7	9
4	8	8	8	7	6	8
5	8	9	8	7	8	8
Total	42	42	38	36	36	40
Promedio	8,4	8,4	7,6	7,2	7,2	8
%CV	7	7	7	6	12	9

Apéndice G. Crecimiento de área foliar registrado por las 30 plántulas de palma africana, cada 30 días durante 4 meses de cultivo.

Area foliar de la palma (Día 30)						
Repetición	Tratamientos					
	T1	T2	T3	T4	T5	Testigo
1	69,04	124	204,52	5,4	138,92	142,35
2	128,08	109,6	90	132,8	155,24	41,04
3	31,2	109,42	75,8	129,68	161,55	148,28
4	204,8	134,75	228,78	36,84	115,68	35,2
5	205	474,3	192,6	59,44	167,9	
Total	638,12	952,07	791,7	364,16	739,29	366,87
Promedio	127,624	190,414	158,34	72,832	147,858	91,7175
%CV	61,54	83,53	44,38	77,82	14,18	67,58

Área foliar de la palma (Día 60)						
Repetición	Tratamientos					
	T1	T2	T3	T4	T5	Testigo

1	108,8	196	118,76	122,85	197,12	46,95
2	181,12	62,85	306	101,38	106,6	65,11
3	240	194,94	152,08	114,4	287,2	44,14
4	170,4	110,81	42,06	662,46	74,74	126,89
5	11,56	300,9	69,12	178,2	76	
Total	711,88	865,5	688,02	1179,29	741,66	283,09
Promedio	142,376	173,1	137,604	235,858	148,332	70,7725
%CV	60,88	52,77	75,12	101,87	62,20	54,47

Área foliar de la palma (Día 90)						
Repetición	Tratamientos					
	T1	T2	T3	T4	T5	Testigo
1	105,38	204,23	122,98	264,65	240,72	270,74
2	442,9	323,15	0	173,48	88,65	229,85
3	328,8	136,32	213,12	208,05	-12,46	110,06
4	178,44	239,64	269,92	-297	36,74	249,87
5	261,8	157,12	182,42	241,8	369,28	
Total	1317,32	1060,46	788,44	590,98	722,93	860,52
Promedio	263,464	212,092	157,688	118,196	144,586	215,13
%CV	49,73826701	34,9015876	65,25306133	198,527	108,8917301	33,4721413

Área foliar de la palma (Día 120)						
Repetición	Tratamientos					
	T1	T2	T3	T4	T5	Testigo
1	203,02	138,89	13,16	-14	-73,08	66,72
2	231,74	167,44	193,2	168,34	65,59	44,1
3	101,7	315,84	-28,64	-15,33	20,16	118,72
4	193,08	65,36	127,52	77,28	239,76	268,98
5	148,12	184,76	136,62	25,34	90,02	
Total	877,66	872,29	441,86	241,63	342,45	498,52
Promedio	175,532	174,458	88,372	48,326	68,49	124,63
%CV	29,08	52,31	104,63	159,30	166,77	81,18

Apéndice H. Propiedades físicas y contenido de nutrientes exigidos por la NTC 5167 para clasificación como fertilizantes orgánico-minerales.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 5167 (Segunda actualización)

ANEXO E
(Informativo)

**INFORME DE RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS A CARACTERIZAR Y A
GARANTIZAR PARA MATERIALES ORGÁNICOS SÓLIDOS Y ORGÁNICO-MINERALES
SÓLIDOS**

Parámetro	Parámetro a caracterizar		Parámetro a Garantizar		Método analítico (NTC o método aplicado)
	Resultado obtenido	Unidades	Material orgánico sólido	Material orgánico Mineral sólido	
Humedad		%	Máximo 20 (origen animal) Máximo 30 (origen vegetal)	Máx. 15	
Cenizas		%	Máximo 60	N.A.	
Pérdidas por volatilización		%	N.A.	N.A.	
Carbono orgánico oxidable		%	Mínimo 15	> 5	
pH (pasta de saturación)			> 4 < 9	N.A.	
Densidad real (en base seca)		g/cm ³	Máximo 0,6	N.A.	
Conductividad eléctrica		dS/m	N.A.	N.A.	
Retención de humedad		%	Mínimo 100	N.A.	
Capacidad de intercambio catiónico		(meq/100g)	Mínimo 30	N.A.	
C/N orgánico			N.A.	N.A.	
Nitrógeno total (N _{org} +N _{NH4} +N _{NH2} + N _{NO3})		%	Si >1	Mínimo 2 ⁽²⁾	
Fósforo total (P ₂ O ₅)		%	Si >1	Mínimo 2 ⁽²⁾	
Fósforo asimilable (P ₂ O ₅)		%	N.A.	Si lo tiene ⁽²⁾	
Potasio total (K ₂ O)		%	Si >1	Mínimo 2 ⁽²⁾	
Potasio Soluble en agua (K ₂ O)		%	N.A.	Si lo tiene ⁽²⁾	
Calcio total (CaO)		%	N.A.	Si >1 ⁽²⁾	
Magnesio total (MgO)		%	N.A.	Si >1 ⁽²⁾	
Azufre total (S)		%	N.A.	Si >1 ⁽²⁾	
Hierro total (Fe)		%	(3)	(1) (2)	
Manganeso total (Mn)		%	(3)	(1) (2)	
Cobre total (Cu)		%	(3)	(1) (2)	
Zinc total (Zn)		%	(3)	(1) (2)	
Boro total (B)		%	(3)	(1) (2)	

Parámetro	Parámetro a caracterizar		Parámetro a Garantizar		Método analítico (NTC o método aplicado)
	Resultado obtenido	Unidades	Material orgánico sólido	Material orgánico mineral sólido	
Sodio total (Na)		%	N.A.	N.A.	
Silicio total (SiO ₂)		%	Máximo 50 de cenizas	Máximo 50 de cenizas	
Metales pesados		mg/kg	Según Tabla 1	Según Tabla 2	
N.A.: No se aplica (esta expresión implica que el parámetro se debe conocer para efectos de clasificación del producto pero no está considerado dentro de los parámetros a garantizar). (1) Los valores límite mínimos están definidos en la legislación nacional vigente para fertilizantes. (2) La sumatoria del contenido de los elementos a garantizar debe ser mínimo 10 % y los valores considerados en la sumatoria deben ser mínimo 1 %. (3) Este requisito no se exige en los materiales orgánicos sólidos.					
RESULTADOS EXPRESADOS EN BASE HÚMEDA					

Apéndice I. Procedimiento para la conversión de unidades de concentración a porcentaje.

$$1 \text{ mg/kg} \rightarrow 1 \text{ ppm}$$

$$1\% \rightarrow 10000 \text{ ppm}$$

$$378,5 \text{ mg/kg Fósforo} \rightarrow 378,5 \text{ ppm} \rightarrow 0,03785\% \text{ fósforo}$$

Apéndice J. Tabla de elementos en concentraciones de meq/100g y ppm

Parámetro	ppm (g/ton)	peso molecular (g/mol)	Meq/100g
Potasio	3996,00	39,09	10,22
Calcio	3005,90	40,07	15,00
Magnesio	3341,9	24,3	27,51
Sodio	34,5	22,99	0,15