



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos (ERIS)

**CARACTERIZACIÓN Y VALORIZACIÓN DE LOS SUBPRODUCTOS GENERADOS EN EL
PROCESO DE LA EXTRACCIÓN Y REFINACIÓN DEL ACEITE DE LA PALMA AFRICANA**

Inga. Cecilia Del Carmen Arrocha Anguizola

Asesorado por el Msc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos

Guatemala, abril de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN Y VALORIZACIÓN DE LOS SUBPRODUCTOS GENERADOS EN EL
PROCESO DE LA EXTRACCIÓN Y REFINACIÓN DEL ACEITE DE LA PALMA AFRICANA**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA
Y RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

INGA. CECILIA DEL CARMEN ARROCHA ANGUIZOLA
ASESORADO POR EL MSC ING. ADÁN ERNESTO POCASANGRE
COLLAZOS

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE
**MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN CIENCIAS
DE INGENIERÍA SANITARIA**

GUATEMALA, ABRIL DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Inga. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR	Msc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	Msc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	Msc. Ing. Pedro Saravia Celis

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CARACTERIZACIÓN Y VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS GENERADOS EN EL PROCESO DE LA EXTRACCIÓN Y REFINACIÓN DEL ACEITE DE LA PALMA AFRICANA

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, con fecha 24 de septiembre de 2019.



Cecilia Del Carmen Arrocha Anguizola

Correo electrónico: ceci.arrocha@gmail.com

Carné No. 201990374



Universität Potsdam, Institut für Ernährungswissenschaft, AG
Instrumentelle Analytik in der Ernährungswissenschaft, Arthur-
Scheunert-Allee 114-116 14558 Nuthetal OT Bergholz-Rehbrücke

**Mathematisch-Naturwissenschaftliche
Fakultät**

**University of San Carlos
of Guatemala.**

Institut für Ernährungswissenschaft

AG Instrumentelle Analytik in der
Ernährungswissenschaft
apl. Prof. Dr. Harshadrai M. Rawel

Email: rawel@uni-potsdam.de

Telefon: (033200) 88-5525

Telefax: (033200) 88-5541

Datum: 22.07.2020

DAAD support for Cecilia Del Carmen Arrocha Anguizola

Hereby, I inform you that the student Cecilia Del Carmen Arrocha Anguizola with Passport PA0234421 (date of birth: 10.01.1992; Panama; - student of Prof. Dr. Pedro Saravia from the University of San Carlos of Guatemala - Regional School of Sanitary Engineering and Water Resources (ERIS)), has successfully completed the characterization of by-products and wastewater from the palm-oil manufacture (African Palm oil - characterization and valorization opportunities of the processing by-products) as part of her master thesis.

The characterization was carried out since March to July of the present year in the laboratory at the University of Potsdam, Institute of Nutritional Science 14558 Nuthetal (Bergholz-Rehbrücke) Arthur-Scheunert-Allee 114-116.

Yours sincerely,

apl. Prof. H. M. Rawel, Bergholz-Rehbrücke, den 22.07.2020
Head of the working group: Instrumental Analysis in Nutritional Science

Bankverbindung:
Landeszentralbank
Kontonummer: 160 015 00
BLZ: 160 000 00

Dienstgebäude:
Arthur-Scheunert-Allee 114-116
14558 Nuthetal

E-mail: rawel@uni-potsdam.de

Internet:
<http://www.uni-potsdam.de/u/ewi/>

Guatemala, 28 de abril 2021

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS):

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de asesor y coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el informe final del Estudio Especial titulado:

**CARACTERIZACIÓN Y VALORIZACIÓN DE LOS SUBPRODUCTOS
GENERADOS EN EL PROCESO DE LA EXTRACCIÓN Y REFINACIÓN DEL
ACEITE DE LA PALMA AFRICANA**

Presentado por la estudiante:

Inga. Cecilia del Carmen Arrocha Anguizola

Les manifiesto que la estudiante cumplió en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos - ERIS- y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio. Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,
“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Adan
Pocasangre
Collazos

Digitally signed by Adan
Pocasangre Collazos
Date: 2021.04.28
10:31:24 -06'00'

M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre

Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria



ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA
SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Guatemala, 29 de abril de 2021

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre, M.Sc. Ing. Zenón Much Santos y, M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria ; M.Sc Ing. Adán Ernesto Pocasangre y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Jéssica Melgarejo Monterroso, Colegiada No. 27003, al trabajo de la estudiante Inga. Cecilia del Carmen Arrocha Anguizola, titulado: **CARACTERIZACIÓN Y VALORIZACIÓN DE LOS SUBPRODUCTOS GENERADOS EN EL PROCESO DE LA EXTRACCIÓN Y REFINACIÓN DEL ACEITE DE LA PALMA AFRICANA.** En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los veintinueve días del mes de abril de 2021.

Imprimase

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
DIRECTOR

ACTO QUE DEDICO A:

Mis familiares

Los pilares de mi formación personal y profesional. Su apoyo fue vital para llevar a cabo estos estudios.

Mis amigos más allegados

Ustedes que creyeron en mí desde el día uno. Su apoyo y acompañamiento, así fuera a la distancia, fue un soporte esencial.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por permitirme tener esta oportunidad y las bendiciones recibidas en este caminar de vida.
Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD)	Por haber creído y confiado en mí al otorgarme la beca para llevar a cabo este crecimiento académico, el cual no habría sido posible sin su apoyo.
USAC-ERIS, Laboratorio del Instituto de Ciencias Nutricionales de la Universidad de Potsdam, Alemania	Por las oportunidades brindadas, los conocimientos impartidos y asesorías, los cuales contribuyen en este camino de constante aprendizaje llamado vida.
Todas las personas que me apoyaron directa e indirectamente en esta etapa de mi vida	A ustedes que me brindaron sus consejos, ayuda, tiempo y apoyo, hoy les agradezco de corazón y me tomaré el tiempo de agradecerles individualmente. Sin ustedes, el resultado de mi crecimiento académico no habría sido el mismo. Culmino citando a Lyndon Johnson: “No hay problema que no podamos resolver juntos, y muy pocos que podamos resolver por nosotros mismos”. ¹

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVII
JUSTIFICACIÓN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
HIPÓTESIS.....	XXIII
ANTECEDENTES.....	XXV
ALCANCES Y LIMITACIONES.....	XXIX
INTRODUCCIÓN.....	XXXI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Generalidades de <i>Elaeis guineensis</i> Jacq.....	2
1.2. Producción mundial de aceite de palma africana.....	4
1.3. Procesos de la industria de palma africana.....	6
1.3.1. Proceso en la extractora de aceite de palma africana.....	6
1.3.2. Proceso en la refinería de aceites vegetales.....	9
1.3.2.1. Tratamiento de aguas residuales.....	11
1.4. Abono orgánico.....	18
1.5. Parámetros de análisis.....	18
1.5.1. Compuestos físicos.....	19
1.5.2. Compuestos químicos.....	20

1.5.3.	Compuesto patógenos	22
1.5.4.	Compuestos nutricionales	22
1.6.	Norma para reúsos en Guatemala	26
2.	METODOLOGÍA	29
2.1.	Ubicación del estudio.....	29
2.2.	Determinación de los puntos de muestreo	29
2.3.	Selección de parámetros	30
2.4.	Muestreo	30
2.4.1.	Cantidad y tipo de muestreo	30
2.4.2.	Implementos de seguridad al muestrear	32
2.4.3.	Almacenamiento y conservación de las muestras...32	
2.4.4.	Periodo de muestreo.....	33
2.5.	Análisis de parámetros	35
2.5.1.	Laboratorios de análisis	35
2.5.2.	Preparación de muestras de raquis sin fruto, agua residual y fibra.....	36
2.5.2.1.	Determinación de compuestos nutricionales	36
2.5.3.	Preparación de muestras de lodos.....	39
2.5.3.1.	Determinación de compuestos físicos	39
2.5.3.2.	Determinación de compuestos químicos.....	41
2.5.3.3.	Determinación de compuestos patógenos	44
2.6.	Análisis de datos	44

3.	RESULTADOS	45
3.1.	Resultados de la extractora de aceite de palma africana	45
3.2.	Resultados de la refinería de aceites vegetales	46
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	49
4.1.	Subproductos de la extractora de aceite de palma africana	49
4.2.	Subproducto de la refinería de aceites vegetales	52
4.3.	Opciones de aprovechamiento de subproductos	58
	CONCLUSIONES	63
	RECOMENDACIONES	65
	BIBLIOGRAFÍA.....	67
	APÉNDICES.....	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estructura del fruto de <i>Elaeis guineensis</i> Jacq.	3
2.	Países productores de aceite de palma africana.	5
3.	Esquema del proceso en la extractora del aceite de palma africana	9
4.	Esquema del proceso de la refinería de aceites vegetales	11
5.	Esquema del proceso en la PTAR de la refinería de aceites vegetales	17
6.	Capacidad antioxidante en los subproductos analizados.....	49
7.	Concentración de compuestos de vitamina A.....	50
8.	Concentración de compuestos de vitamina E.....	51
9.	Calcio en muestras de lodos	52
10.	Potencial de hidrógeno en muestras de lodos	53
11.	Conductividad eléctrica en muestras de lodos.....	54
12.	Macronutrientes en muestras de lodos.....	55
13.	Micronutrientes en muestras de lodos	55
14.	Relación carbono-nitrógeno en muestras de lodos.....	56
15.	Humedad en las muestras de lodos	57

TABLAS

I.	Condiciones climáticas ideales para el desarrollo de <i>Elaeis guineensis</i> <i>Jacq.</i>	2
II.	Uso de terreno para producir una tonelada de aceite	4
III.	LMP en lodos para ser aplicados al suelo	26
IV.	Subproductos muestreados.....	30

V.	Cantidad y tipo de muestreo.....	31
VI.	Almacenamiento y conservación de muestras.....	32
VII.	Fecha de muestreo en la extractora de aceite de palma africana.....	33
VIII.	Fecha de muestreo en la refinería de aceites vegetales.....	34
IX.	Parámetros por muestra y lugar efectuado.....	36
X.	Resultados de subproductos procedentes de la extractora de aceite de palma africana.....	45
XI.	Resultados fisicoquímicos de lodos procedente de la PTAR.....	46
XII.	Resultados bacteriológicos de lodos procedentes de la PTAR.....	48

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
α	Alfa
β	Beta
cm^3	Centímetros cúbicos
δ	Delta
γ	Gamma
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
g/kg	Gramos sobre kilogramos
g/L	Gramos sobre litro
ha	Hectáreas
h/d	Horas por día
kPa	Kilo pascal
m^3	Metro cúbico
m s.n.m.	Metros sobre nivel del mar
$\mu\text{S/cm}$	Micro Siemens por centímetro
mg	Miligramo
mg/L	Miligramo entre litro
mg/kg	Miligramo por kilogramo
mL	Mililitro
mm	Milímetro
mL/min	Mililitros por minuto
%	Porcentaje

GLOSARIO

Afluente	Agua que abastece otro cuerpo de agua o ingresa a un proceso.
Agua residual	El resultado de un agua que ha sido usada y contiene sustancias, por lo cual debe ser tratada para su disposición.
Agua tratada	Agua que ha pasado por un proceso de tratamiento para mejorar su calidad.
Concentración	Magnitud que expresa la cantidad o relación de una sustancia por unidad de volumen (por ejemplo mg/kg).
DBO	Demanda biológica de oxígeno que mide la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia orgánica de una muestra.
Disolvente	También se le conoce como solvente. Es una sustancia química que se utiliza para diluir.
Efluente	Agua que fluye de una instalación o de un proceso.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

ICA	Instituto Colombiano Agropecuario, institución pública que contribuye al desarrollo sostenido del sector agropecuario, pesquero y acuícola.
INTAGRI	Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura dedicada a la capacitación agrícola y la transferencia de tecnología.
Isómeros	Compuesto con los mismos elementos y proporciones que otro, pero con algunas diferencias en la estructura molecular.
ITC	Centro de Comercio Internacional, acelera el crecimiento económico de países en desarrollo en el mercado global en conjunto a un desarrollo sostenible.
LMP	Límite máximo permisible.
Lodos	Son los materiales semisólidos formados por coagulación, floculación y sedimentación en un proceso. Deben ser recolectados, manejados, tratados y disponer de los mismos según las normativas de cada región.
NMP	Número más probable.
Oxidante	Compuesto químico que oxida a otras sustancias en una reacción.

PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales que consta de diferentes tipos de procesos para mejorar la calidad de las aguas residuales a tratar.
Quelante	Compuesto con propiedad de combinarse con iones positivos bivalentes y trivalentes para formar complejos estables.
Radical libre	Compuesto que posee uno o más electrones desapareados formado por reacciones químicas a partir de rupturas homolíticas.
rpm	Revoluciones por minuto.
Subproducto	Producto secundario obtenido de un proceso industrial.
Tiempo de retención	Cantidad de tiempo que permanece un líquido en un proceso.
UFC	Unidades formadoras de colonia.

RESUMEN

La presente investigación consiste en determinar y caracterizar los subproductos generados en una industria de aceite de palma africana de Guatemala para considerar sus oportunidades de reuso sanitario. En su contenido se desarrolla la información general sobre la palma africana, la descripción de los procesos llevados a cabo en la extracción y refinación del aceite, y el tratamiento de las aguas residuales que se lleva a cabo en la refinería.

Se realiza análisis de laboratorios de parámetros nutricionales, capacidad antioxidante, vitamina A y E, en Potsdam, Alemania, a los subproductos de raquis sin fruto, fibra del pericarpio y agua residual del pretratamiento del aceite crudo de la extractora de aceite de palma africana. Mientras que a los lodos generados en la PTAR de la refinería se les realiza análisis de laboratorio de parámetros físicos, químicos y microbiológicos en la Ciudad de Guatemala.

Con base en los resultados obtenidos el mayor contenido de capacidad antioxidante se encuentra en el agua residual con 2 263,94 mg TE/kg. Los mayores componentes de vitamina A detectados son los carotenos beta, y el mayor componente de vitamina E detectado es el gamma-Tocotrienol en la fibra con 16,55 mg/kg. Por otro lado, se determina un déficit de nitrógeno en los lodos para ser reutilizados como abono orgánico. Se obtiene para la hipótesis un cumplimiento nulo para los resultados de vitaminas y lodos.

Se recomienda realizar caracterización a los demás subproductos generados en las industrias, y expandir la presente investigación con mayor cantidad de muestreos y parámetros de análisis. También la adecuación de los

lodos para realizar pruebas de campo y evaluar su comportamiento como abono orgánico.

ABSTRACT

The following research looks to determine and characterize the by-products generated in an African palm oil industry in Guatemala to consider their opportunities in sanitary reuse. In its content is developed the general information about African Palm, the processes of extraction and refining of the oil. Wastewater treatment of the African Palm is carried out in a refinery.

A series of laboratory analysis of nutritional parameters are performed. The antioxidant capacity, vitamin A and E tests are performed to fruitless bunch by-products, pericarp fiber, and wastewater from the crude oil pretreatment of the African palm oil extractor. These tests are staged in Potsdam, Germany. Meanwhile, the sludge generated in the refinery's WWTP undergoes laboratory analysis of physical, chemical and microbiological parameters staged in Guatemala City.

Based on results, the greatest antioxidant content is in wastewater, with 2 263,94 mgTE/kg. The major components of vitamin A detected are beta carotenes, and the major component of vitamin E detected is gamma-Tocotrienol located in the fiber with 16,55 mg/kg. On the other hand, a nitrogen deficit is found in the sludge. Therefore it cannot be reused as organic fertilizer. A null compliance is obtained for the hypothesis for the results of vitamins and sludge.

It is recommended to characterize the other by-products generated in the industries and expand the present investigation with a greater number of samples and analysis parameters. It is also encouraged to evaluate the sludge suitability to carry out field tests and its behavior as an organic fertilizer.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las industrias a nivel mundial, por medio de la utilización de materias primas, se encargan de elaborar productos. Como resultado a estos procesos industriales se generan residuos llamados subproductos, los cuales al no ser manejados correctamente pueden generar efectos negativos al medio ambiente y por ende a la salud del ser humano. La industria del aceite de la palma africana, tanto en su extracción como en su refinamiento, genera diferentes subproductos a lo largo de todo el proceso.

Según Escobar y otros autores la demanda de aceites vegetales está lógicamente en función del crecimiento de la población mundial². Por ende el crecimiento en la demanda del aceite proveniente de la palma africana genera una expansión en las plantaciones y un aumento de producción. Teniendo como resultado un aumento en los subproductos generados en el proceso de extracción y refinamiento del aceite de palma.

Al contar con mayor generación de subproductos, lo cual requiere mayor espacio y recursos para su disposición final, se aumenta el riesgo de una incorrecta disposición final de los mismos y los costos para la agroindustria. Por consiguiente, ¿se podrían aprovechar y aplicar estos subproductos como materia prima en otros ámbitos que contribuyan a su disminución de forma sanitaria y disminuir los gastos de esta agroindustria?

² ESCOBAR, Ricardo; PERALTA, Francisco; ALPÍZAR, Gerardo. *Perspectivas para el desarrollo de la industria de la palma de aceite a nivel mundial*. pp. 51-59

JUSTIFICACIÓN

Después de extraer el aceite de palma se generan subproductos como raquis sin fruto, fibra, cenizas, aguas residuales y lodos. El aceite obtenido pasa a un proceso de refinado, llevado a cabo en la refinería, generando así subproductos en el proceso como la tierra de filtrado, cenizas, aguas residuales y lodos resultantes de la PTAR.

Tailandia, para el año 2003, producía 0,7 millones de toneladas anuales de aceite de palma, el cual generaba los siguientes subproductos: 0,6 millones ton/año de fibra y 0,9 millones ton/año de raquis sin fruto³.

Según Nagendran y otros autores indicaron en el año 2000 que el aceite de palma contiene compuestos antioxidantes, como la vitamina E. Por consiguiente, los subproductos generados en su proceso de obtención como la fibra de la pulpa, agua residual al macerar la fruta, pueden contener parte de este aporte nutricional, los cuales al ser caracterizados se pueden considerar, según los resultados obtenidos, para su reutilización como parte de suplemento alimenticio en animales (aves, porcino)⁴.

Hoy día la PTAR de la refinería de aceite vegetal genera aproximadamente de 1 a 2 toneladas diarias de lodos. Por el momento la disposición de los mismos se da por la contratación de una empresa especializada para que efectúe el retiro

³ CHAVALPARIT, Orathai; RULKENS, Wim; MOL, Arthur; KHAODHAIR, S. *Options for environmental sustainability of the crude palm oil industry in Thailand through enhancement of industrial ecosystems*. pp. 271-287

⁴ NAGENDRAN, B; UNNITHAN, U; CHOO, Y; SUNDRAM, Kalyana. *Characteristics of red palm oil, a caroene and vitamin E rich refined oil for food uses*. pp. 189-194

de los mismos según el peso, generando así un alto costo económico. Al caracterizar estos lodos se busca evaluar su reutilización, como abono orgánico, buscando disminuir el impacto económico producido a la industria y contribuyendo a la sostenibilidad del medio ambiente.

OBJETIVOS

General

Caracterización de los residuos generados en el proceso de extracción y refinación de aceite de palma africana para ser valorizados con respecto a su reutilización sanitaria.

Específicos

1. Identificar los subproductos generados en la extracción y refinación del aceite de palma africana.
2. Analizar el contenido de antioxidantes, vitaminas A y E de los subproductos generados en la extracción de aceite de palma africana.
3. Caracterizar componentes químicos, físicos y microbiológicos de los lodos generados en la PTAR de la refinación de aceite de palma africana.
4. Valorizar los subproductos generados en la extractora y refinación del aceite de palma.

HIPÓTESIS

Los subproductos generados en el proceso de la extracción de palma africana cuentan con un contenido de vitaminas mayor a 300 mg/kg para ser aprovechados como materia prima en suplemento alimenticio de animales, y los lodos de la PTAR de la refinera de aceite de palma africana cuentan con una relación de carbono - nitrógeno entre 25:1 a 40:1, ideal para ser aprovechados como abono orgánico.

ANTECEDENTES

La palma africana o palma aceitera es una de las economías de plantaciones más valiosas, siendo una fuente de aceite vegetal para diferentes alimentos de consumo humano y productos de belleza. Por lo tanto la industria de la misma ha tenido un crecimiento gradual en Centroamérica. Este desarrollo agroindustrial aporta beneficios a las comunidades aledañas, sin embargo genera mayor cantidad de residuos. Aunque estos residuos no representan el valor principal de la transformación, pueden ser de materia prima para otro producto.⁵

De León señaló en el año 2013 que en la industria de la palma africana se llevan a cabo dos procesos: el agrícola y el industrial⁶. El proceso agrícola conlleva la plantación, desarrollo y cosecha del fruto de la palma que es la materia prima para la extracción de aceite, mientras que el proceso industrial se subdivide en dos: la extracción de aceite de palma y su refinación.

En la revisión de la composición nutricional del aceite de palma por Mora y otros autores en el año 2000, titulada *Aceite de palma, salud y nutrición humana*, se indica que el aceite de palma africana cuenta con una composición de vitaminas liposolubles, siendo el aceite sin refinar rico en carotenos, precursores de la vitamina A y potentes antioxidantes, entre 500 – 700 mg/kg y rico en

⁵ SAVAL, Susana. *Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro*. pp. 14-46

⁶ DE LEÓN, Gustavo. *Incrementan los índices de productividad mejorando el proceso productivo de aceite de palma africana a través de la implementación de un programa de producción más limpia*. p. 45

vitamina E entre 600 a 1 000 mg/kg, concluyendo que el aceite de palma aporta energía y micronutrientes a la dieta del ser humano⁷.

Ruiz y otros autores en el año 2015 llevaron a cabo un experimento en el centro experimental Santa Lucía de la Universidad de la Paz, Colombia, titulado *Evaluación del fruto entero de palma de aceite ofrecido libitum en la alimentación de pollos de engorde*.

El mismo consistió en utilizar el fruto junto con el raquis de la palma africana (*Elaeis guineensis jacq.*) como complemento en la alimentación de engorde para pollos en etapas finales, obteniendo resultados favorables para el índice de conversión alimenticia (relación entre el alimento consumido con el peso ganado), concluyendo así que la utilización del fruto de la palma africana es recomendable como fuente de energía para las regiones cálidas donde los animales sufren estrés calorífico, que disminuye el consumo de alimento y aumenta el consumo de agua⁸.

Choo y otros autores recolectaron en 1996 fibras generadas en diferentes extractoras de aceite de palma africana en Malasia y con diferentes solventes extrajeron los residuos de aceites que quedaban en las mismas. En el estudio titulado *Recovered oil from Palm-Pressed Fiber: A Good Source of Natural Carotenoids, Vitamin E, and Sterols*, encontraron diferentes isómeros de carotenoides (precursores de vitamina A), vitamina E y esteroides, obteniendo los mayores resultados de carotenoides en las palmas africanas híbridas manejadas en esa región (5 000 – 7 000 mg/kg), concluyendo que sorprendentemente estos

⁷ MORA, Olga; CORREDOR, Carlos; GÓMEZ, Pedro; LAREO, Leonardo y VARGAS, Carlos. *Aceite de palma, salud y nutrición humana*. pp. 19-27

⁸ RUIZ, Rodolfo; ROMERO, Eikin; HERNÁNDEZ, Helberth y SALINAS, Iván. *Evaluación del fruto entero de palma de aceite ofrecido ad libitum en la alimentación de pollos de engorde*. pp. 38-46

compuestos están presentes en la fibra, pudiendo ser una buena fuente para la recuperación de carotenoides, vitamina E y esteroides⁹.

En la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, se validó la aplicación de biosólidos provenientes de un tanque de tratamiento de aguas residuales domésticas de tipo anaerobio con flujo ascendente, en un estudio realizado por Mantilla en el año 2015, titulado *Validación de uso de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales tipo UASB como insumo en recuperación de suelos agrícolas*. En este se caracterizó y aplicó biosólidos, concluyendo que aportan al suelo nutrientes que garantizan el desarrollo de cultivos, disminuyendo los costos producidos al aplicar fertilizantes en plantaciones forestales, así como el beneficio para estabilizar taludes en áreas agrícolas montañosas¹⁰.

En el municipio de San Dimas en Durango, México, se presentó una contaminación del suelo por derrames accidentales de hidrocarburos (aceite, diésel y grasas), por lo que se efectuó un experimento de laboratorio por parte de Martínez y otros autores en el año 2010, titulado *Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes*.

El mismo consistió en utilizar un proceso de biorremediación aeróbica empleando biosólidos, demostrando que los lodos residuales de una PTAR, de tipo de agua doméstica, estimulan el desarrollo microbiológico que degradan los hidrocarburos, siendo este el mejor tratamiento con resultados de remoción de:

⁹ CHOO, Yuen-May; YAP, Soon-Chee; OOI, Cheng-Keat; MA, Ah-Ngan; GOH, Swee-Hock y ONG, Augustine. *Recovered oil from palm-pressed fiber: a Good source of natural carotenoids, vitamin E, and Sterols*. pp. 599-602

¹⁰ MANTILLA, Gustavo. *Validación de uso de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales tipo UASB como insumo en recuperación de suelos agrícolas*. pp. 18-23

78,9 ± 1,70 % utilizando lodos estériles y 82,3 ± 3,21 % utilizando lodos sin esterilizar, mientras que sin lodos solo se obtuvo una remoción de 68,53 ± 3,21 %¹¹.

Ramírez y Pérez en el año 2006 realizaron un experimento en la ciudad de Bogotá, Colombia, titulado *Evaluación del potencial de los biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y su efecto sobre el cultivo de Rabajo Rojo (Raphanus sativus L.)*.

El mismo consistió en mezclar biosólidos con suelo en distintas proporciones para ser aplicados como enmienda orgánica en el crecimiento, desarrollo y producción del rábano rojo, obteniendo mejores resultados al mezclar 50 % de biosólido con 50 % de suelo y 25 % de biosólido con 75 % de suelo, tanto en el desarrollo de cultivo como en el cumplimiento de las normas sanitarias del país, concluyendo que la aplicación del biosólido como abono orgánico incide en el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo de rábano dependiendo de la concentración¹².

¹¹ MARTÍNEZ, Adriana; PÉREZ, María; PINTO, Joaquín; GURROLA, Blanca y OSORIO, Ana. *Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes*. pp. 241-252

¹² RAMÍREZ, Ramiro y PÉREZ, Martha. *Evaluación del potencial de los biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y su efecto sobre el cultivo de rábano rojo (Raphanus sativus L.)*. pp. 3543-3556

ALCANCES Y LIMITACIONES

Este estudio de investigación tiene como alcance determinar compuestos nutricionales (antioxidantes, vitaminas A y E) característicos del aceite de palma africana en los subproductos generados en su obtención (raquis, fibra del pericarpio, agua residual después de tratar el aceite crudo). También determinar si el subproducto de lodos generados en la PTAR de la refinería del aceite de palma africana es apto para ser reutilizado como abono orgánico.

Con la información suministrada en la presente investigación se espera abrir campo a futuras investigaciones en estas industrias, que han tenido un crecimiento en Centroamérica, en beneficio del crecimiento sostenible y sanitario en el manejo de los subproductos generados.

Como limitante es posible mencionar la dificultad de transporte y tiempo hacia las industrias (extractora y refinería) por sus ubicaciones alejadas de la ciudad de Guatemala, así como la obtención de autorizaciones por parte de la empresa para realizar las visitas y recolección de muestras, por ende solo se realizaron tomas de muestras puntuales. Al recolectar las muestras de lodos se presentan procesos de mantenimiento en la PTAR, dificultando poder tomar todas las muestras con la PTAR estabilizada y aplicar el análisis estadístico del teorema de límite central.

El transporte internacional hacia Alemania, donde se efectúan los análisis de compuestos nutricionales, limitó la cantidad de muestras a enviar para ser analizadas. También se limitó el acceso al Laboratorio del Instituto de Ciencias Nutricionales de la Universidad de Potsdam, Alemania, debido a la situación del

COVID-19, impidiendo el análisis de todas las muestras (subproductos) originalmente contempladas.

INTRODUCCIÓN

Del fruto desarrollado por la palma africana (*Elaeis guineensis Jacq*), procedente de África Occidental, se obtiene el aceite de palma y el aceite de palmiste utilizados en productos comestibles y no comestibles para el ser humano. La demanda de estos aceites ha tenido un crecimiento a nivel global, teniendo un gran desarrollo de estas industrias en Centroamérica.

En el proceso de extraer y refinar el aceite de palma africana se generan diferentes residuos, subproductos, los cuales al ser caracterizados permiten evaluar las posibilidades de su reutilización, lo que genera beneficios como: prevenir la disposición incorrecta de estos subproductos, proponer un manejo sanitariamente adecuado, promover la sostenibilidad, disminuir la cantidad de productos por disponer y también la disminución de costos para disponer de los mismos.

El aceite de palma africana es atribuido como alimento favorable por contener antioxidantes, vitamina A en forma de betacarotenos y vitamina E en forma de tocotrienoles, contribuyendo a la prevención de enfermedades, de los cuales se podría encontrar presencia en los subproductos. Por otro lado, los lodos, procedentes del tratamiento de agua residual, son considerados favorables en la producción agrícola y en la mejora de la calidad de suelos al ser aplicados como abono.

La presente investigación tiene como propósito identificar los subproductos generados en esta industria y caracterizarlos para abrir campo a desarrollar opciones para el manejo y reúsos de los subproductos de forma sanitaria.

1. MARCO TEÓRICO

Este capítulo está dirigido a presentar la base teórica para el conocimiento en materia del proceso en la industria de palma africana, su extracción y la refinería. También a presentar la base teórica de los diferentes análisis que se realizan.

La palma africana de aceite tiene su origen en el África occidental, por esta razón se le atribuye su nombre popular como palma africana, también es popularmente conocida como palma aceitera. Su nombre científico es *Elaeis guineensis Jacq.* García, citado por Labín, afirma:

Su introducción a América se atribuye a los colonizadores y comerciantes de esclavos portugueses, que la usaban como parte de su dieta alimenticia. El registro histórico de la palma de aceite es escaso. Clusius en 1605 expuso que la palma se encontraba en la costa de Guinea y que el fruto, después de añadirle la harina de cierta raíz era usado por los portugueses de San Thomé para alimentar a sus esclavos durante todo el viaje a América¹³.

Entre los años 80 y 90 se registra formalmente la siembra de palma africana en la costa sur de Guatemala, a partir de la crisis de la industria del algodón. Utilizando el área destinada al cultivo de algodón para cultivar la palma africana y continuar la producción de aceites vegetales para abastecer el país.¹⁴

¹³ LABÍN, María. *Estudio del método de recolecta, transporte y almacenamiento para prolongar la viabilidad del grano de polen de palma africana (Elaeis guineensis Jacq)*, Las Palmas S.A., La Gomera, Escuintla, Guatemala, C.A. p. 3

¹⁴ GREPALMA. *Historia*. <https://www.grepalma.org/historia/>. Consulta: noviembre de 2019.

1.1. Generalidades de *Elaeis guineensis* Jacq

Raygada indica que la *Elaeis guineensis* Jacq se desarrolla en el área tropical húmeda (entre el trópico de Cáncer y Capricornio)¹⁵ con ciertas condiciones climáticas ideales para su desarrollo que son especificadas en el siguiente cuadro:

Tabla I. **Condiciones climáticas ideales para el desarrollo de *Elaeis guineensis* Jacq.**

Condiciones climáticas ideales	
Parámetro	Valor
Temperatura media	22°C – 32°C
Altitud	< 500 m s.n.m.
Humedad relativa	75 % - 85%
Radiación solar	> 2 000 h/año > 5,5 h/d
Precipitación anual	2 000 mm – 2 500 mm
Precipitación mensual	> 100 mm

Fuente: elaboración propia, con base en: RAYGADA, Ruperto. *Manual técnico para el cultivo de la palma aceitera*. p. 28

Elaeis guineensis Jacq es una especie de palma que produce de forma separada la inflorescencia masculina y femenina. En la inflorescencia femenina se da la formación del racimo, llamado raquis, que cuenta con los frutos. Estos racimos pueden contener de 1 200 a 1 500 frutos.¹⁶ Esta palma cuenta con un

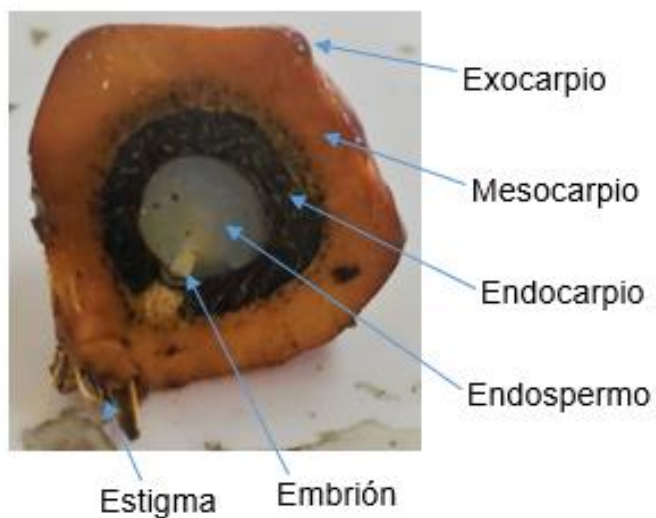
¹⁵ RAYGADA, Ruperto. *Manual técnico para el cultivo de la palma aceitera*. p. 28

¹⁶ TechnoServe. *Manual técnico de Palma Africana*. p. 16

periodo de vida en la industria aceitera de entre 25 a 30 años, ya que por su alto crecimiento dificulta la obtención del raquis con los frutos.

Del fruto de la palma se obtiene el aceite, el mismo tiene una forma ovalada. Antes de estar maduro es de un color negro que cambia en su madurez a un color naranja. El fruto está compuesto por las siguientes partes: exocarpio, mesocarpio, endocarpio, endospermo, embrión y estigma. El llamado aceite de palma es obtenido del pericarpio (exocarpio y mesocarpio), mientras que el aceite de palmiste es obtenido del endospermo. A continuación se presentan las partes del fruto de palma africana:

Figura 1. **Estructura del fruto de *Elaeis guineensis* Jacq.**



Fuente: elaboración propia, con base en: TechnoServe. *Estructura del fruto*.
<https://palma.webcindario.com/manualpalma.pdf>. Consulta: noviembre de 2019.

1.2. Producción mundial de aceite de palma africana

Barrientos señala que el aceite de palma representa una excelente perspectiva para el futuro en los países tropicales, al producir 10 veces más del rendimiento de aceite proporcionado por la mayoría de otras especies de cultivos oleaginosos, por consiguiente se considera un cultivo de alta rentabilidad¹⁷.

Tabla II. **Uso de terreno para producir una tonelada de aceite**

Cantidad de terreno para producir una tonelada de aceite	
Tipo de aceite	Uso de terreno
Palma africana	0.26 ha
Canola	1.25 ha
Girasol	1.43 ha
Soya	2 ha

Fuente: elaboración propia, con base en: GREPALMA. *Demanda mundial de aceites vegetales*. <https://www.grepalma.org/aceite-de-palma-y-sus-usos/demanda-mundial-rendimientos/>. Consulta: marzo de 2020.

La producción y obtención del aceite de palma africana se debe a su utilidad como materia prima para elaborar productos, por consiguiente es utilizada en las pastelerías, panaderías, confitería, heladerías y en industrias de plastificantes. Por otro lado también se utiliza para la producción de margarinas, jabones, velas, cosméticos, resinas, entre otros.¹⁸

¹⁷ BARRIENTOS, Andrea. *Mejora en la estabilidad de la acidez de una aceite crudo de Palma Africana (Elaeis guineensis Jacq) por medio del incremento en el tiempo de esterilización de la fruta*. p. 10

¹⁸ SIERRA, Juan; SIERRA, Lucellys; OLIVERO, Jesús. *Potencial económico de la palma aceitera (Elaeis guineensis Jacq)*. pp. 523-534

1.3. Procesos de la industria de palma africana

La industria de palma africana cuenta con el proceso de extracción del aceite y el proceso de refinación del mismo. Cada industria tiene sus procesos de trabajo que varían entre sí. A continuación se presentan los procesos en cada industria:

1.3.1. Proceso en la extractora de aceite de palma africana

- **Recepción**

Se da la recepción de los camiones, con el contenido de los raquis con frutos, para ser pesados por medio de una báscula. Estos raquis con frutos son descargados en tolvas para así pasar a las canastas de forma distribuida, cada canasta tiene capacidad de 2 toneladas. Los camiones son pesados a su salida para así obtener por diferencia de peso la cantidad descargada.

- **Esterilización**

Se procede a esterilizar el raquis con frutos en las tolvas por medio de un autoclave horizontal, el mismo trabaja con vapor saturado a 300 kPa durante 50 minutos a 140 °C. Por medio de este proceso se facilita el desprendimiento de la fruta del raquis, evitar la formación de ácidos grasos libres al inactivar las enzimas lipolíticas y ablandar el fruto para su maceración. Este proceso genera agua residual, la cual es enviada al sistema de tratamiento de agua residual por laguna de estabilización anaerobia, aprovechando así la producción de biogás.

- Desfrutado

Por medio de un monorriel el raquis con fruto esterilizado es transportado a una tolva para ser ingresado en un tambor rotatorio donde se efectúa la separación del fruto por medio de golpeteos o agitación. En este proceso se genera el raquis sin fruto, donde una parte es distribuida en el área de cultivo como fertilizante y otra utilizada como biomasa para la generación de energía mediante combustión.

- Maceración

Por medio de un contenedor de forma cilíndrica con un brazo giratorio vertical, el fruto se macera a altas temperaturas y se rompe las células del pericarpio que contienen el aceite.

- Prensado

Con forma de tornillo se efectúa la separación del aceite crudo, con alto contenido de impurezas, y el producto sólido llamado torta que está compuesta de fibra y parte del endocarpio del fruto.

- Aceite crudo

Pasa a un tratamiento de tanques primarios y sedimentación por decantación, obteniendo así:

- Agua residual: se envía al sistema de lagunas de estabilización anaerobia. La misma se encuentra a altas

temperaturas, por consiguiente no cuenta con alta carga bacteriológica.

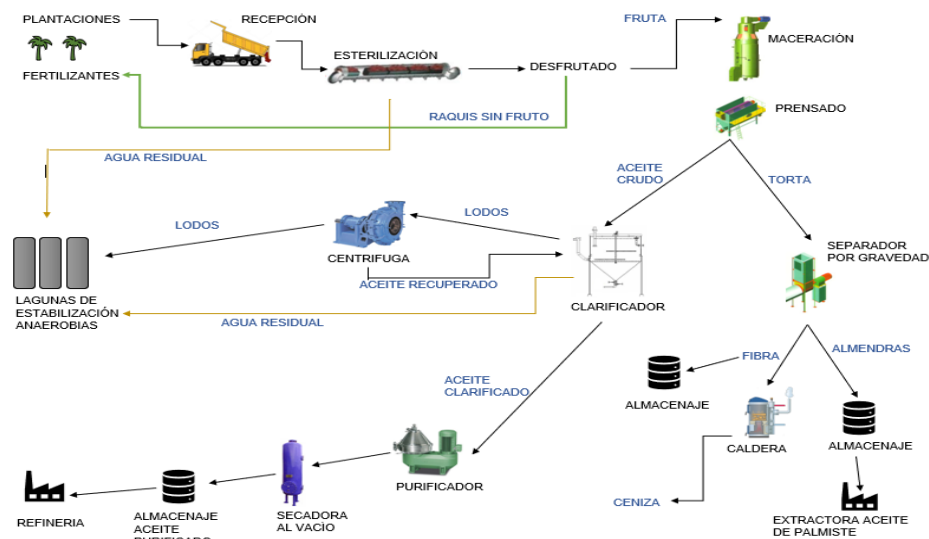
- Lodos: por medio de una centrifuga se le efectúa la extracción de los restos de aceite crudo para después ser enviados a las lagunas de estabilización anaerobia.
- Aceite de palma clarificado: que pasa a ser purificado, secado y almacenado para realizar el transporte del mismo a la refinería de aceites vegetales.

- Torta

Pasa a una separación por medio de gravedad, obteniendo así:

- Fibra: procedente del pericarpio del fruto. Una parte es distribuida en el campo de cultivo como fertilizante y otra es utilizada como poder calorífico para la caldera.
 - ✓ Cenizas: generadas por combustión de las calderas.
- Almendra o nuez del fruto: constituido por una leve capa del endocarpio y el endospermo. Es enviado a otra extractora para realizar el proceso de extracción del aceite de palmiste.

Figura 3. **Esquema del proceso en la extractora del aceite de palma africana**



Fuente: elaboración propia.

1.3.2. Proceso en la refinería de aceites vegetales

Los aceites en su forma purificada (último proceso de la extractora) mantienen diferentes impurezas, como: olor, color, sabor que se remueven en la refinería para ser utilizados en el ámbito comestible y comercial. Por lo tanto se presenta a continuación el proceso aplicado en la refinería de aceite.

- **Recepción**

Se reciben los carros cisternas que contienen los aceites purificados, procedentes de la extractora de aceite, para ser almacenados en los tanques correspondientes. En esta refinería se reciben tres tipos de aceites vegetales: palma, palmiste y soya.

- Desgomado

Modifica los carbohidratos y los fosfolípidos contenidos en el aceite, al añadir ácido cítrico mezclado con agua, para ser eliminados en el proceso de blanqueamiento.

- Blanqueamiento

Se realiza la eliminación de impurezas, color, humedad y metales (como el hierro y cobre). Utiliza como medio filtrante la tierra de blanqueo. En este proceso se genera el subproducto llamado tierra de blanqueo, la cual es retirada por una empresa encargada de disponer de esta.

- Desodorización

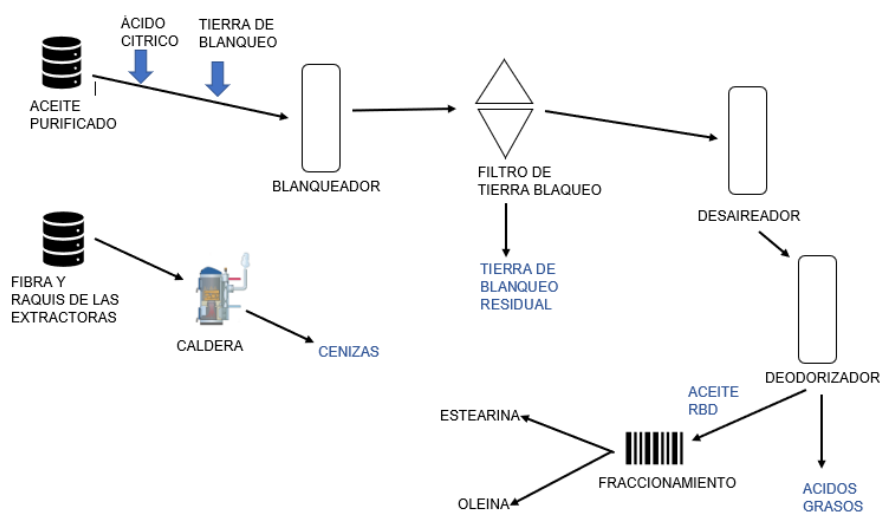
Se realiza la eliminación de productos volátiles (aldehídos y cetonas), por consiguiente se eliminan los olores, sabores y ácidos grasos por medio de presión al vacío y altas temperaturas. Al aceite que pasa por el proceso de desgomado, blanqueamiento y desodorización se le denomina aceite RBD. Parte de este aceite RBD pasa directamente a ser utilizado para producción de productos de la industria de alimentos, mientras que otra va al proceso de fraccionamiento para obtener la estearina y la oleína.

- Fraccionamiento

Consiste en efectuar la separación de la estearina y la oleína. Los mismos son obtenidos al final por medio de un filtro prensa, donde en las placas del filtro queda la estearina mientras que la oleína va al tanque de almacenamiento

correspondiente. En la refinería se da la recepción de raquis sin fruto y la torta de palmiste, procedentes de las plantas extractoras de aceite de palma y palmiste, para ser utilizadas como poder calorífico en las calderas. Por consiguiente, también se genera por combustión y las cenizas.

Figura 4. **Esquema del proceso de la refinería de aceites vegetales**



Fuente: elaboración propia.

1.3.2.1. Tratamiento de aguas residuales

Como parte del saneamiento ambiental, en Guatemala se procede a realizar el tratamiento de las aguas residuales, a través de una PTAR para así mejorar la calidad de las aguas y efectuar una descarga de las mismas, apta para el medio ambiente y la salud del ser humano. Este tratamiento se puede llevar a cabo con diferentes tecnologías, generalmente consiste en varias etapas como: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, desinfección y estabilización de lodos.

Una de las tecnologías más populares aplicada para el tratamiento de las aguas residuales es la de lodos activados, por su eficiencia en el tratamiento de las aguas, la misma lleva a cabo una recirculación de lodos que se conforma de microorganismos, siendo un proceso biológico. Cuando se tiene una alta carga orgánica, se complementa el tratamiento utilizando diferentes sistemas, como el de flotación por aire disuelto (DAF), siendo un proceso químico. Sin embargo, se debe considerar como una desventaja de estas tecnologías la gran producción de lodos generados a diferencia de otros.

Las características de los lodos estabilizados (semisólidos) dependen del proceso llevado a cabo en la PTAR y del tipo de agua a tratar. Estos pueden ser utilizados como abono orgánico sustituyendo los fertilizantes químicos, para así aprovechar este subproducto, que disminuiría los gastos económicos para su disposición y se evita una mala disposición de los mismos que podrían provocar una contaminación al medio ambiente.

La PTAR de la refinería de aceites vegetales recibe las aguas residuales del lavado de después de la refinación de aceites, aguas residuales domésticas (cafeterías, aseo y servicios sanitarios) y las aguas del sistema pluvial. A continuación se presentan los puntos del proceso utilizados en esta PTAR:

- Trampa de grasas

Romero señala que este proceso es considerado un pretratamiento para retener aceites y grasas¹⁹. De esta forma se evita el transporte de los aceites y grasas provocando taponamientos en el sistema y afectaciones en el proceso de

¹⁹ ROMERO, Jairo. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. p. 59

las bacterias. En esta PTAR el afluente que ingresa por este punto tiene aproximadamente una carga de DBO de 2500 mg/L.

- Desarenador

Es una estructura diseñada para eliminar partículas con mayor peso específico que la de los sólidos orgánicos degradables, como la arena y grava. Se busca que estas partículas no continúen en el proceso de tratamiento, evitando su futuro asentamiento, el cual pudiera afectar la eficiencia del proceso y el aumento del requerimiento de mantenimiento en las unidades. Cabe mencionar que los desarenadores evitan los futuros daños al equipo mecánico del desgaste anormal.²⁰

- Tanque raspador de grasa

Es un tanque que cuenta con inyección de burbujas de aire para suspender más rápido las grasas y aceites, para así eliminar las que no fueron retenidas anteriormente en la trampa de grasa, por medio de un brazo raspador que se encuentra en la superficie del tanque.

- Tanque ecualizador

Es una estructura donde se regula el caudal, debido a que este no es constante por la producción llevada a cabo en la industria, también regula la calidad del agua residual. El mismo cuenta con aireación para evitar el asentamiento de la materia orgánica, disminuir los olores, oxidación de compuestos orgánicos y de esta forma contar con una mezcla completa de agua

²⁰ ROMERO, Jairo. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. p. 293

residual.²¹ En esta PTAR el tanque equalizador trabaja con un tiempo de retención de 24 horas.

- Tanque coagulador

En esta PTAR se procede a realizar la dosificación de 150 mg/L de coagulante inorgánico a base de policloruro de aluminio (PAC) para lograr una desestabilización eléctrica al nivelar las cargas positivas y negativas. Se considera una coagulación primaria donde al aplicar el coagulante las partículas se atraen entre sí y forman partículas de mayor tamaño con un peso adecuado para sedimentarse. Como resultado se obtiene una disminución en la turbiedad del agua al sedimentarse las partículas formadas.²²

- Tanque floculador

Logra la unión de los flóculos ya formados, buscando el aumento del volumen y peso de las partículas coaguladas obteniendo así una sedimentación más rápida de los mismos.²³ Este proceso se debe realizar a velocidades bajas para evitar la ruptura de los flóculos formados. En esta PTAR se realiza la dosificación de 12 mg/L de copolímero catiónico, Zetag 7692.

- Tanque DAF

Es un sistema de flotación de aire disuelto (DAF por sus siglas en inglés) que consiste en la aplicación de burbujas de aire para lograr la suspensión de las partículas sólidas, obteniendo la eliminación de las partículas al flotar. En este

²¹ ROMERO, Jairo. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. p. 305

²² BRATBY, John. *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment* . p. 258

²³ *Ibíd.*, p. 315

punto se genera gran cantidad de lodos en la superficie del tanque, que es retirado por medio de un brazo raspador. En esta PTAR, este tanque DAF tiene capacidad para 50 m³ y el efluente en este punto tiene aproximadamente una carga de DBO de 200 mg/L.

- Tanque aireador

Es una estructura en la que se inyecta oxígeno de forma mecánica al efluente a tratar para promover el desarrollo de las bacterias aerobias y facultativas. Por consiguiente, su función es proporcionar oxígeno a las células, al manejar un proceso aerobio es esencial para el desarrollo de estas bacterias.²⁴ En esta PTAR este tanque aireador tiene capacidad para 800 m³ y trabaja con un tiempo de retención de 24 horas.

- Tanque clarificador

Se considera un tratamiento físico, en el cual se sedimentan los sólidos o partículas que no han sido retiradas en los procesos anteriores y dejando en la superficie el agua tratada clarificada que continuar el proceso. En esta PTAR, este tanque clarificador tiene capacidad para 125 m³ y trabaja con un tiempo de retención de 5 horas.

- Unidades de grava y carbón activado

Se considera un proceso de refinación de agua que ha sido tratada biológicamente, el carbón activado elimina materia orgánica disuelta y material particulado.²⁵ Por medio de estos filtros se busca disminuir ciertos contaminantes

²⁴ ROMERO, Jairo. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. p. 441

²⁵ Metcalf & Eddy, Inc. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. p. 362

y mejorar la calidad del agua con respecto al olor, sabor y turbiedad que pueda mantener la misma.

- Tanque de contacto

Se procede a realizar la desinfección, destrucción de organismos patógenos causantes de enfermedades, por medio de la aplicación de cloro en forma líquida, universalmente utilizado. Este tanque trabaja con un tiempo de retención de media hora, ya que los agentes químicos dependen de este tiempo de contacto para efectuar la mortalidad de los agentes patógenos

- Canaleta Parshall

Es una estructura, generalmente prefabricada, hidráulica, útil para realizar el aforo y conocer el caudal que se dispone el agua tratada al cuerpo de agua superficial cercano.²⁶ En esta PTAR el efluente en este punto tiene aproximadamente una carga de DBO de 20 mg/L.

- Adecuación de lodos

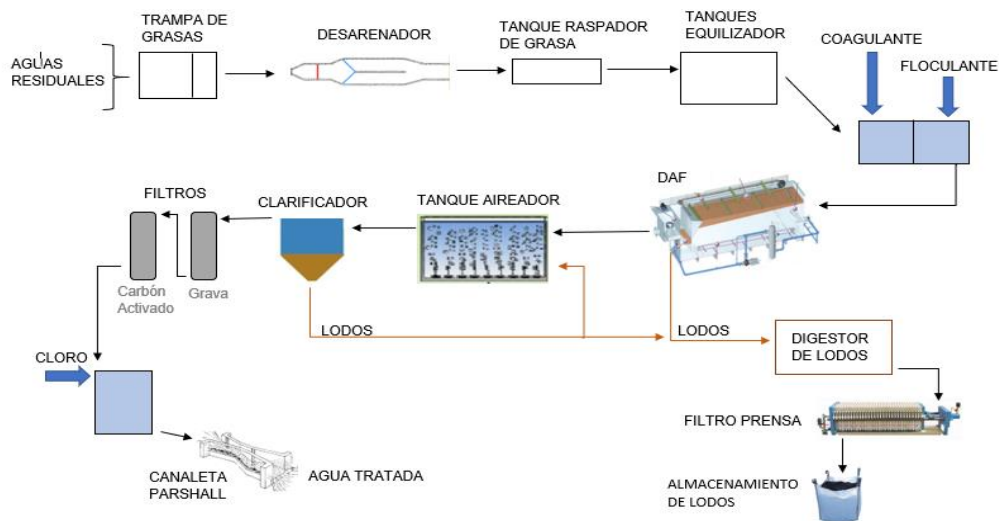
Los lodos del proceso de lodos activados y procedentes del DAF son transportados a un tanque, en el cual se lleva a cabo la digestión de los mismos. Se realiza la aplicación de cal para su espesamiento y poder conseguir la reducción del volumen de los mismos, además de disminuir olores que se puedan generar debido a la digestión anaerobia, para ser secados.

²⁶ ROMERO, Jairo. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. p. 88

- Secado de lodos

Este proceso consiste en disminuir la cantidad de humedad de los lodos, por consiguiente disminuye su volumen y facilitar el manejo de los mismos. Se lleva a cabo por medio de un filtro prensa, donde según Ramalho los lodos son bombeados a presión por la tela obteniendo como resultado una torta de biosólidos²⁷. Estas tortas de biosólidos caen por medio de gravedad a los sacos de almacenamiento para ser retirados por una empresa encargada de disponer de los mismos.

Figura 5. **Esquema del proceso en la PTAR de la refinería de aceites vegetales**



Fuente: elaboración propia.

²⁷ RAMALHO, Rubens. *Tratamiento de aguas residuales*. pp. 568 y 569.

1.4. Abono orgánico

El abono orgánico está constituido por materia orgánica, siendo el principal componente del suelo. Es una sustancia utilizada para fertilizar la tierra y dispone de carbono como componente principal.²⁸

La materia orgánica se constituye por cualquier tipo de material, de origen vegetal o animal, después de haberse efectuado un proceso de descomposición por microorganismos. La descomposición consiste en el cambio de la forma orgánica a forma inorgánica, los cuales son los minerales aprovechados por las plantas y organismos. La misma contribuye a las mejoras de las propiedades físicas, químicas y la actividad biológica del suelo.²⁹

La aplicación de abonos orgánicos reduce la utilización de productos químicos que cuentan con un elevado costo y pueden ocasionar contaminación al medio ambiente. Es una opción para aprovechar los diferentes desechos generados y contribuir al desarrollo sostenible, evaluando que sea de forma sanitaria para el medio.

1.5. Parámetros de análisis

A continuación se presenta la base teórica de los diferentes parámetros caracterizados en la presente investigación.

²⁸ PÉREZ, Julian. MERINO, María. *Definición de abono orgánico*. <https://definicion.de/abono-organico/>. Consulta: noviembre de 2019.

²⁹ ROMÁN, Pilar; MARTÍNEZ, María; PANTOJA, Alberto. *Manual de compostaje del agricultor*. p. 20

1.5.1. Compuestos físicos

- Potencial de hidrógeno

Es la concentración del ion hidrógeno presente en una muestra, se clasifica en ácido, neutro y básico o alcalino en una escala del 1 a 14 unidades. Entre 0 a 6 se considerada una sustancia ácida, y de 8 a 14 una sustancia básica, siendo 7 una sustancia neutral.

- Conductividad eléctrica

La misma estima la cantidad de sales solubles presente en una muestra. Se considera un factor limitante al superar valores por encima de los cuales la presión osmótica en el suelo sea tal que la raíz de las plantas no pueda extraer agua o nutrientes del suelo.³⁰ Este análisis en suelos tiene como objetivo determinar si las sales solubles se encuentran en cantidades que puedan afectar la germinación normal de las semillas, crecimiento de las plantas o la absorción de agua por parte de las mismas.³¹

- Humedad

Es la cantidad de agua presente en un medio, donde los microorganismos utilizan el agua para su desarrollo en la membrana celular.³²

³⁰ Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. *Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España*. p. 29

³¹ SANTIBÁÑEZ, Claudia. *Determinación del pH y conductividad eléctrica del suelo*. http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/medio_mod1.pdf. Consulta: noviembre de 2019.

³² ROMÁN, Pilar; MARTÍNEZ, María; PANTOJA, Alberto. *Manual de compostaje del agricultor*. p. 27

- Sólidos

Los sólidos totales son los residuos al evaporar el agua presente en una muestra, y se constituyen por las partículas orgánicas e inorgánicas. Los sólidos volátiles son los sólidos orgánicos que se volatilizan a una temperatura determinada. Al pasar una muestra por estas altas temperaturas se genera un residuo llamado sólidos fijos, que se constituye por los sólidos inorgánicos o minerales.³³

1.5.2. Compuestos químicos

- Macronutrientes

Son los nutrientes en cantidad abundante que se requieren en el suelo para el crecimiento de las plantas. En este grupo se incluyen el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre y sodio, siendo el fósforo esencial en la eficiencia de la fotosíntesis por la transferencia de energía. Y el potasio es vital para la síntesis de los carbohidratos y proteínas, aumentando la tolerancia de la planta antes secas y mejorando el régimen hídrico de la planta.³⁴

- Micronutrientes

Son los nutrientes en cantidades pequeñas que se requieren en el suelo para el crecimiento de las plantas. En este grupo se incluyen el cobre, zinc, hierro, manganeso y boro.

³³ ROMERO, Jairo. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. p. 68

³⁴ ROMÁN, Pilar; MARTÍNEZ, María; PANTOJA, Alberto. *Manual de compostaje del agricultor*. p.

35

- Nitrógeno total

El nitrógeno total está compuesto por todas las formas del nitrógeno, las mismas son: nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos. Se caracteriza por una permanente transformación y síntesis bioquímica, con un proceso de ganancia y pérdida de elemento en periodos cortos de tiempo. La mayoría del nitrógeno encontrado en suelos es parte de la materia orgánica. Las plantas absorben del suelo la forma inorgánica de nitrógeno (amonio, nitratos y nitritos) que solo representa del 5 % al 10 % del nitrógeno total.³⁵

El nitrógeno está involucrado en todos los procesos del desarrollo de las plantas, siendo un motor de crecimiento para las mismas, así como tiene una gran importancia para la absorción de los otros nutrientes.³⁶

- Carbono orgánico

Es la cantidad de carbono, por medio de la determinación del carbono orgánico se estima la cantidad de materia orgánica, ya que entre los principales constituyentes de la materia orgánica está el carbono, el cual es el que mejor se cuantifica de una forma rápida.³⁷ La aportación de carbono orgánico que se da por medio de materia orgánica se puede efectuar por la aplicación de los abonos orgánicos, donde se pueden encontrar nutrientes útiles para el crecimiento de las plantas.

³⁵ ICA. *El análisis de suelos, plantas y agua para riego*. p. 21

³⁶ ROMÁN, Pilar; MARTÍNEZ, María; PANTOJA, Alberto. *Manual de compostaje del agricultor*. p. 35

³⁷ ICA. *El análisis de suelos, plantas y agua para riego*. p. 16

- Relación carbono-nitrógeno

Esta relación puede variar con respecto a los materiales que se estén descomponiendo, y varía a lo largo del proceso. Se puede presentar un exceso de carbono (C:N > 35:1) y también un exceso de nitrógeno (C:N < 15:1).³⁸

1.5.3. Compuesto patógenos

Los organismos patógenos son un indicador de productores de enfermedades, principalmente las bacterias de coliformes. Los coliformes son arrojados por los excrementos de los seres humanos, por lo tanto se puede detectar fácilmente y ser utilizados como norma de control sanitario. Los coliformes totales están conformados por el grupo coli-aerogenes, que tienen como género *Escherichia* y *Aerobacter*, mientras que los coliformes fecales están conformados principalmente por la especie *E. Coli*.³⁹

1.5.4. Compuestos nutricionales

- Antioxidantes

Según Londoño tienen la capacidad de inhibir la degradación oxidativa, es decir, por medio de la actividad antioxidante se mide la capacidad para retardar la degradación oxidativa⁴⁰. Los antioxidantes están constituidos por vitaminas A, C y E, flavonoides, antocianinas, carotenoides o ácidos fenólicos⁴¹.

³⁸ ROMÁN Pilar; MARTÍNEZ, María; PANTOJA, Alberto. *Manual de compostaje del agricultor*. p. 29

³⁹ ROMERO, Jairo. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. p. 193

⁴⁰ LONDOÑO, Julian. *Antioxidantes: importancia biológica y métodos para medir su actividad*. pp. 129-162

⁴¹ CASTAÑEDA, C.; RAMOS, LL.; IBÁÑEZ, V. *Evaluación de la capacidad antioxidante de siete plantas medicinales peruanas*. pp. 56-72

Huet indica que los antioxidantes se pueden clasificar según su mecanismo de acción⁴², siendo estos los siguientes:

- Previene la formación de radicales libres: al descomponer la quelación de los metales por medio de las enzimas como las catalasas, glutatión peroxidasa, superóxido dismutasa, transferrina o ceruloplasmina.
- Inactivan los radicales libres formados: se da al inhibir la cadena redox y rompe la propagación como las vitaminas A, C y E, coenzimas Q₁₀, flavonoides y polifenoles.
- Reparar el daño oxidativo: se da en las membranas como las enzimas de reparación del ADN, proteasas y transferasas.

La capacidad antioxidante se puede determinar por varios métodos como: ORAC, FRAP, ABTS, DPPH. En el presente estudio se utiliza el método ABTS, el cual fue reportado inicialmente por Miller y colaboradores, consiste en la estabilización del radical libre y permite evaluar antioxidantes hidrofílicos y lipofílicos.⁴³

El método consiste en generar el radical catiónico ABTS (ABTS•+) de color verde azulado, al oxidar el reactivo ABTS. Al mezclar compuestos antioxidantes con el ABTS•+ se reducen los radicales catiónicos generando un proceso de decoloración o blanqueamiento dependiendo de la actividad antioxidante. Se utiliza el reactivo Trolox como estándar, el cual según Pellegrini es un análogo

⁴² HUET, Cristina. *Métodos analíticos para la determinación de antioxidantes en muestras biológicas*. p. 6

⁴³ LONDOÑO, Julián. *Antioxidantes: importancia biológica y métodos para medir su actividad*. pp. 129-162

de la vitamina E soluble en agua⁴⁴, representando así los resultados en equivalencia de Trolox (TE por sus siglas en inglés).⁴⁵

- Vitamina A

Se descubrió en 1917 por Elmer Verner Mc Collum y Marguerite Davis de la Universidad de Wisconsin, Madison, y Lafayette Mendel y Thomas Burr Osborne de la Universidad de Yale, siendo la primera vitamina plenamente identificada.⁴⁶

Es una vitamina liposoluble considerada un antioxidante al actuar sobre los radicales libres y característico por los colores generados como el amarillo, naranja y rojo. “De los cuatrocientos y tantos carotenoides que han sido caracterizados, solo unos treinta tienen actividad de provitamina A”⁴⁷, es decir, muchos de los compuestos encontrados no son provitamina o precursores de la vitamina A, dentro de estos se encuentra la luteína, zeaxantina y el licopeno, siendo los β -Carotenos los principales precursores o provitamina A, el cual en el cuerpo humano es convertido a retinol.

⁴⁴ PELLEGRINI, Nicoletta; SERAFINI, Mauro; COLOMBI, Bárbara; DEL RÍO, Daniele; SALVATORE, Sara; BIANCHI, Marta; BRIGHENTI, Furio. *Total Antioxidant Capacity of Plant Foods, Beverages and Oils Consumed in Italy Assessed by Three Different In Vitro Assays*. pp. 2812-2819

⁴⁵ RE, Roberta; PELLEGRINI, Nicoletta; PROTEGGENTE, Anna; PANNALA, Ananth; YANG, Min; RICE-EVANS, Catherine. *Antioxidant Activity Applying an Improved ABTS Radical Cation Decolorization Assay*. pp. 1231-1237

⁴⁶ PALACIOS, Leonardo. *Breve historia de las vitaminas*. p. 143

⁴⁷ MÁRQUEZ, Mercedes; YÉPEZ, Carmen; SÚTIL-NARANJO, Rosalía; RINCÓN, Manuel. *Aspectos básicos y determinación de las vitaminas antioxidantes E y A*. pp. 191-204

- Vitamina E

Se descubrió en 1922 por Herbert McLean Evans y Katehrine Bishop. Su nombre fue propuesto en 1925, por Evans, debido al orden alfabético de las vitaminas descubiertas hasta ese momento.⁴⁸

Es una vitamina liposoluble considerada como un importante antioxidante no enzimático y se encuentra principalmente en los aceites vegetales. Según Sayago y otros autores se compone de los siguientes dos grupos: tocoferoles (saturada) y tocotrienoles (insaturada), donde cada grupo se constituye por cuatro clases que son: alfa (α), beta (β), gamma (γ) y delta (δ)⁴⁹. Los compuestos de la vitamina E se pueden encontrar en los aceites vegetales, ya que según Márquez y otros autores estos compuestos se encuentran concentrados en sitios con abundantes ácidos grasos⁵⁰.

- Determinación de vitaminas

La cuantificación de vitaminas A y E se realiza mediante la cromatografía líquida de alta eficiencia de fase reversa (RP-HPLC por sus siglas en inglés) con gradiente modificado. Este método consiste en desplazar los compuestos encontrados en la muestra dependiendo de la polaridad, en un periodo de tiempo al utilizar diferentes concentraciones de solvente de forma intercalada, y se

⁴⁸ PALACIOS, Leonardo. *Breve historia de las vitaminas*. p. 144

⁴⁹ SAYAGO, A.; MARÍN, M.; APARICIO, R; MORALES, M. *Vitamina E y aceites vegetales*. Aceites y grasas. pp. 76-86

⁵⁰ MÁRQUEZ, Mercedes; YÉPEZ, Carmen; SÚTIL-NARANJO, Rosalía; RINCÓN, Manuel. *Aspectos básicos y determinación de las vitaminas antioxidantes E y A*. pp. 191-204

detectan por espectrofotometría. Su cuantificación se da al comparar los picos generados con estándares ya definidos.⁵¹

1.6. Norma para reúsos en Guatemala

Por medio del Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 se emite el *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. En el capítulo VIII se presenta el artículo 41 de disposición final de lodos, en el cual se permite la aplicación de estos al suelo como acondicionar, abono o *compost*. En este capítulo también se presenta el artículo 42 de parámetros y límites máximos permisibles presentado a continuación:

Tabla III. **LMP en lodos para ser aplicados al suelo**

Datos del Acuerdo Gubernativo No. 236-2006			
Parámetro	Dimensionales	Características de suelos donde se dispondrá	
		pH < 7	pH ≥ 7
Arsénico	mg/kg de materia seca a 104 °C	50	100
Cadmio		50	100
Cromo		1 500	3 000
Mercurio		25	50
Plomo		500	1 000

Fuente: elaboración propia, con base en el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 del Congreso de la República. *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. p. 18

⁵¹ SÁNCHEZ, Maribel; RODRÍGUEZ, Rubén; MARTÍN, Verónica; SEPÚLVEDA, Liliana; SUTIL, Rosalía; CONTRERAS, Freddy. *Estrés y vitaminas antioxidantes en pacientes diabéticos tipo 2*. pp. 166-172

Según el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 de los lodos que cuenten con los parámetros de la tabla III para ser utilizados como acondicionador del suelo solo se permite disponer hasta 200 000 kg/ha por año. Para utilizar como abono solo se permite disponer hasta 100 000 kg/ha por año, que no excedan las 2 000 UFC/kg de coliformes fecales y se prohíbe su utilización para cultivos comestibles crudos o precocidos, hortalizas y frutas. Para la reutilización de otros tipos de residuos sólidos no se cuenta con una norma o acuerdo como tal.

2. METODOLOGÍA

Este capítulo está dirigido a describir el desarrollo de la metodología sobre las tomas de muestra, los ensayos y equipos utilizados para realizar los análisis.

2.1. Ubicación del estudio

La planta extractora de aceite de palma africana se ubica en el departamento de Escuintla y la refinería de aceites vegetales se ubica en el departamento de Guatemala.

2.2. Determinación de los puntos de muestreo

Con base en los recorridos de campo en cada industria (extractora y refinería) se toma la decisión de los puntos de muestreo, así como la aceptación de los puntos de muestreo por parte de la industria. A continuación se presenta la tabla con los lugares, los subproductos y punto de recolección de las muestras:

Tabla IV. **Subproductos muestreados**

Muestreo		
Lugar	Subproducto	Punto de muestreo
Extractora de aceite de palma africana	Raquis sin fruto	Inicio del proceso
	Agua residual	Después del tratamiento por clarificador al aceite crudo (figura 3)
	Fibra	Procedente de la torta, después de la separación por gravedad (figura 3)
Refinería de aceites vegetales	Lodos	Almacenamiento de lodos después del filtro prensa (figura 5)

Fuente: elaboración propia.

2.3. Selección de parámetros

Se contemplan los parámetros nutricionales de estudios previos sobre el aceite de palma africana, los cuales le atribuyen un beneficio a su consumo por su característica antioxidante y valor vitamínico (A y E). También los parámetros esenciales para el desarrollo de las plantas suministrados por el suelo y/o abono orgánico, para de esta forma evaluar la reutilización de los subproductos analizados con base en los parámetros analizados.

2.4. Muestreo

Se presenta a continuación:

2.4.1. Cantidad y tipo de muestreo

La determinación del número de muestras se basa en la obtención de resultados representativos estadísticamente, cabe mencionar que en esta investigación se ve limitada la cantidad de muestras por temas de transporte,

facilidad de accesos a las industrias e información limitada. La decisión del número de muestras se basa en el método exploratorio que busca examinar temas donde hay poca información previa o que no se han abordado antes en el lugar de estudio para obtener información básica y realizar una investigación más profunda a futuro.

Por consiguiente, se plantea un análisis general de pocas muestras. De esta forma se conocerá si es requerida una investigación más completa para formular nuevos conceptos o hipótesis.⁵² A continuación se presenta una tabla con la cantidad de tomas de muestras en cada industria y el tipo de muestreo que se lleva a cabo en cada subproducto:

Tabla V. **Cantidad y tipo de muestreo**

Muestras tomadas			
Lugar de muestreo	Subproducto	Muestreos efectuados	Tipo de muestreo
Extractora de aceite de palma africana	Raquis sin fruto	1	Puntual con triplicado
	Agua residual	1	
	Fibra	1	
Refinería de aceites vegetales	Lodos	16	Puntual

Nota: forma puntual con triplicado se refiere a que al momento de muestreo se toman tres puntos diferentes del mismo subproducto.

Fuente: elaboración propia.

⁵² LOZANO, Jany. *Investigación exploratoria*. <https://janeth-investigacioniv.blogspot.com/2008/11/investigacion-exploratoria.html>. Consulta: noviembre de 2019.

2.4.2. Implementos de seguridad al muestrear

Se toma de base la Norma Técnica Guatemalteca COGUANOR NTG/ISO 5667 Calidad del Agua – Muestreo, para considerar las medidas de seguridad y precauciones al efectuar las tomas de muestras, así como el manejo de las mismas. Se utiliza el equipo de seguridad requerido por la industria y de sanidad del muestreador, como: botas de seguridad con punta de acero, chaleco reflectivo, casco de seguridad, guantes de nitrilo, cubre bocas, agua limpia, alcohol en gel y papel de limpieza.

2.4.3. Almacenamiento y conservación de las muestras

Debe observarse la siguiente tabla:

Tabla VI. Almacenamiento y conservación de muestras

Datos de muestreo			
Lugar de muestreo	Subproducto	Almacenamiento	Conservación
Extractora de aceite de palma africana	Raquis sin fruto	Tubos Falcon	Cadena de frío Liofilización
	Agua residual		Cadena de frío
	Fibra		Cadena de frío
Refinería de aceites	Lodos	Bolsas plásticas estériles con cierre	Cadena de frío

Fuente: elaboración propia.

La liofilización es realizada en el Laboratorio de Investigación de Productos Naturales (LIPRONAT) de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la USAC, por medio de un equipo Labconco 7522800 procedente de Estados

Unidos. Según Jennings el proceso consiste en congelar la muestra concentrando el solvente (agua), que se reduce mediante sublimación y desorción, a niveles en el que no se desarrollará el crecimiento biológico o reacciones químicas en la muestra⁵³. Por consiguiente este proceso consta de tres fases: congelación, secado primario y secado secundario.

2.4.4. Periodo de muestreo

Para la obtención de muestras de subproductos en la extractora de aceite la palma africana se toma del procesado de extracción de frutos procedente de fincas certificadas, es decir, se cumple con las normativas internacionales para exportar el aceite de palma extraído.

Tabla VII. **Fecha de muestreo en la extractora de aceite de palma africana**

Datos de muestreo en la extractora de aceite de palma africana	
Subproducto	Fecha de muestreo
Raquis sin fruto	30-ene-2020
Agua residual	
Fibra	

Fuente: elaboración propia.

Los lodos producidos se extraen y se almacenan todos los días en dos turnos: en la noche y en el día. Se obtienen las muestras del almacenamiento (sacos) de lodos, por lo tanto, se recolectan ocho muestras del lodo extraído en

⁵³ JENNINGS, Thomas. *Lyophilization: Introduction and basic principles*. p. 4

el turno de la noche y ocho muestras del lodo extraído en el turno del día. Cabe mencionar que durante la obtención de muestras se registran procesos de mantenimiento en la PTAR, es decir, se ve afectada la estabilización de la misma. Este proceso de mantenimiento en la PTAR, por lo general, se lleva a cabo semestralmente.

Tabla VIII. **Fecha de muestreo en la refinería de aceites vegetales**

Datos de muestreo en la refinería de aceites vegetales				
Subproducto	Fecha de muestreo	Código de muestra	Turno de extracción de lodos	Observaciones de la PTAR
Lodos	15-Ene-20	M01	Día	Sin estabilizar
	17-Ene-20	M02	Noche	Sin estabilizar
	21- Ene -20	M03	Noche	Sin estabilizar
	21- Ene -20	M04	Día	Sin estabilizar
	23-Ene-20	M05	Noche	Sin estabilizar
	23-Ene-20	M06	Día	Sin estabilizar
	28-Ene-20	M07	Noche	En proceso de estabilizar
	28-Ene-20	M08	Día	En proceso de estabilizar
	6-Feb-20	M09	Noche	Estabilizada
	6-Feb-20	M10	Día	Estabilizada
	11-Feb-20	M11	Noche	Estabilizada
	11-Feb-20	M12	Día	Estabilizada
	13-Feb-20	M13	Noche	Estabilizada
	13-Feb-20	M14	Día	Estabilizada
	19-Feb-20	M15	Noche	Estabilizada
	19-Feb-20	M16	Día	Estabilizada

Fuente: elaboración propia.

2.5. Análisis de parámetros

Se observa a continuación:

2.5.1. Laboratorios de análisis

Las caracterizaciones de los subproductos se efectúan en tres diferentes laboratorios:

- Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria Doctora Alba Tabarini, de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Ubicado en las instalaciones de la USAC, ciudad de Guatemala.
- Laboratorio Salvador Castillo Orellana de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Ubicado en las instalaciones de la USAC, ciudad de Guatemala.
- Laboratorio del Instituto de Ciencias Nutricionales, de la Universidad de Potsdam. Ubicado en 14558 Nuthetal Arthur-Scheunert-Allee 114-116, ciudad de Potsdam, Alemania.

La siguiente tabla indica los parámetros que se analizan para cada subproducto y el laboratorio en el que se lleva a cabo:

Tabla IX. **Parámetros por muestra y lugar efectuado**

Parámetros analizados para cada subproducto		
Subproducto	Parámetros que se analizaron	Lugar de análisis
Raquis sin fruto	Capacidad antioxidante, vitamina A, vitamina E	Laboratorio del Instituto de Ciencias Nutricionales
Agua residual		
Fibra		
Lodos	CT, CF, Humedad, ST y STV	Laboratorio Doctora Alba Tabarini
	pH, C,E., P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe, Mn, Na, B, CO, Nt, C:N	Laboratorio Salvador Castillo Orellana

Fuente: elaboración propia.

2.5.2. Preparación de muestras de raquis sin fruto, agua residual y fibra

Primero las muestras de raquis sin fruto y fibra se muelen. Posteriormente a todas las muestras se le realiza la extracción al tomar 200 mg de muestra que se disuelve en 10 mL de Isopropanol (grado HPLC; VWR, EE. UU.). Esta preparación se mezcla por 30 minutos y es centrifugado por 3 minutos a 10 000 rpm (centrifuga Sigma 3K20) a 20 °C. El sobrenadante es retirado para ser analizado.

2.5.2.1. Determinación de compuestos nutricionales

- Capacidad antioxidante

Se utiliza como antioxidante estándar Trolox (ácido-6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico; Fluka, Alemania). Se prepara Trolox (2,5 mM)

disuelto en etanol (>99,7 % grado HPLC; VWR, EE. UU.) y se llena en un matraz volumétrico con solución reguladora (pH 7.2 – 7.4) para ser utilizado como solución estándar. La solución reguladora (5 mM) es preparada con K_2HPO_4 (Fluka, Alemania), H_2KPO_4 (Fluka, Alemania) y NaCl (Sigma-Aldrich, Alemania).

Se prepara la solución madre del catión radical ABTS ($ABTS^{\bullet+}$) al mezclar ABTS (ácido 2,2'azinobis-(3-etilbenzotiazolina)-6-sulfónico; Fluka, Alemania) y $K_2S_2O_8$ (Fluka, Alemania) disueltos en agua desionizada para ser almacenado en oscuridad a temperatura ambiente por 12 – 16 horas. Se trabaja con esta solución madre disuelta en isopropanol (grado HPLC; VWR, EE. UU.). Para la determinación de antioxidantes se utiliza 10 μ L del sobrenadante y 150 μ L de $ABTS^{\bullet+}$, luego de seis minutos de reacción a temperatura ambiente se midió en un espectrofotómetro BIO-RAD iMark Microplate Reader, a una absorbancia de 750 nm. Los estándares a utilizar van de 0,025 a 0,25 mM. Para este ensayo se realiza análisis en triplicado para cada muestra y se promedia el resultado

- Vitamina A

Se utiliza un sistema de cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC; Shimadzu, Alemania) de fase inversa con gradiente modificado para cuantificar los siguientes carotenoides: luteína, zeaxantina, β -caroteno, licopeno. Para la separación de los compuestos se utiliza una columna de corotenoide C30 (5 μ m, 250 x 3,0 mm; YMC, EE. UU.) en línea con una precolumna C30 (YMC, EE. UU.). Se aplica un disolvente A compuesto de metanol/agua (90/10; con 0,4 g/L de acetato de amonio en H_2O) y un disolvente B con metil-terc-butil-éter / metanol / agua (90:8:2; v/v/v, con 0,1 g/L acetato de amonio en H_2O). Se trabaja con un flujo de 0,2 mL/min y se utiliza un detector de matriz de fotodiodos SPD-M20A (Shimadzu, Japón) a una absorbancia de 450 nm.

El proceso se lleva a cabo en 60 minutos para cada muestra y los carotenoides son identificados mediante la comparación con estándares externos. Los estándares por utilizar para luteína y licopeno son 0,0006 a 0,002 $\mu\text{g/mL}$ y para β -caroteno es 0,0007 a 0,002 $\mu\text{g/mL}$. Para este ensayo se realiza análisis en triplicado y se promedia el resultado.

- Vitamina E

Se utiliza un sistema de cromatografía líquida de alto rendimiento CBM-10A (HPLC; Shimadzu, Alemania) de fase inversa con gradiente modificado para cuantificar los tocoferoles (α , γ , δ) y tocotrienoles (α , γ , δ). Para la separación de los compuestos se utiliza una columna Multospher 120-RP18AQ (3 μm , 250 x 4,0 mm; MZ Analysentechnik, Alemania). Se aplica un disolvente A de metanol y un disolvente B de acetato etílico. Se trabaja con una velocidad de flujo de 0,45 mL/min y se utiliza un detector fluorescente RF1002 (Gynkotheek, Alemania) a una absorbancia entre 295 nm a 330 nm junto con un detector SPD-10 AVP (Shimadzu, Japón) a una absorbancia de 280 nm.

El proceso se lleva a cabo en 30 minutos para cada muestra y los compuestos son identificados mediante la comparación con estándares externos. Los estándares por utilizar para γ -Tocoferol es 2,37 a 94,73 ng, α -Tocoferol es 2,73 a 109,35 ng, δ -Tocoferol es 2,72 a 108,97 ng, γ -Tocotrienol es 2,63 a 105,22 ng, α -Tocotrienol es 2,35 a 94,16 ng y δ -Tocotrienol es 2,57 a 102,91 ng. Para este ensayo se realiza análisis en triplicado y se promedia el resultado.

2.5.3. Preparación de muestras de lodos

Los análisis realizados en el laboratorio Salvador Castillo Orellana se llevan a cabo de la muestra de lodo seca, ya que estos lodos cuentan con una humedad que puede dificultar la medición de los parámetros y su homogenización. El secado se realiza al colocar la muestra fresca esparcida en una placa de vidrio, de aproximadamente 20 cm de diámetro, se introduce en un horno Stabil-Therm (Blue M, EE. UU) en un alrededor de 40 °C y finalmente la muestra seca es pulverizada.

2.5.3.1. Determinación de compuestos físicos

- Potencial de hidrógeno (pH)

Se toma 10 g de muestra, para ser disueltos en 25 mL de agua destilada y se agita. Se deja reposar por 30 minutos como tiempo de contacto. Y se procede a determinar el pH de la muestra por medio del potenciómetro.

- Conductividad eléctrica

Se toma 10 g de muestra, para ser disueltos en 50 mL de agua destilada y se agita. Se deja reposar por 10 minutos como tiempo de contacto. Y se procede a determinar la C.E. de la muestra por medio del conductímetro, la lectura obtenida se multiplica por 5 como relación del material sólido en líquido.

- Humedad

Se toma 25 g de muestra fresca para ser colocados en una cápsula de porcelana, previamente pesada en una balanza analítica Sartorius CP224S, y ser

secada a 105 °C en un horno Stabil-Therm (Blue M, EE. UU) hasta obtener peso de masa constante. Según Zagal y Sadzawka se aplica la siguiente fórmula para determinar el porcentaje de humedad presente en la muestra:

$$H = \frac{B - C}{B - A} \times 100$$

Donde:

A = peso de la cápsula

B = peso de la cápsula + peso de la muestra

C = peso de la cápsula + peso de muestra seca⁵⁴

- Sólidos totales

Según Zagal y Sadzawka se aplica la siguiente fórmula para determinar el porcentaje de sólidos totales:

$$H = \frac{C - A}{B - C} \times 100$$

Donde:

A = peso de la cápsula

B = peso de la cápsula + peso de la muestra

C = peso de la cápsula + peso de muestra seca⁵⁵

- Sólidos totales volátiles

La cápsula con la muestra seca, de la prueba de ST, se calcina en una mufla a 550 °C por un periodo de tiempo de una hora y se deja enfriar en el desecador

⁵⁴ ZAGAL, Erick; SADZAWKA, Angélica. *Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos*. p. 12

⁵⁵ *Ibíd.*

para posteriormente ser pesada. Según Zagal y Sadzawka se aplica la siguiente fórmula para determinar el porcentaje de sólidos totales volátiles:

$$H = \frac{C - D}{\text{peso de la muestra}} \times 100$$

Donde:

C = peso de la cápsula + peso de lodo seco

D = peso de la cápsula + peso de lodo calcinado⁵⁶

- Sólidos totales fijos

Se calculan por diferencia, al restar los sólidos totales volátiles de los sólidos totales.

2.5.3.2. Determinación de compuestos químicos

- Calcio, magnesio, sodio y potasio

Se determina mediante el método indicado en el *Manual de Asistencia Técnica No. 47* por ICA en 1989, en el cual a la muestra se le aplica una solución saturante de acetato de amonio, que al ser agitado el ion NH_4^+ desplaza los cationes retenidos, los cuales se cuantifican por espectrofotometría de adsorción atómica.

⁵⁶ ZAGAL, Erick; SADZAWKA, Angélica. *Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos*. p. 16

- Cobre, hierro, manganeso y zinc

Se determina mediante el método de Olsen para fósforo modificado según Hunter al agregar un agente quelatante y aumentando el pH a 8,5, indicado en el *Manual de Asistencia Técnica No. 47* por ICA en 1989, con estas condiciones el bicarbonato de sodio extrae parte de las formas intercambiables de los parámetros analizados y con el EDTA (quelato) se extrae las formas unidas a la materia orgánica, donde los elementos extraídos son cuantificados por espectrofotometría de adsorción atómica.

- Cuantificación de boro

Se determina mediante el método indicado en el *Manual de Asistencia Técnica No. 47* por ICA en 1989. La extracción del compuesto se realiza con monofosfato de calcio 0,008M propuesto por Hunter y su determinación se efectúa por medio de la utilización del reactivo azomethine-H para formar el complejo Boro-Azomethine-H de color amarillo, también se utiliza EDTA para eliminar interferencias por cobre y aluminio, y ácido tioglicólico para eliminar interferencias por hierro. Su cuantificación se da por colorimetría a una longitud de onda de 430 nm.

- Fósforo

Se determina mediante el método de Bray II, indicado en el *Manual de Asistencia Técnica No. 47* por ICA en 1989. El mismo utiliza fluoruro de amonio 0,03N y ácido clorhídrico 0,1N como extractante, y se desarrolló el color al utilizar un reactivo. Su cuantificación se da por colorimetría a una longitud de onda de 880 nm.

- Azufre

Se determina mediante el método indicado en el *Manual de Asistencia Técnica No. 47* por ICA en 1989. El mismo consiste en extraer el SO_4 al colocar la muestra en solución de fosfato monocálcico 0,008M. Su cuantificación se basa en la precipitación del BaSO_4 (al mezclar SO_4 con BaCl_2) de color blanco y ser determinada turbidimétrica el porcentaje de transmitancia a una longitud de onda de 420 nm.

- Nitrógeno total

Se determina mediante el método analítico de Kjeldahl, indicado en el *Manual de Asistencia Técnica No. 47* por ICA en 1989. El mismo consiste en convertir el nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal por digestión. Se ha modificado el método original al incluir ácido salicílico para la incorporación de los nitratos, al reducir los nitratos a amonio. El amonio (NH_4) formado se mide como NH_3 liberado y recogido en una solución de ácido bórico con indicador y ser titulado para su cuantificación.

- Carbono orgánico

Se determina mediante el método de Walkey Black, indicado en el *Manual de Asistencia Técnica No. 47* por ICA en 1989, basado en la reducción del $\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$ y su cuantificación se efectúa por titulación.

- Relación carbono-nitrógeno

Es la relación obtenida a partir de la división numérica del contenido de carbono orgánico entre el nitrógeno total de la muestra analizada.

2.5.3.3. Determinación de compuestos patógenos

- Coliformes totales y fecales

Se toma 25 g de muestra fresca, para ser disuelta en 50 mL de agua destilada, se deja reposar por 30 minutos como tiempo de contacto. Y se procede a realizar la técnica de tubos de fermentación con tres diluciones, y cinco tubos de fermentación para cada dilución. Los resultados son multiplicados por 2, como relación del material sólido en líquido.

Según la técnica de tubos de fermentación se realiza la prueba presuntiva y la utilización del caldo verde brillante, para determinar los coliformes totales para lo cual los tubos de fermentación se incuban en una incubadora Thelco 31483 (Precision Scientific Co, EE. UU), mientras que para determinar los coliformes fecales se utiliza el medio EC y los tubos de fermentación se incuban en una incubadora 150 (Lab-Line, EE. UU.).

2.6. Análisis de datos

Por medio de un análisis cuantitativo se puede describir parámetros cuantificables, por consiguiente en esta investigación se aplica la técnica cuantitativa con método exploratorio.

3. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los subproductos caracterizados según la industria de muestreo.

3.1. Resultados de la extractora de aceite de palma africana

Se presentan a continuación:

Tabla X. **Resultados de subproductos procedentes de la extractora de aceite de palma africana**

Parámetro		Unidad	Raquis sin fruto	Agua Residual	Fibra
Capacidad antioxidante		mg TE/kg	Nd	2 263,94	736,19
Vitamina A	Luteína	mg/kg	Nd	Nd	Nd
	Zeaxantina		Nd	Nd	Nd
	13 cis β -Caroteno		0,57	1,75	9,73
	β -Caroteno		0,60	2,98	0,39
	9 cis β -Caroteno		0,12	0,78	4,48
	Licopeno		Nd	0,15	1,85
Vitamina E	γ -Tocoferol		Nd	Nd	Nd
	α -Tocoferol		Nd	1,19	Nd
	δ -Tocoferol		Nd	Nd	Nd
	δ -Tocotrienol		Nd	4,12	8,22
	γ -Tocotrienol		Nd	8,20	16,55
	α -Tocotrienol	Nd	Nd	Nd	

Nota: Nd = No detectado.

Fuente: elaboración propia.

3.2. Resultados de la refinería de aceites vegetales

Se presentan en la siguiente tabla:

Tabla XI. Resultados fisicoquímicos de lodos procedente de la PTAR

N o.	Parámetro	Unidad	Codificación de muestra															
			M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16
1	pH	Unidad de pH	9,2	8,4	7,7	6,9	10,8	8,8	10,0	10,6	7,0	6,9	7,9	9,0	7,4	7,4	6,3	7,0
2	C.E	µS/cm	6655	7170	5580	7155	7065	4455	7565	6520	12	10	4	5	6	5	10	5
3	Fósforo	%	1,1	2,0	1,6	1,3	0,9	0,9	1,0	1,0	0,8	0,8	1,3	1,3	1,0	1,1	1,6	1,7
4	Potasio	%	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2
5	Calcio	%	10,3	11,3	9,1	6,9	11,6	9,1	13,4	14,4	7,2	7,8	6,9	8,8	7,5	6,6	5,9	6,6
6	Magnesio	%	0,7	0,8	0,6	0,4	0,9	0,6	0,6	0,8	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
7	Azufre	%	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2
8	Cobre	mg/kg	25	35	40	40	40	40	30	30	20	20	25	35	20	20	15	10
9	Zinc	mg/kg	115	80	100	130	135	125	135	145	150	150	270	255	190	205	240	190
10	Hierro	g/kg	6,0	8,1	6,3	6,1	6,0	5,4	12,9	11,4	6,8	5,8	8,9	11,0	7,5	7,2	6,5	5,9
11	Manganeso	mg/kg	105	75	45	60	85	45	245	170	45	50	45	45	40	55	45	35
12	Sodio	g/kg	0,9	1,1	1,7	1,5	1,1	1,0	2,6	2,0	1,4	1,3	1,8	1,9	1,3	1,4	2,8	2,3
13	Boro	mg/kg	7,0	29,0	18,5	24,0	21,5	21,0	26,0	14,0	28,5	19,5	14,5	17,0	14,0	12,5	18,5	22,0

Continuación de la tabla XI.

N o.	Parámetro	Unidad	Codificación de muestra															
			M0 1	M0 2	M0 3	M0 4	M0 5	M0 6	M0 7	M0 8	M0 9	M0 0	M1 1	M1 2	M1 3	M1 4	M1 5	M1 6
14	Carbono orgánico	%	37	31	37	45	46	51	45	41	42	44	45	37	37	46	50	48
15	Nitrógeno total	%	0,6	0,8	0,8	1,0	0,9	0,7	1,6	1,2	0,8	0,8	0,9	0,9	0,7	0,8	1,1	0,9
16	C : N		61 :1	40 :1	45 :1	47 :1	50 :1	72 :1	28 :1	35 :1	52 :1	57 :1	51 :1	44 :1	51 :1	56 :1	46 :1	54 :1
17	Sólidos totales	%	24	16	22	21	30	26	19	20	26	26	22	19	24	23	27	23
18	Sólidos volátiles	% de ST	16	8	14	15	20	18	11	12	19	18	14	11	16	15	15	16
19	Sólidos fijos	% de ST	8	8	8	6	10	8	8	8	7	8	7	7	8	7	11	7
20	Humedad	%	76	84	78	79	70	74	81	80	74	74	78	81	76	77	73	77

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Resultados bacteriológicos de lodos procedentes de la PTAR**

Codificación de muestra	Parámetro	
	Coliformes totales	Coliformes fecales
	NMP 50 g / 100 cm ³	NMP 50 g / 100 cm ³
M01	1,08E+06	2,80E+05
M02	5,00E+04	2,80E+04
M03	3,20E+06	4,20E+05
M04	3,20E+06	9,60E+04
M05	4,20E+05	7,80E+04
M06	2,60E+05	1,58E+05
M07	8,60E+03	4,80E+02
M08	2,20E+02	1,36E+02
M09	8,20E+04	5,00E+04
M10	3,20E+06	3,20E+06
M11	3,20E+06	5,00E+04
M12	4,40E+05	2,80E+04
M13	2,80E+04	1,64E+04
M14	4,80E+04	4,20E+04
M15	8,60E+05	4,80E+04
M16	8,60E+05	2,80E+04

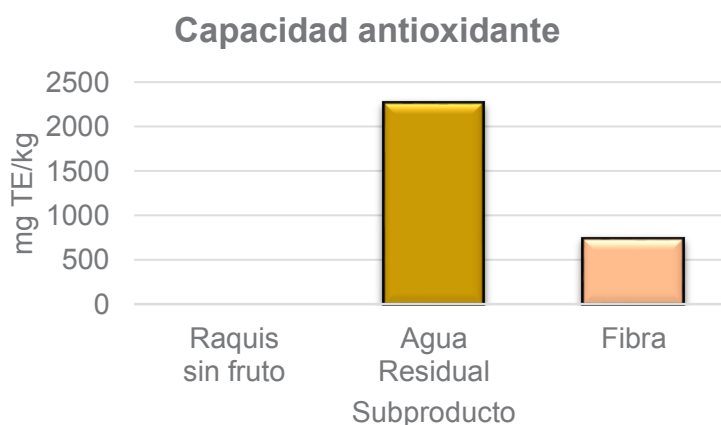
Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Subproductos de la extractora de aceite de palma africana

El mayor contenido de capacidad antioxidante detectado fue en el agua residual (ver figura 6), procedente del tratamiento del aceite crudo, esto se puede deber a la presencia de antioxidantes hidrosolubles como la vitamina C, algunos compuestos fenólicos y las antocianinas (flavonoides). Seguido por la fibra, procedente del pericarpio de la fruta de la palma africana, mientras que en raquis sin fruto no se detectó presencia de capacidad antioxidante.

Figura 6. Capacidad antioxidante en los subproductos analizados

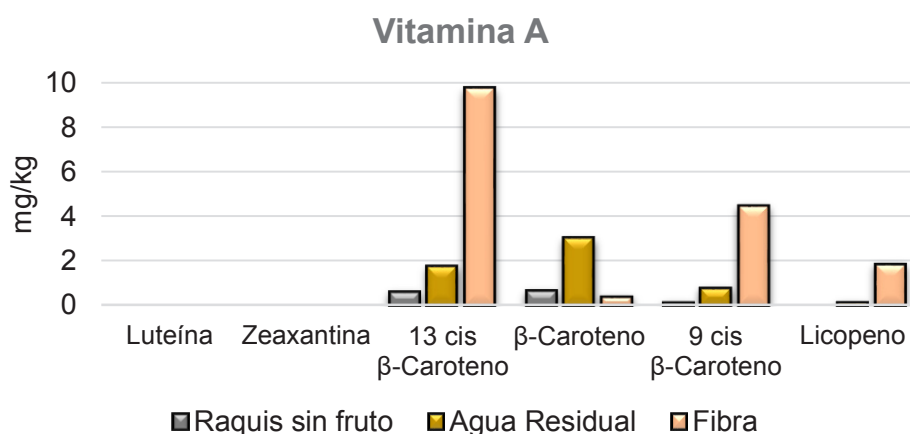


Fuente: elaboración propia.

El componente de la vitamina A con mayor presencia en los subproductos analizados son los carotenoides beta (β) (ver figura 7), el cual es un precursor de

la vitamina A, donde el agua residual analizada se compone principalmente por el isómero β -Caroteno con un 53 % (2,98 mg/kg) y la fibra se compone principalmente por el isómero 13 cis β -Caroteno con 59 % (9,73 mg/kg), seguido del isómero 9 cis β -Caroteno con 27 % (4,48 mg/kg), coincidiendo con Choo y otros autores al detectar mayormente los carotenoides β en la fibra, pero también gran presencia de α -Carotenos y en menor presencia otros isómeros del caroteno.⁵⁷ Sin embargo, en el agua residual Teh y otros autores obtuvieron resultados aproximados de 500 mg/kg de carotenoides totales⁵⁸.

Figura 7. **Concentración de compuestos de vitamina A**



Fuente: elaboración propia.

De los compuestos analizados de la vitamina E, el isómero γ -Tocotrienol es el de mayor presencia detectada, constituyendo el 67 % en la fibra y el 61 % en

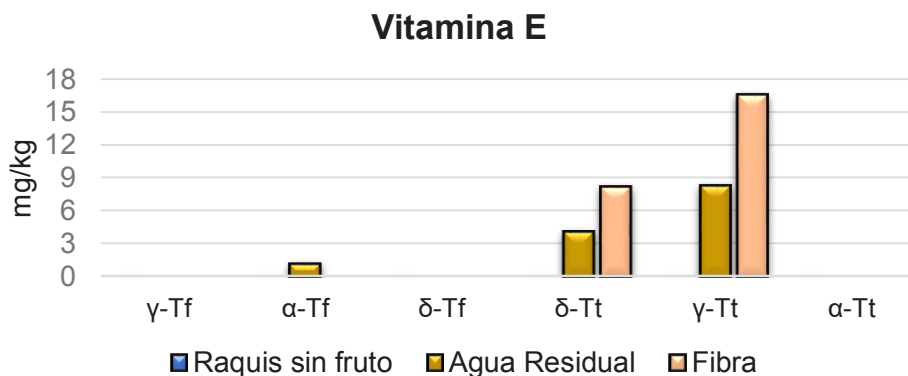
⁵⁷ CHOO, Yuen-May; YAP, Soon-Chee; OOI, Cheng-Keat; MA, Ah-Ngan; GOH, Swee-Hock; ONG, Augustine. *Recovered oil from palm-pressed fiber: a Good source of natural carotenoids, vitamin E, and Sterols*. pp. 599-602

⁵⁸ TEH, Soek; HOCK, Augustine; MAH, Siau. *Recovery and utilization of Palm Oil Mill Effluent source as Value-Added Food Products*. pp. 1183-1191

el agua residual analizada, coincidiendo con Teh y otros autores al ser el γ -Tocotrienol el mayor isómero detectado en esta agua residual⁵⁹. Sin embargo, Choo y otros autores detectaron en la fibra de 57-68 % de α -Tocoferol siendo el mayor constituyente de este, seguido por α -tocotrienol con 15-19 %, γ -Tocotrienol con 15-21 % y δ -Tocotrienol con 1-6 %⁶⁰. Por otro lado, en el raquis sin fruto no se detectó presencia de vitamina E.

Según la FAO, en el análisis de vitaminas en alimentos, el isómero más común y el más activo de la vitamina E es el α -Tocoferol. Por lo tanto, el α -Tocoferol es el de mayor requerimiento para su consumo en concentrado animal, de este isómero se ha detectado menos de 2 mg/kg solo en el subproducto del agua residual, constituyendo el 8 % de los compuestos detectados en este subproducto.

Figura 8. **Concentración de compuestos de vitamina E**



Nota: Tf = Tocoferol; Tt = Tocotrienol

Fuente: elaboración propia.

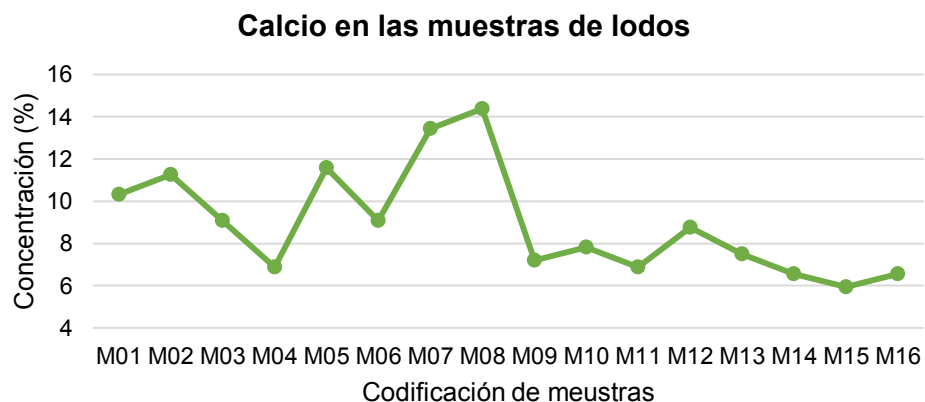
⁵⁹ TEH, Soek; HOCK, Augustine; MAH, Siau. *Recovery and utilization of Palm Oil Mill Effluent source as Value-Added Food Products*. pp. 1183-1191

⁶⁰ CHOO, Yuen-May; YAP, Soon-Chee; OOI, Cheng-Keat; MA, Ah-Ngan; GOH, Swee-Hock; ONG, Augustine. *Recovered oil from palm-pressed fiber: a Good source of natural carotenoids, vitamin E, and Sterols*. pp. 599-602

4.2. Subproducto de la refinería de aceites vegetales

Los niveles de pH y Ca en los lodos, generados en la PTAR de la refinería de aceites vegetales, presentan una disminución a partir de la muestra con codificación M09 (ver figuras 9 y 10) después de culminar el mantenimiento en la PTAR y haberse estabilizado el proceso en la misma. Al no estar estabilizada la PTAR, por lo general, se aumenta la aplicación de Cal reflejando así un aumento significativo en los resultados.

Figura 9. Calcio en muestras de lodos

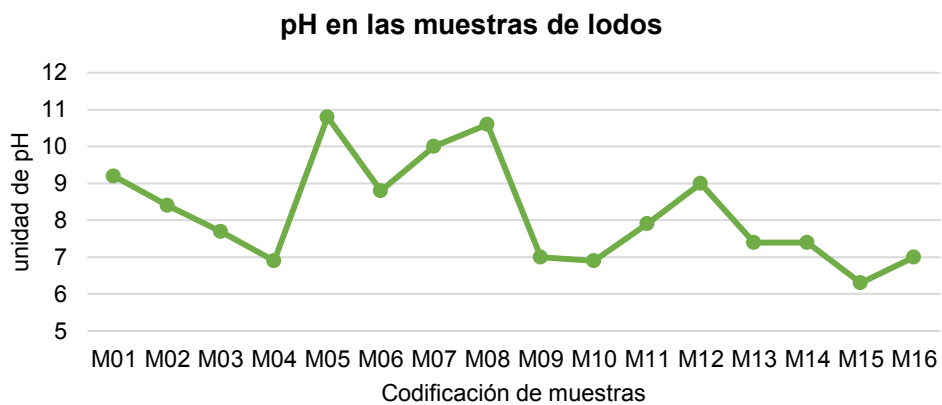


Fuente: elaboración propia.

Los lodos al contar con un pH mayor a 8 serían ideales para nivelar suelos acidificados. Sin embargo, según Román y otros autores para un abono orgánico la mayor actividad bacteriana se lleva a cabo en un pH 6,0 a 7,5, mientras que la actividad fúngica se produce en un pH 5,5 a 8,0, siendo el rango ideal de 5,8 a

7,2⁶¹. En este caso, solo las muestras M04, M09, M10 y M15 (ver figura 10) cumplen con el rango ideal para un abono orgánico. Esto hace necesario que se deba nivelar el pH para utilizarse como abono orgánico.

Figura 10. **Potencial de hidrógeno en muestras de lodos**



Fuente: elaboración propia.

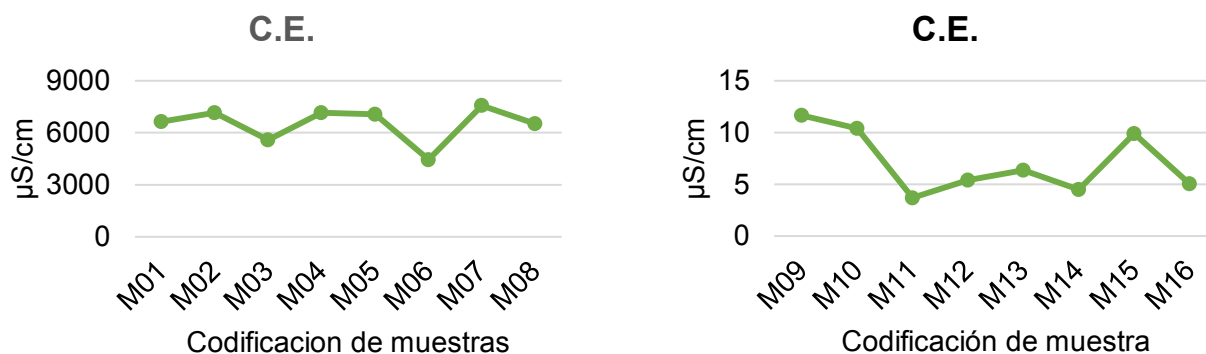
Los valores obtenidos de conductividad eléctrica presentan una disminución significativa al estar la PTAR completamente estabilizada, a partir de la muestra con código M09 (ver figura 11). Al obtener valores de C.E. muy altos y ser aplicados como abono orgánico, se presentan dificultades en el crecimiento de muchos cultivos por las altas cantidades de sales. Según Gómez y Merchán para una C.E. < 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se presenta un buen desarrollo de las plantas⁶². También las concentraciones de sodio deben ser monitoreadas en los abonos orgánicos,

⁶¹ ROMÁN, Pilar; MARTÍNEZ, María; PANTOJA, Alberto. *Manual de compostaje del agricultor*. p. 29

⁶² GÓMEZ, Laura; MERCHÁN, Angela. *Caracterización fisicoquímica de los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual industrial de una empresa de café del Departamento de Caldas*. p. 106

para evitar problemas de salinidad en los suelos, para lo cual se obtuvieron resultados en un rango de 0,9 a 2,8 g/kg.

Figura 11. Conductividad eléctrica en muestras de lodos

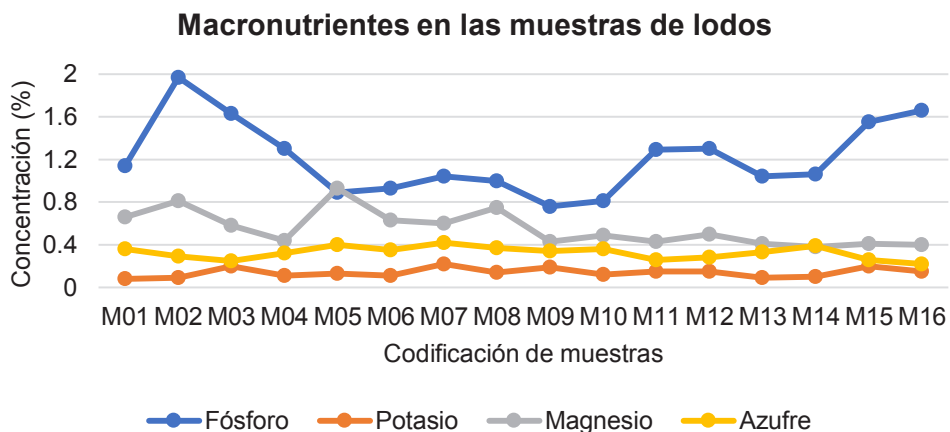


Fuente: elaboración propia.

Según INTAGRI un contenido nutrimental entre 0,2-2,1 % de fósforo; 0,5-1,7 % de potasio; 0,3-1,0 % de magnesio; 20-70 mg/kg de cobre; 108-300 mg/kg de zinc; 165-490 mg/kg de manganeso, y 14-38 mg/kg de boro, como se presenta en la mayoría de los resultados obtenidos (ver figura 12 y 13), se da por un bajo aporte de nitrógeno⁶³. Cabe mencionar que los resultados de Cu y Zn obtenidos están por debajo del límite máximo permisible (LMP) según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA), también de la Norma Mexicana (NOM)-004-SEMARNAT-2002 y el Decreto N° 1287 de Colombia para el tipo de lodos de clase A.

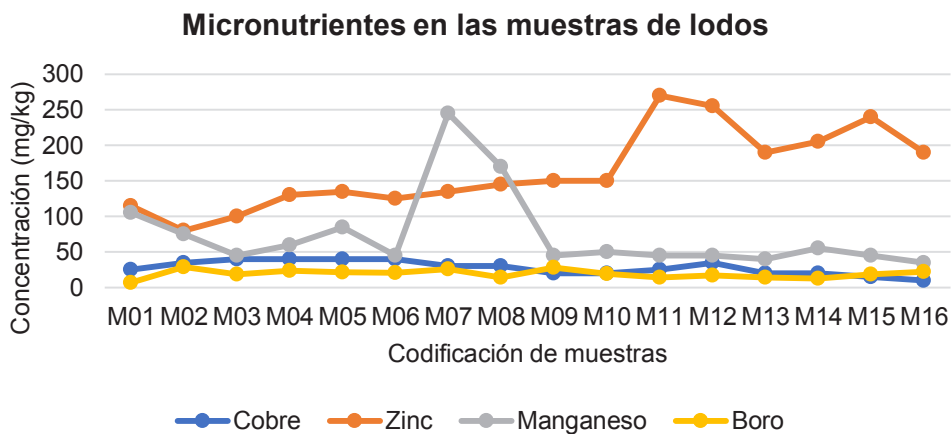
⁶³ INTAGRI. *Los abonos orgánicos. Beneficios, tipos y contenidos nutrimentales*. p. 4

Figura 12. **Macronutrientes en muestras de lodos**



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Micronutrientes en muestras de lodos**

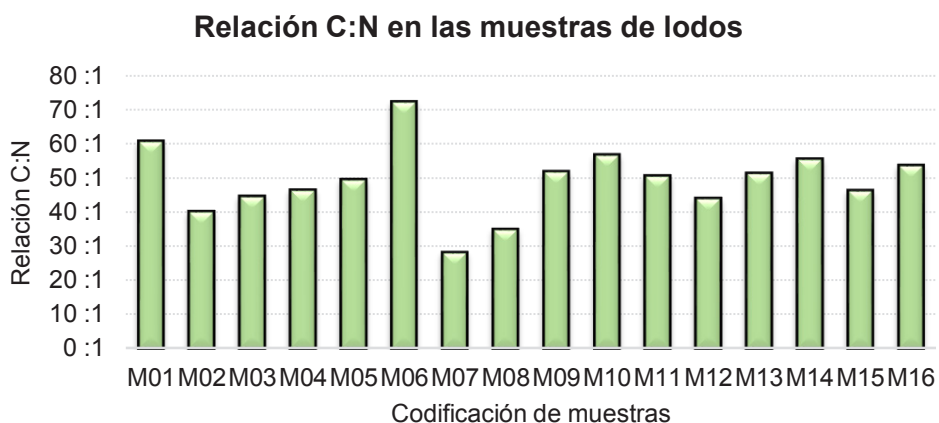


Fuente: elaboración propia.

Los valores de hierro obtenidos en este estudio se encuentran entre 5 y 13 g/kg, los cuales se pueden considerar normales al ser comparados con los resultados obtenidos por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM) de España al realizar análisis a los lodos provenientes de 66 diferentes PTAR obteniendo valores de hierro desde 5 a 70 g/kg.

Según Román para iniciar un abono orgánico la relación C:N debe estar en un rango de 25:1 a 35:1⁶⁴, por lo tanto los resultados obtenidos de las muestras en su mayoría no cumplen con este criterio, exceptuando la muestras M07 y M08 (ver figura 14). Para utilizar los lodos como abono orgánico se debe adicionar material rico en nitrógeno, como el estiércol o gallinaza, y así alcanzar una adecuada relación C:N.

Figura 14. **Relación carbono-nitrógeno en muestras de lodos**



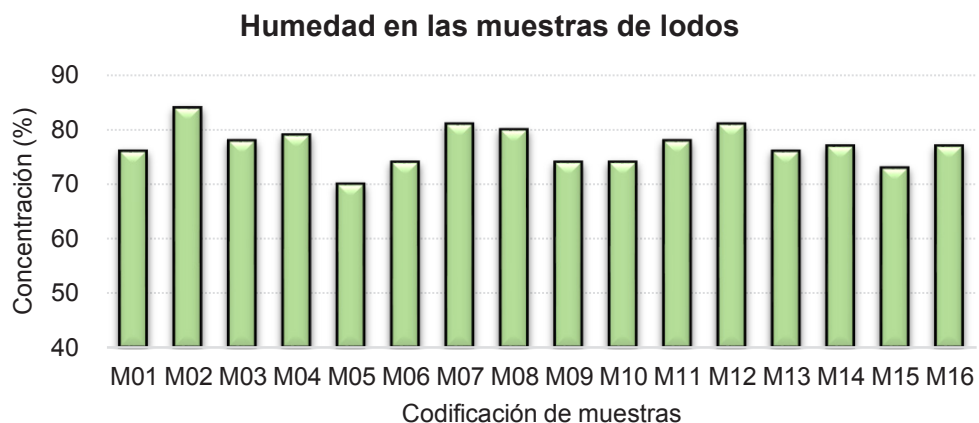
Fuente: elaboración propia.

⁶⁴ ROMÁN, Pilar; MARTÍNEZ, María; PANTOJA, Alberto. *Manual de compostaje del agricultor*. p. 53

Según Laca cuando la relación de sólidos totales volátiles entre sólidos totales está en un rango entre 60 a 65 % es indicativo para considerar que los lodos están digeridos⁶⁵. Al aplicar la relación STV/ST del promedio de los resultados obtenidos de las muestras analizadas da como resultado 65 %, por consiguiente, se considera que estos lodos analizados están digeridos.

El rango ideal de humedad, según Román, para un abono orgánico es entre 45 % a 60 %, ya que una $H < 45 \%$ representa falta de agua para los microorganismos, y una $H > 60 \%$ representa falta de oxígeno⁶⁶. Todas las muestras analizadas cuentan con una $H > 65 \%$ (ver figura 15), por lo tanto se debe disminuir la misma para ser utilizado como abono orgánico.

Figura 15. **Humedad en las muestras de lodos**



Fuente: elaboración propia.

⁶⁵ LACA, Adriana; LACA, Amanda; DÍAZ, José. *Producción y características de lodos. Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas*. p. 252

⁶⁶ ROMÁN, Pilar; MARTÍNEZ, María; PANTOJA, Alberto. *Manual de compostaje del agricultor*. p. 27

Al aplicar los lodos en los suelos como abono orgánico se debe cumplir con los niveles de organismos patógenos sanitariamente aceptados según la regulación de cada región, para disminuir los riesgos de enfermedades que los mismos puedan ocasionar. Según Kiely, citado por Torres y otros autores, los lodos cuentan con una mayor concentración de microorganismo patógenos a causa de la reducción del contenido de agua⁶⁷. Por lo tanto, los resultados de coliformes totales y fecales obtenidos se consideran normales a causa del agua residual de tipo doméstica que recibe la PTAR.

Según el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 de Guatemala se utiliza la metodología de Unidades Formadoras de Colonias (UFC). Sin embargo, en esta investigación se utiliza la metodología de Número Más Probable (NMP) debido a los insumos disponibles. Los resultados de coliformes fecales obtenidos, exceptuando la muestra con codificación M10, están por debajo del LMP según la Norma Mexicana (NOM)-004-SEMARNAT-2002 para el tipo de lodos de clase C.

4.3. Opciones de aprovechamiento de subproductos

- Raquis sin fruto

Es el subproducto en el que se ha detectado menor valor nutricional, siendo detectado menos de 1 mg/kg en compuestos de vitamina A. Al ser utilizado como fertilizante en los campos de los cultivos, se caracteriza por su lento proceso de descomposición y por su gran volumen. Este último puede ser disminuido al ser

⁶⁷ TORRES, Patricia; ESCOBAR, Juan; PÉREZ, Andrea; IMERY, Ricardo; NATES, Paola; SÁNCHEZ, Guillermo; SÁNCHEZ, Martha; BERMÚDEZ, Alejandro. *Influencia del material de enmienda en el compostaje de lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR* . pp. 53-61

prensado o triturado para así disminuir su costo de transporte y el espacio requerido de disposición. Por otro lado, este subproducto puede ser utilizado en compostaje o generar abono orgánico bajo condiciones controladas para disminuir su volumen y acelerar su proceso de degradación.

Según Khatun a partir de los azúcares o granos de almidón fermentados se genera bioetanol, donde el raquis es rico en glucosas siendo apto para obtener bioetanol con un costo bajo a diferencia de otros cultivos (girasol, canola, soya)⁶⁸. El raquis sin fruto también puede ser reutilizado como lecho filtrante para un biofiltro como complemento en el tratamiento de las aguas residuales, donde Sangucho experimentó remoción con eficiencia mayor al 80 % de parámetros como sólidos totales, grasas y aceites, DBO y DQO⁶⁹. Cabe mencionar que, según Del Hierro y Van Dam, este subproducto puede ser utilizado como materia prima (pulpa de celulosa) en la elaboración de papel^{70,71}

- Fibra y agua residual

Estos subproductos pueden pasar por un proceso de extracción para los compuestos nutricionales detectados (antioxidantes, vitamina A y E), en el caso de la fibra se puede optar por su pulverización para ser reutilizada directamente y efectuar una disminución a su volumen. Estos compuestos nutricionales tienen una amplia utilidad como complemento alimenticio de diferentes especies y en el ámbito cosmético. Sin embargo, se requiere mayor investigación sobre otras

⁶⁸ KHATUN, Rahíma; HASAN, Mohammad; MONIRUZZAMAN, Mr; YAAKOB, Zahira. *Sustainable oil palm industry: The possibilities*. pp. 608-619

⁶⁹ SANGUCHO, Wendy; RODRÍGUEZ, Abrahan. *Evaluación de la viabilidad del uso del raquis como lecho filtrante para el tratamiento de agua residual proveniente de la extracción de aceite de palma*. p. 74

⁷⁰ DEL HIERRO, Eduardo. *Aprovechamiento de los sub-productos de palma de aceite*. pp. 149-153

⁷¹ VAN DAM, Jan. *Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa*. pp. 149-156

posibles composiciones presentes en los subproductos y la forma adecuada para realizar la extracción y efectuar la reutilización de los mismos.

A la fibra se le puede adecuar su capacidad de adsorción para ser utilizada en la remoción de metales pesados en biofiltros, como el cromo, en soluciones acuosas considerándose una opción económicamente viable a comparación de otras.⁷² Mientras que Gamarra obtuvo resultados favorables al utilizar este subproducto en la elaboración de placas de fibrocemento cumpliendo con las especificaciones de la norma alemana DIN 1101.⁷³

Según Lam y Lee las aguas residuales de todo el proceso de la extracción de aceite de palma también cuentan con nutrientes como el nitrógeno y fósforo, siendo posible reutilizarse para cultivar algas. Estas algas pueden utilizarse en diferentes ámbitos como en la generación de alimentos para la piscicultura, abono orgánico, producción de biodiesel y bioetanol.⁷⁴

- Lodos

Al contar con una equilibrada relación C:N y adecuada humedad, se pueden reutilizar en diferentes ámbitos como en los campos de diferentes tipos de cultivos al ser aplicados como abono orgánico y disminuir la utilización de fertilizantes químicos. Con los mismos se puede dar el mejoramiento de diferentes tipos de suelos como los suelos acidificados, suelos con bajos niveles de nutrientes y en los suelos forestales que se ven afectados por eventos de

⁷² ISA, Mohamed; IBRAHIM, Naimah; AZIZ, Hamidi; NORDIN, Moh; SABIANI, Nor; LORESTANI, Ali; MOHAMED, Shamsul. *Removal of chromium (VI) from aqueous solution using treated oil palm fibre*. pp. 662-668

⁷³ GAMARRA, Luis. *Aptitud de las fibras del mesocarpio de la palma aceitera (Elaeis guineensis Jacq.) para la elaboración de tableros fibrocemento*. p. 59

⁷⁴ LAM, Man; LEE, Keat. Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME): Win-win strategies toward better environmental protection. pp. 124-414

incendios, estos lodos también pueden ser aprovechados en el ámbito de la construcción al ser mezclados con suelos para el reforzamiento de taludes.

CONCLUSIONES

1. La hipótesis planteada al inicio de esta investigación se considera nula, al obtener resultados menores a 300 mg/kg de las vitaminas analizadas y ante el hecho de los lodos contar con una relación C:N mayor a 40:1.
2. En la industria de extracción y refinación del aceite de palma africana se ha identificado la generación diaria de los siguientes subproductos: raquis sin fruto, fibra procedente del pericarpio del fruto, aguas residuales, lodos al tratar el aceite crudo, cenizas por combustión, lodos del tratamiento de aguas residuales y tierra residual de blanqueo.
3. Se ha detectado mayor capacidad antioxidante en al agua residual, procedente del tratamiento del aceite crudo, seguido por la fibra y siendo no detectado en el raquis sin fruto. El isómero de vitamina A con mayor presencia detectada en los subproductos analizados son los carotenos β , siendo el 13 cis β -Caroteno con 9,73 mg/kg en la fibra el de mayor presencia. El isómero de vitamina E con mayor presencia detectada es el γ -Tocotrienol, donde su mayor contenido se detectó en la fibra con 16,55 mg/kg y siendo no detectado en el raquis sin fruto.
4. Los lodos generados por la PTAR de la refinería de aceites vegetales, donde se refina el aceite de palma africana, mantienen un déficit de nitrógeno y la humedad es superior al límite recomendado para ser reutilizado como abono orgánico. Estas condiciones mencionadas se presentan independientemente de encontrarse o no la PTAR en

mantenimiento, lo cual supone que los lodos requieren una adecuación previa a ser utilizados como abono orgánico.

5. Los compuestos nutricionales detectados en el agua residual y en la fibra pueden ser extraídos para ser aprovechados en el ámbito alimenticio de diferentes especies y en la industria cosmética, mientras que el raquis sin fruto, así como la fibra, pueden ser reutilizados como material filtrante en biosólidos para el tratamiento de las aguas residuales. Por otro lado, los lodos pueden ser reutilizados como material complementario en la confección de taludes sobre terreno natural.

RECOMENDACIONES

1. Realizar análisis con mayor cantidad de parámetros con base en el tipo de plantación utilizada a los subproductos generados en la industria de la extracción y refinación del aceite de palma africana en los diferentes puntos de generación.
2. Evaluar el subproducto de cenizas, generadas por combustión en la extractora y refinería de aceite de palma africana, para ser reutilizadas como carbón activado.
3. Efectuar análisis a los lodos según el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006, que emite el *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales*, y de la disposición de lodos en Guatemala en diferentes estaciones del año.
4. Efectuar prueba con la adecuación del lodo para evaluar su potencial como abono orgánico en el mejoramiento de diferentes tipos de suelo y en el crecimiento, desarrollo y producción de diferentes cultivos.
5. Fortalecer y crear acuerdos o normas con respecto a la generación, manejo y disposición final de los diferentes residuos, sólidos y líquidos, generados en las industrias con el fin de buscar el beneficio para el medio ambiente, colaboradores y las empresas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 del Congreso de la República de Guatemala. *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: Autor, 2006. 24 p.
2. BARRIENTOS, Andrea. *Mejora en la estabilidad de la acidez de una aceite crudo de Palma Africana (Elaeis guineensis Jacq) por medio del incremento en el tiempo de esterilización de la fruta*. Trabajo de graduación de Ingeniería. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 2014. 64 p.
3. BRATBY, John. *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. Third ed. London, UK: IWA Publishing, 2016. 524 p.
4. CASTAÑEDA, C.; RAMOS, LL. e IBÁÑEZ, V. Evaluación de la capacidad antioxidante de siete plantas medicinales peruanas. *Horizonte Médico* 8 (1), 2008. pp. 56-72
5. CHAVALPARIT, Orathai.; RULKENS, Wim.; MOL, Arthur y KHAODHAIR, S. Options for environmental sustainability of the crude palm oil industry in Thailand through enhancement of industrial ecosystems. *Environment development and sustainability*. Springer Verlag 8 (2), 2006. pp. 271-287

6. CHOO, Yuen-May; YAP, Soon-Chee; OOI, Cheng-Keat; MA, Ah-Ngan; GOH, Swee-Hock y ONG, Augustine. Recovered Oil from Palm-Pressed Fiber: A Good Source of Natural Carotenoids, Vitamin E, and Sterols. *JAOCS Press* 73 (5), 1996. pp. 599-602.
7. Comisión Guatemalteca de Normas. *NTG/ISO 5667. Calidad del agua-muestreo*. Guatemala, Guatemala: Autor, 2012. 46 p.
8. Decreto N° 1287 del Gobierno de Colombia. *Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales*. Bogotá, Colombia: Autor, 2014. 15 p.
9. DE LEÓN, Gustavo. *Incrementar los índices de productividad mejorando el proceso productivo de aceite de palma africana a través de la implementación de un programa de producción más limpia*. (Tesis de ingeniería). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 2013. 134 p.
10. DEL HIERRO, Eduardo. Aprovechamiento de los subproductos de palma de aceite. *Palmas* 14 (número especial), 1993. pp. 149-153.
11. ESCOBAR, Ricardo.; PERALTA, Francisco y ALPÍZAR, Gerardo. Perspectivas para el desarrollo de la industria de la palma de aceite a nivel mundial. *Palmas* 15 (1), 1994. pp. 51-59.
12. FAO. *Análisis de vitaminas en alimentos*. [en línea]. <<http://www.fao.org/3/AH833S19.htm>>. [Consulta: julio de 2020].

13. FAOSTAT. *FAOSTAT Crops*. [en línea]: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>>. [Consulta: marzo de 2020].
14. GAMARRA, Luis. *Aptitud de las fibras del mesocarpio de la palma aceitera (Elaeis guineensis Jacq.) para la elaboración de tableros fibrocemento*. Facultad de Ciencias Forestales. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2016. 116 p.
15. GÓMEZ, Laura y MERCHÁN, Ángela. *Caracterización Fisicoquímica de los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual industrial de una empresa de café del Departamento de Caldas*. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Manizales: Colombia: Universidad Católica de Manizales, 2016. 157 p.
16. GREPALMA. *Historia de la institución*. [en línea]. <<https://www.grepalma.org/historia/>>. [Consulta: octubre de 2019].
17. GREPALMA. *Usos del aceite de palma*. [en línea]. <<https://www.grepalma.org/aceite-de-palma-y-sus-usos/demanda-mundial-rendimientos/>>. [Consulta: marzo de 2020].
18. HUET, Cristina. *Métodos Analíticos para la determinación de Antioxidantes en muestras biológicas*. Facultad de Farmacia. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid, 2017. 20 p.
19. ICA. *Manual de Asistencia Técnica No. 47. El análisis de suelos, plantas y agua para riego*. Instituto Colombiano Agropecuario, Disciplinas Agrícolas. Bogotá: Colombia, 1989. 253 p.

20. INTAGRI. *Los abonos orgánicos. Beneficios, tipos y contenidos nutrimentales*. Serie Agricultura Orgánica 8. México: INTAGRI, 2016. 4 p.
21. ISA, Mohamed; IBRAHIM, Naimah; AZIZ, Hamidi; NORDIN, Moh; SABIANI, Nor; LORESTANI, Ali y MOHAMED, Shamsul. Removal of chromium (VI) from aqueous solution using treated oil palm fibre. *Journal of Hazardous Materials*, 152 (2), 2008. pp. 662–668.
22. ITC. *Lista de los países exportadores en el 2018. Aceite de palma y sus fracciones, incl. refinados, sin modificar químicamente*. [en línea]: <https://www.trademap.org/Country_SelProduct.aspx?nvpm=3%7c%7c%7c%7c1511%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1>. [Consulta: noviembre de 2019].
23. JENNINGS, Thomas. *Lyophilization: Introduction and basic principles*. Florida, Estados Unidos: Taylor & Francis Group, 1999. 621 p.
24. KHATUN, Rahíma; HASAN, Mohammad; MONIRUZZAMAN, Mr. and YAAKOB, Zahira. Sustainable oil palm industry: the possibilities. *ELSEVIER: Renewable and Sustainable Energy Reviews* (76), 2017. pp. 608-619
25. LABÍN, María. *Estudio del método de recolecta, transporte y almacenamiento para prolongar la viabilidad del grano de polen de palma africana (Elaeis guineensis Jacq)*, Las Palmas S.A., La Gomera, Escuintla, Guatemala, C.A. (Tesis de ingeniería). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 2013. 85 p.

26. LACA, Adriana; LACA, Amanda y DÍAZ, José. *Producción y características de lodos. Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas*. Madrid, España: Ediciones Paraninfo, 2019. 252 p.
27. LAM, Man y LEE, Keat. Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME): Win-win strategies toward better environmental protection. *ELSEVIER: Biotechnology Advances* 29 (1), 2011. pp. 124-141.
28. LONDOÑO, Julián. *Antioxidantes: importancia biológica y métodos para medir su actividad*. Bogotá, Colombia: Corporación Universitaria Lasallista, 2012. pp. 129-162.
29. LOZANO, Jany. *Propiedad intelectual y contenidos digitales: investigación explorativa*. [Blog]. 6 de noviembre de 2008. [en línea]. <<https://janeth-investigacioniv.blogspot.com/2008/11/investigacion-exploratoria.html>>. [Consulta: noviembre de 2019].
30. MANTILLA, Gustavo. Validación de uso de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales tipo UASB como insumo en recuperación de suelos agrícolas. *ESA/CA* 1 (1), 2015. pp. 18-23.
31. MÁRQUEZ, Mercedes; YÉPEZ, Carmen; SÚTIL-NARANJO, Rosalía y RINCÓN, Manuel. Aspectos básicos y determinación de las vitaminas antioxidantes E y A. *Invest. Clin* 43 (3), 2002. pp. 191-204.
32. MARTÍNEZ, Adriana; PÉREZ, María; PINTO, Joaquín; GURROLA, Blanca y OSORIO, Ana. Biorremediación de suelo contaminado con

hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Revista Internacional Contaminación Ambiental* 27 (3), 2011. pp. 241-252.

33. Metcalf y Eddy, Inc. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. Tercera edición. Volumen I. Madrid, España: McGraw-Hill, 1998. 1485 p.
34. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. *Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España*. Madrid, España: INVENTIAL, S.L., 2009. 137 p.
35. MORA, Olga; CORREDOR, Carlos; GÓMEZ, Pedro; LAREO, Leonardo; y VARGAS, Carlos. Aceite de palma, salud y nutrición humana. *Palmas* 21 (4), 2000. pp. 19-27.
36. NAGENDRAN, B.; UNNITHAN, R.; CHOO, Y. y SUNDRAM, Kalyana. Characteristics of red palm oil, a carotene- and vitamin E-rich refined oil for food uses. The United Nations University. *Food and Nutrition Bulletin* 21 (2), 2000. pp. 189-194
37. PALACIOS, Leonardo. Breve historia de las vitaminas. *Revista Médica Sanitas* 16 (3), 2013. pp. 142-145.
38. PELLEGRINI, Nicoletta; SERAFINI, Mauro; COLOMBI, Bárbara; DEL RÍO, Daniele; SALVATORE, Sara; BIANCHI, Marta and BRIGHENTI, Furio. Total Antioxidant Capacity of Plant Foods, Beverages and Oils Consumed in Italy Assessed by Three Different

In Vitro Assays. *American Society for Nutritional Sciences* 133 9 (1), 2003. pp. 2812-2819.

39. PÉREZ, Julián y MERINO, María. *Definición de abono orgánico*. Propiedad intelectual y contenidos digitales. [Blog]. 2015. [en línea] <<https://definicion.de/abono-organico/>>. [Consulta: diciembre de 2019].
40. RAMALHO, Rubens. *Tratamiento de aguas residuales*. Madrid, España: Editorial Reverté, 1996. 705 p.
41. RAMÍREZ, Ramiro y PÉREZ, Martha. Evaluación del potencial de los biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y su efecto sobre el cultivo de rábano rojo (*Raphanus sativus* L.). *Revista de la Facultad Nacional Agronomía* 59 (2), 2006, pp. 3543-3556.
42. RAYGADA, Ruperto. *Manual técnico para el cultivo de la palma aceitera*. Primera edición. Lima, Perú: Asociación de Promoción Agraria, 2005. 104 p.
43. RE, Roberta; PELLEGRINI, Nicoletta; PROTEGGENTE, Anna; PANNALA, Ananth; YANG, Min and RICE-EVANS, Catherine. Antioxidant Activity Applying an Improved ABTS Radical Cation Decolorization Assay. *Elsevier Science Inc.* 26 (10), 2006. pp. 1231–1237.

44. ROMÁN, Pilar; Martínez, María y Pantoja, Alberto. *Manual de Compostaje del Agricultor*. Santiago, Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2013. 106 p.
45. ROMERO, Jairo. *Tratamiento de aguas Residuales. Teoría y principios de diseño*. Tercera Edición. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010. 1213 p.
46. RUIZ, Rodolfo; ROMERO, Elkin; HERNÁNDEZ, Helberth y SALINAS, Iván. Evaluación del fruto entero de palma de aceite ofrecido ad libitum en la alimentación de pollos de engorde. *Citecsa* 5 (9), 2014. pp. 38-46.
47. SÁNCHEZ, Maribel; RODRÍGUEZ, Rubén; MARTÍN, Verónica; SEPÚLVEDA, Liliana; SUTIL, Rosalía y CONTRERAS, Freddy. Estrés y vitaminas antioxidantes en pacientes diabéticos Tipo 2. *AVFT* 27 (1), 2008. pp. 166-172
48. SANGUCHO, Wendy y RODRÍGUEZ, Abrahan. *Evaluación de la viabilidad del uso del raquis como lecho filtrante para el tratamiento de agua residual proveniente de la extracción de aceite de palma*. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, 2018. 96 p.
49. SANTIBÁÑEZ, V. *Determinación del pH y conductividad eléctrica del suelo. Proyecto MECESUP UCH 0303*. Universidad de Chile. [en línea]. <http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/medio_mod1.pdf>. [Consulta: abril de 2020].

50. SAVAL, Susana. Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *Revista de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería, A.C.* 16 (2), 2012. pp. 14–46.
51. SAYAGO, A.; MARÍN, M.; APARICIO, R. y MORALES, M. Vitamina E y aceites vegetales. *Aceites y grasas, CSIC:* 58 (1), 2007. pp. 74-86.
52. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México. *NOM-004. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.* México: Autor, 2002. 60 p.
53. SIERRA, Juan; SIERRA, Lucellys y OLIVERO, Jesús. *Potencial económico de la palma aceitera (Elaeis guineensis Jacq).* San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2017. pp. 523-534.
54. Technoserve. *Manual técnico de palma africana.* San Pedro Sula, Honduras: Autor, 2009. [en línea]: <<https://palma.webcindario.com/manualpalma.pdf>>. [Consulta: noviembre de 2019].
55. TEH, Soek.; HOCK, Augustine and MAH, Siau. Recovery and utilization of Palm Oil Mill Effluent source as Value-Added Food Products. *J. Oleo Sci.* 66 (11), 2017. pp. 1183-1191
56. TORRES, Patricia; ESCOBAR, Juan; PÉREZ, Andrea; IMERY, Ricardo; NATES, Paola; SÁNCHEZ, Guillermo; SÁNCHEZ, Martha y BERMÚDEZ, Alejandro. Influencia del material de enmienda en el compostaje de lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas

Residuales – PTAR. *Ingeniería e Investigación* 58 (2), 2005. pp. 53-61.

57. USEPA. *Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge; Final Rules. 40 CFR Part: 503*. United States: U.S. Environmental Protection Agency, 1993. 175 p.
58. VAN DAM, Jan. Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa. *Palmas* 37 (número especial), 2016. pp. 149-156.
59. ZAGAL, Erick y SADZAWKA, Angélica. *Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos*. Facultad de Agronomía de Chillán. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, 2007. 103 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Liofilización de muestras de raquis



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Preparación de muestras al ser molida



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Equipo para mezclar las muestras



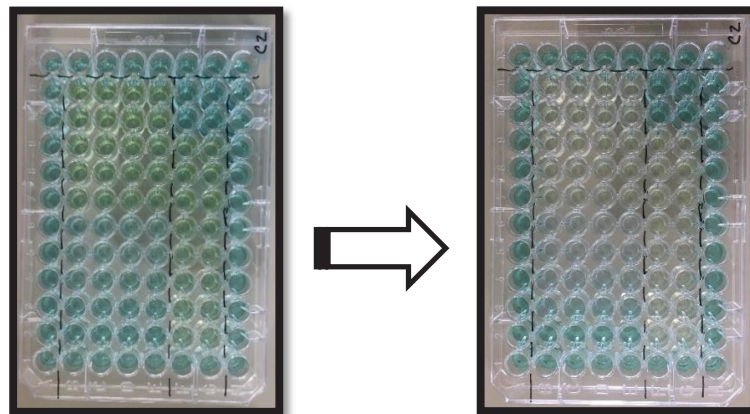
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Equipo para centrifugar muestras



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Reacción del ensayo ABTS - Capacidad antioxidante**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Equipo para leer datos de capacidad antioxidante**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Equipo de cromatografía líquida de alta eficiencia



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Pesaje de muestras de lodos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Horno para secar muestras**



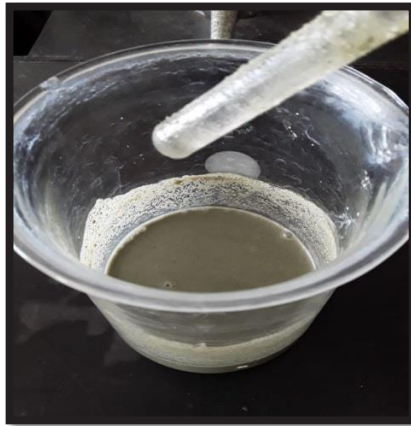
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Mufla para calcinar muestra**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. Preparación de muestra de lodos para ensayo de tubos de fermentación



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. Incubadoras para ensayo de tubos de fermentación



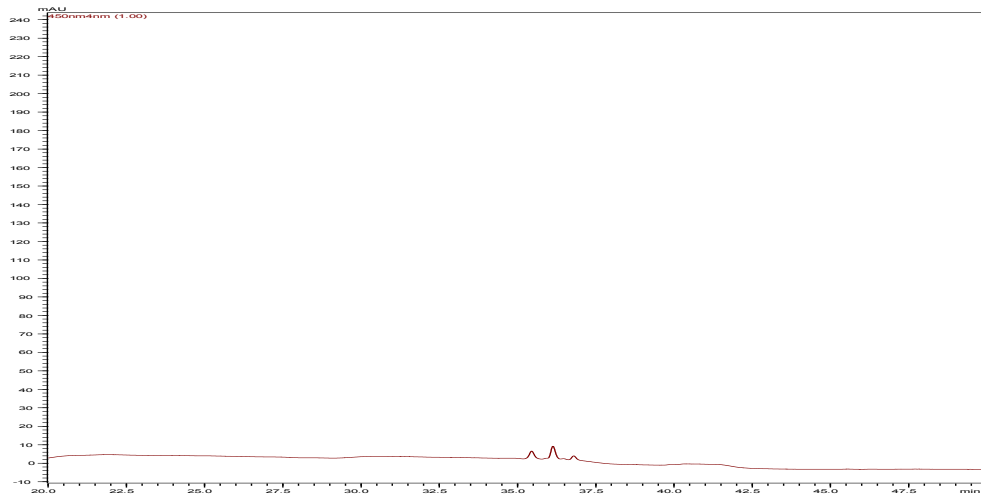
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. Tubos del ensayo de tubos de fermentación incubados



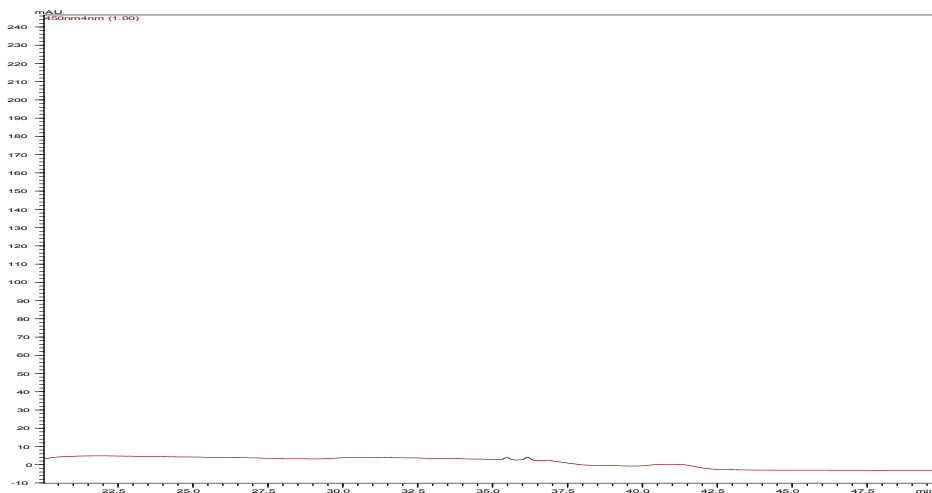
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. Cromatograma de vitamina A para el agua residual



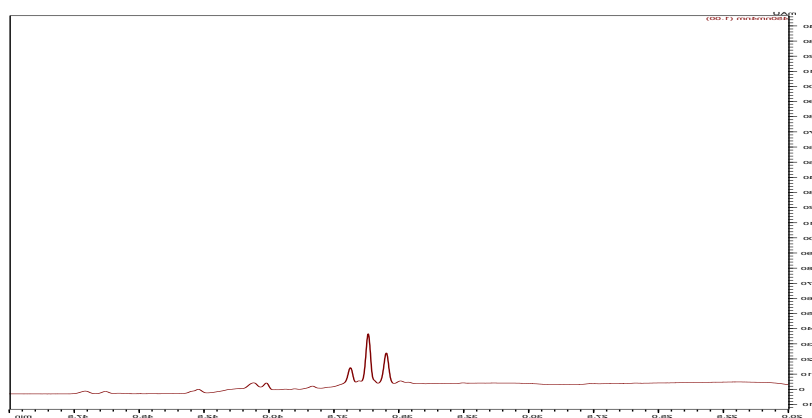
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. Cromatograma de vitamina A en el raquis



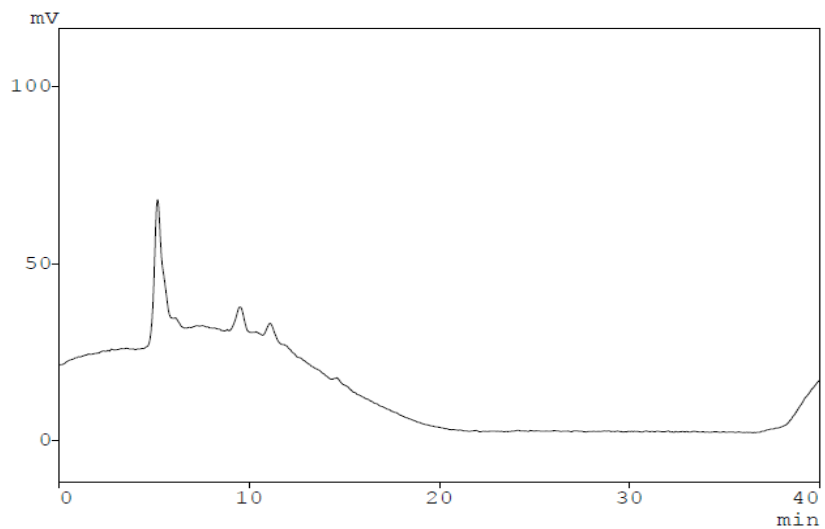
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. Cromatograma de vitamina A para la fibra



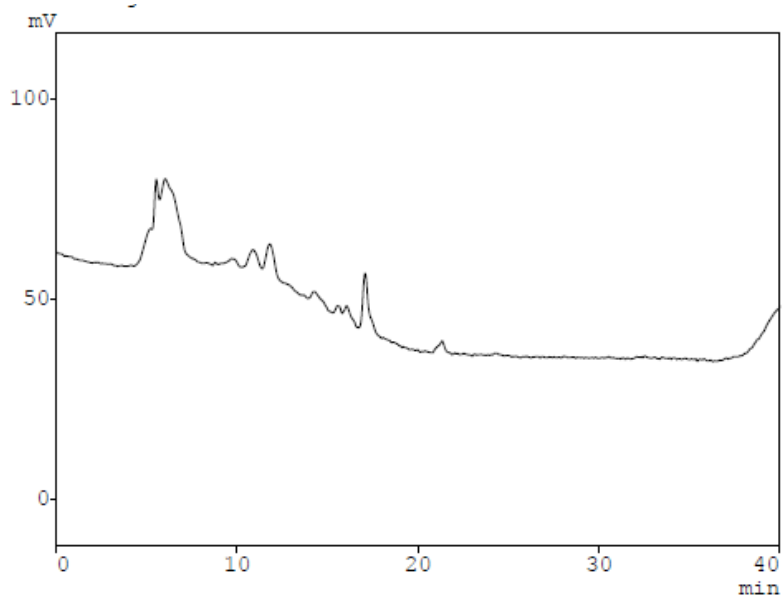
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. Cromatograma de resultados de vitamina E para el agua residual



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. Cromatograma de resultados de vitamina E para la fibra



Fuente: elaboración propia.

