



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“REMOCIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DEL AGUA RESIDUAL
DEL PROCESAMIENTO DEL CAFÉ MEDIANTE BIOADSORBENTES DERIVADOS
DE RESIDUOS AGRÍCOLAS”

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

Adrián Garaycochea Mendoza del Solar

Asesora:

Ing. Betty Soledad Peña Orocaja

Lima – Perú

2020

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 11 de marzo de 2020.

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Dr. Jose Eloy Cuellar Bautista	<input type="checkbox"/>
Miembro: Mg. Fernando Javier Chavez Zegarra	
Miembro: Ing. Roxana Yanett Diaz Vega	

Se reúnen para evaluar la tesis titulada:

REMOCIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DEL AGUA RESIDUAL DEL PROCESAMIENTO DEL CAFÉ MEDIANTE BIOADSORBENTES DERIVADOS DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

Presentada por el bachiller:

- Adrian Garaycochea Mendoza del Solar

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesorada por:

- Ing. Betty Soledad Peña Orocaja

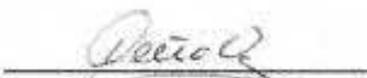
Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Ambiental en la sustentación, concluyen de manera unánime () por mayoría simple (X) calificar a:

Tesisista: Adrian Garaycochea Mendoza del Solar.		Nota (en letras): Dieci y ocho	
Aprobado ()	Aprobado - Muy buena (X)	Aprobado - Sobresaliente ()	Desaprobado ()

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.


 Dr. Jose Eloy Cuellar Bautista
 Presidente del Jurado


 Mg. Fernando Javier Chavez
 Zegarra
 Miembro 1


 Ing. Betty Soledad Peña Orocaja
 Asesora


 Ing. Roxana Yanett Diaz Vega
 Miembro 2

DEDICATORIA

*A mi gran amigo Josef,
Glück-auf mein Freund.*

AGRADECIMIENTOS

A la ONG Solidaridad Network que colaboró con el desarrollo de esta investigación, reafirmando su compromiso en apoyar a los actores de las cadenas productivas en soluciones innovadoras para mejorar la producción y asegurar la transición hacia una economía sostenible.

A Walter Gutiérrez y a Julio Vásquez por enseñarme de cerca la problemática ambiental que enfrentan, además de su apoyo logístico con la investigación.

A los técnicos de laboratorio de la Escuela de Ingeniería Ambiental por su acostumbrado apoyo en la preparación de materiales y equipos para la fase experimental de la investigación.

A la Ingeniera Betty Peña; por su supervisión y orientación en el desarrollo del proyecto de investigación.

A la Ingeniera Ángela Díaz, por incentivar me a realizar esta investigación.

Al Ingeniero William Castañeda; por su asesoría en la elaboración de biochar.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
II. MARCO TEÓRICO	14
2.1. Historia del café.....	14
2.2. Aspectos botánicos del café.....	15
2.3. Taxonomía del café	17
2.4. Mejora vegetal	19
2.5. El café en el Perú	20
2.6. Proceso productivo del café.....	21
2.7. Marco normativo.....	26
2.8. Demanda Química de Oxígeno – DQO	28
2.9. Potencial de hidrógenos – pH	29
2.10. Residuos agrícolas	29
2.11. Adsorción.....	31
2.12. Isotherma de adsorción de Freundlich.....	32
2.13. Bioadsorción	33
2.14. Biochar.....	36
III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	38
3.1. Objetivo general.....	38

3.2.	Objetivos específicos.....	38
3.3.	Hipótesis general.....	38
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	39
4.1.	Materiales	39
4.2.	Métodos	41
V.	RESULTADOS.....	54
5.1.	Agua residual del procesamiento del café	54
5.2.	Porcentaje de humedad de los materiales precursores	54
5.3.	Caracterización del biochar obtenido	55
5.4.	Remoción de la DQO del agua residual del procesamiento del café.....	58
5.5.	Comportamiento del pH del agua residual del procesamiento del café	60
5.6.	Determinación del bioadsorbente más efectivo.....	62
5.7.	Pruebas cinéticas de adsorción	64
5.8.	Comportamiento de la DQO en los ensayos cinéticos.....	67
5.9.	Comportamiento del pH en los ensayos cinéticos.....	69
VI.	DISCUSIÓN	71
6.1.	Calidad del agua residual del procesamiento del café.....	71
6.2.	Características del biochar derivado de los residuos agrícolas estudiados .	74
6.3.	Evaluación de la remoción de la DQO del agua residual del procesamiento del café	77
6.4.	Pruebas de adsorción del bioadsorbente más efectivo.....	81

VII. CONCLUSIONES	83
VIII. RECOMENDACIONES	84
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
X. ABREVIATURAS	96
XI. ANEXOS.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Coffea arabica</i>	16
Figura 2. Partes que conforman el grano de café..	17
Figura 3. Flujograma del beneficio húmedo y seco del café	22
Figura 4. Vertimiento de aguas mieles en el distrito de Soritor.....	25
Figura 5. Sistema agroforestal simple y estratificado con <i>Inga spp.</i>	31
Figura 6. Punto donde se tomó la muestra de agua residual	41
Figura 7. Flujograma del procedimiento general de la investigación	43
Figura 8. Materiales precursores.....	45
Figura 9. Gasificador	46
Figura 10. Porcentajes de reducción de DQO de los tratamientos.....	59
Figura 11. pH del agua tratada con cada tipo de biochar	61
Figura 12. Evaluación del biochar más efectivo	64
Figura 13. Isoterma de Freundlich del biochar derivado de la cáscara de pacay	66
Figura 14. Porcentajes de remoción de la DQO del agua residual.....	67
Figura 15. Valores del pH final del agua residual	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales especies de café	18
Tabla 2. Porcentaje en peso de subproductos del procesamiento de café	24
Tabla 3. Parámetros físico-químicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales del procesamiento del café a cuerpos de agua superficiales	27
Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del efluente del procesamiento del café junto con los límites permisibles de la OMS (1995) para la descarga del efluente tratado al canal de riego.....	28
Tabla 5. Características principales de la fisorción y quimisorción	32
Tabla 6. Tipos de pirólisis en función del tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento, temperatura y los productos obtenidos	35
Tabla 7. Punto de recolección del agua residual del procesamiento de café	41
Tabla 8. Diseño experimental.....	48
Tabla 9. Criterios para la formulación del bioadsorbente más efectivo.	52
Tabla 10. Características del agua residual del procesamiento del café	54
Tabla 11. Porcentaje de humedad promedio de los materiales precursores.....	55
Tabla 12. Porcentaje de rendimiento de biochar.....	56
Tabla 13. Resultados de conductividad eléctrica y pH en biochar obtenido	57
Tabla 14. Resultados de análisis elemental.....	57
Tabla 15. Relaciones molares del biochar	58
Tabla 16. Porcentajes de reducción de la DQO del agua residual del café.....	59
Tabla 17. Análisis de varianza de un factor para el porcentaje de remoción de DQO ..	60
Tabla 18. pH final del agua residual tratada.....	61

Tabla 19. Análisis de varianza de un factor para pH final del agua tratada	62
Tabla 20. Resultados generales obtenidos para cada análisis	63
Tabla 21. Dosis de BA1 para la determinación de las isotermas de adsorción.....	65
Tabla 22. Resultados promedios de capacidad de adsorción del BA1.....	65
Tabla 23. Constantes de Freundlich del BA1	67
Tabla 24. Medidas estadísticas del comportamiento del porcentaje de reducción de la Demanda Química de Oxígeno.....	68
Tabla 25. Análisis de varianza de un factor para la reducción de la DQO mediante las dosis estudiadas.....	68
Tabla 26. Medidas estadísticas del comportamiento del pH	69
Tabla 27. Análisis de varianza de un factor para pH final del agua tratada con las cinco dosis de BA1	70

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 11. 1. Fotografías de la toma de muestra del agua residual del café	97
Anexo 11. 2. Fotografías del proceso de obtención de biochar	99
Anexo 11. 3. Informes de análisis elemental.....	100
Anexo 11. 4. Fotografías del procedimiento de remoción de la DQO	102
Anexo 11. 5. Informes de ensayos de los resultados de la DQO.....	105
Anexo 11. 6. Comparaciones múltiples entre los tratamientos y su significancia en el porcentaje de la remoción de la DQO del agua residual del procesamiento del café.	116
Anexo 11. 7. Comparaciones múltiples entre los tratamientos B, BA1, BA2 y BA3 y su significancia en el pH final del agua residual del procesamiento del café.....	117
Anexo 11. 8. Resultados de capacidad de adsorción y pH final del agua residual del procesamiento de café	118
Anexo 11. 9. Informes de ensayos de la DQO después de la aplicación de las dosis estudiadas.....	120
Anexo 11. 10. Comparaciones múltiples entre las dosis D1, D21, D3, D4 y D5 y su significancia en el pH final del agua residual.....	135
Anexo 11. 11. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento desarrollado por Aqueous Solutions	136

RESUMEN

En el presente estudio se tuvo como objetivo evaluar la remoción de materia orgánica expresada como Demanda Química de Oxígeno (DQO) del agua residual del procesamiento del café o agua miel, mediante bioadsorbentes derivados de residuos agrícolas: cáscara de pacay, cáscara de arroz y cáscara de café. El agua residual y los residuos agrícolas fueron recolectadas de una finca ubicada en el distrito de Soritor, provincia de Moyobamba. Se caracterizó el agua residual y el biochar obtenido a partir de los residuos agrícolas. El diseño experimental estuvo constituido por 20 unidades experimentales: cuatro tratamientos (incluyendo un grupo control) por cinco repeticiones. Los experimentos fueron conducidos en agitadores de velocidad convencional y manteniendo una agitación de 400 PRM por 24 horas. Posteriormente se eligió al bioadsorbente más efectivo para determinar las constantes de adsorción de Freundlich. Los residuos agrícolas no requirieron una etapa previa de secado debido al bajo porcentaje de humedad. Asimismo, los resultados obtenidos indicaron que los residuos agrícolas fueron alterados termoquímicamente y son biochar estables. No obstante, solamente fue posible remover significativamente la DQO del agua residual mediante el biochar derivado de la cáscara de pacay. Con una dosis de 3,8 g de biochar de cáscara de pacay por cada 120 ml de agua residual se pudo obtener una reducción aproximada del 24% de la DQO con un pH final 6,4. El agua tratada cumple con los rangos y límites permisibles de la normativa ambiental colombiana para pH pero exceden el límite máximo permisible para DQO.

ABSTRACT

The objective of the study was to evaluate the removal of organic matter expressed as Chemical Oxygen Demand (COD) from wastewater from coffee processing, using different bioadsorbents derived from agricultural waste: pacay peel, rice husk and coffee peel. Wastewater and agricultural waste were collected from a coffee facility located in the district of Soritor, Moyobamba. The biochar obtained from agricultural waste and wastewater was characterized. The experimental design was constituted by 20 experimental units: 4 treatments (including a control group) for 5 repetitions. The experiments were conducted on conventional speed stirrers and maintaining a stirring of 400 PRM for 24 hours. Subsequently, the most effective bioadsorbent was chosen to determine Freundlich adsorption constants. Agricultural waste did not require a previous stage of drying due to the low percentage of humidity. Likewise, the results obtained indicated that agricultural residues were thermochemically altered and are stable biochar. However, it was only possible to remove the COD from the coffee wastewater using biochar derived from the pacay peel. An approximate of 24% reduction in COD with a final pH of 6,4 could be obtained with a dose of 3,8 g of pacay peel biochar per 120 ml of coffee wastewater. The water treated complies with the ranges and permissible limits of the Colombian environmental regulations for pH but exceeds the limit for COD.

Keywords: biochar; COD; adsorption; honey water; pacay.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial se conocen dos vías para producir café. La vía seca se caracteriza por emplear una fuente de energía (solar en la mayoría de los casos) con el objetivo de deshidratar el fruto para posteriormente retirar el grano de café. Por otra parte, la vía húmeda requiere de agua para poder separar la fruta del grano. Es preciso indicar que la vía húmeda es la más empleada por los productores debido a que no requiere de energía y es menos riesgosa en zonas tropicales (Orozco et al., 2005).

El proceso para producir café por medio de la vía húmeda es comúnmente conocido como beneficio húmedo del café. Este proceso implica el consumo de grandes cantidades de agua y en la mayoría de los casos sus aguas residuales son vertidas sin ningún tipo de tratamiento o cuentan con un tratamiento precario (Pineda, Reyes, & Oseguera, 2012).

Las aguas residuales del beneficio húmedo del café también son conocidas como “aguas mieles” y son el resultado de la mezcla del agua del lavado del café con el mucílago presente en el grano. Este efluente es extremadamente ácido y además presenta altas concentraciones de contaminantes orgánicos como pectinas, proteínas y azúcares (Desco, 2013).

Diversas investigaciones han demostrado que las aguas mieles generan un impacto ambiental significativamente negativo sobre los ecosistemas lóticos y lénticos. En ese sentido, se ha evidenciado la alteración en la calidad de agua, suelo y biodiversidad. Asimismo, se ha registrado la generación de malos olores así como la propagación de vectores que pueden comprometer la salud, economía, entre otras (López, 2012).

Ahora bien, el café se encuentra en el tercer lugar de los diez primeros productos del ranking agroexportador después de las uvas y mangos (Ministerio de Agricultura y Riego, 2018). Tal es así que la Organización Internacional del Café (2017) informó que el Perú ocupó el noveno lugar a nivel mundial con una producción de 228 000 toneladas; aumentando un 15% en relación al año 2015. A pesar de ello, en el Perú todavía no hay una regulación sectorial específica para los efluentes del procesamiento del café o aguas mieles, como si lo es en países vecinos productores de café como Colombia. Más aún - según la casuística revisada – tampoco se emplean medidas de acción para el tratamiento de las aguas mieles, salvo casos aislados de productores que han desarrollado pozos de disposición para las aguas mieles. Sin embargo, las aguas mieles que son retenidas en pozos tienen el riesgo de contaminar las aguas subterráneas (Molina, 2000).

En virtud a ello, la presente investigación evaluó la remoción de la carga orgánica en términos de la DQO del agua residual del procesamiento del café mediante bioadsorbentes derivados de residuos agrícolas.

Para llevar a cabo dicha evaluación, en una primera etapa se realizó la producción y caracterización de bioadsorbentes constituidos por tres (03) tipos de biochar que se elaboraron a partir de la cáscara de pacay, cascarilla de arroz y pergamino café. Posteriormente, se analizó la remoción de la DQO del agua residual mediante los diferentes biochar obtenidos.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Historia del café

No se tienen registros precisos que evidencien el origen exacto del café. No obstante, “una fábula oriental ubica el momento cero alrededor del año 800 en la antigua tierra de Abisinia, que hoy se conoce como Etiopía, un territorio montañoso del Cuerno de África” (Artusi, 2015).

Las primeras referencias sobre el cafeto en Europa, datan del siglo XVII. Venecia era el principal puerto marítimo de Europa, una próspera república independiente que funcionaba como umbral comerciante con China y las Indias. Por allí entró el café a Europa. Posteriormente, fue un 29 de diciembre de 1720 que el comerciante Floriano Francesconi abrió la primera cafetería del mundo con el nombre: el Café de la Venecia Triunfante, que poco después, se conoció como “lo de Florian” (Artusi, 2015).

Los venecianos importaban el grano de Constantinopla desde el año 1585 pero recién empezaron a venderlo al público en 1683 y pronto se convirtió en un placer, con la apertura del Florian y otras decenas de cafeterías (Burbano, 2014).

En este contexto, en el año 1714, para celebrar la firma del Tratado de Utrecht entre España, Francia, Inglaterra y Holanda que ponía punto final a la Guerra de Sucesión española, los holandeses le hicieron un regalo al rey francés Luis XIV, en señal de buena voluntad: una planta de café importada desde las remotas Indias Orientales. El rey Luis XIV - con el afán de que la plántula tuviera su propia conquista de América – ordenó a su súbdito Gabriel-Mathie Francois D´ceus de Clieu la difícil tarea de sembrar la plántula en América; una variedad de la especie *typica*. Tras un largo viaje, el cafeto

fue plantado por el propio Clieu en su jardín en las costas de Martinica en 1726 (Artusi, 2015).

Cinco años más tarde, en la isla había dos mil plantas similares. Cincuenta años más tarde, había 18 millones de plantas parecidas se repartían por el cinturón que rodea al Ecuador en Latinoamérica, la región que se convirtió en la principal productora de café gourmet en el planeta.

“Hoy se cree que el 90% de las plantas de café son herederas de aquella que no tuvo nombre, aunque haya sido universalmente reconocida como la niña adorada de un marino francés” (Artusi Nicolás, 2014, pp. 193-198).

En el ámbito nacional, a mediados del siglo XVIII el café empezó a ser producido en los departamentos de Junín, San Martín, Cajamarca, Huánuco y Cusco no solo para consumo local, sino también para exportar a países europeos como Alemania y Reino Unido (Infocafes, 2008).

2.2. Aspectos botánicos del café

La planta del café (Figura 1) pertenece a la familia botánica Rubiaceae. Dicha familia está constituida por 500 géneros y al menos 6 000 especies. La mayoría de los especímenes son árboles y arbustos tropicales. Otros especímenes de la familia son las gardenias y otras plantas caracterizadas por la producción de quinina. No obstante, desde una perspectiva económica, el género *Coffea* es el miembro más importante de la familia Rubiaceae (ICO, 2016).



Figura 1. *Coffea arabica*. Copyright 1940 por Experimental Pharmacology.

El fruto es a menudo llamado cerezo y se define como el fruto fresco completo del árbol que consta de una serie de capas que envuelven generalmente dos granos de café (Temis Perez, Lopez Malo, & Sosa Morales, 2011).

Como se muestra en la Figura 2, las partes que constituyen el fruto de café o cerezo son las siguientes:

- Pericarpio: cáscara o envoltura externa del fruto.
- Exocarpio: pulpa o tejido de la fruta por debajo del pericarpio.
- Mesocarpio o mucílago: sustancia viscosa y pegajosa que se encuentra adherida al endocarpio.
- Endocarpio: tejido duro y compacto que recubre a la semilla o grano del café individualmente.
- Cutícula: membrana delgada de color blanquecina adherida a la semilla o grano del café.
- Grano de café: semilla contenida en la fruta del café. Normalmente existe un par en cada fruta.



Figura 2. Partes que conforman el grano de café. Copyright 2013 de Producción de café (*Coffea arabica* L.): cultivo, beneficio, plagas y enfermedades.

2.3. Taxonomía del café

Si bien el género *Coffea* fue descrito por primera vez por Linneo a mediados de 1750, los científicos taxonómicos aún no han definido un sistema de clasificación exacto. Posiblemente alrededor de 25 especies principales, todas ellas nativas de África tropical y algunas de ellas provenientes de Madagascar u otras de las islas del Océano Índico (Burbano, 2014). La compleja labor de clasificar y catalogar una planta como miembro del género *Coffea* es debido a la numerosa variedad de plantas y semillas. Todas las especies de *Coffea* son productoras de lignina (leñosas), pero pueden ser desde simples arbustos hasta árboles de más de 10 metros de altura. Las hojas pueden ser amarillentas, verdes o inclusive matices del color púrpura y bronce.

Desde una perspectiva económica, las especies *Coffea arabica* (café Arábica) y *Coffea canephora* (café Robusta) son las más importantes. La especie *Coffea libérica* también es cultivada pero a menor escala. Cabe precisar que más del 60% de la producción mundial de café es atribuible a la especie *Coffea arabica* supone (ICO, 2016)

Tabla 1. Principales especies de café

Familia	Género	Especies	Variedades
Rubiaceae	Coffea	Arabica	Typica
		Canephora	Robusta
		Liberica	

Fuente: ICO. Copyright 2016.

a. *Coffea arabica*: café arábica

Esta variedad se puede encontrar en Sudamérica, India, Indonesia y en África Central y Oriental. Sin embargo, fue clasificado por primera vez por Linneo a mediados del siglo XVIII. Las variedades de café arábica más conocidas en términos comerciales son “Typica” y “Borbón”. Sin embargo, a partir de estas se han desarrollado muchas sub variedades como la Caturra, Nuevo Mundo, Tico, San Ramón, Jamaican Blue Mountain, entre otras. Con respecto a sus características botánicas, la especie se destaca por lo siguiente:

El café arábica es un arbusto grande con hojas ovaladas verde oscuro. Es genéticamente diferente de otras especies de café, puesto que tiene cuatro series de cromosomas en vez de dos. El fruto es ovalado y tarda en madurar de 7 a 9 meses. Contiene habitualmente dos semillas aplastadas (los granos de café); cuando sólo se desarrolla una semilla se llama grano caracol (ICO, 2016).

Con respecto a plagas y enfermedades, el café arábica frecuentemente vulnerable, por lo que la búsqueda de su resistencia es el principal objetivos de los programas de mejora vegetal (ICO, 2016).

b. *Coffea arabica*: café robusta

Esta variedad se encuentra en África Central y Occidental, en todo el Sudeste de Asia y en algunas partes de Brasil. El término “Robusta” no hace referencia a la especie, sino a una variedad de la misma que es ampliamente cultivada. Con respecto a sus características botánicas, la especie se destaca por ser un arbusto que puede pasar hasta los 10 metros de altura con raíces que tienen una raíz poco profundas. Su fruto – que tarda 11 meses en madurar – es de forma redondeada. Sus semillas son de forma alargadas, sin embargo son más pequeñas que la del *Coffea arabica*. El café Robusta se cultiva (ICO, 2016).

c. *Coffea liberica*: café libérica

El café Libérica se da en un árbol fuerte y de gran tamaño, de hasta 18 metros de altura, de hojas grandes y coriáceas. El fruto y la semilla (grano) son también grandes. El café Libérica se cultiva en Malasia y en África Occidental, pero sólo se comercializa en cantidades muy pequeñas, dado que la demanda de sus características de aroma y sabor es muy escasa (ICO, 2016).

2.4. Mejora vegetal

Coffea arabica es una especie tetraploide de tipo diclino dioica, es decir que el androceo y el gineceo se encuentran en la misma flor, de modo que se autopolinizan. Debido a esta característica, las variedades de *Coffea arabica* (Typica y Borbon) tienden a tener una genética estable. Sin embargo, “se han cultivado por su propio valor mutaciones espontáneas que mostraban características deseables, además de explotarse con fines de fertilización cruzada” (ICO, 2016). Entre algunas variedades mutantes se encuentra la variedad Caturra (Clifford & Willson, 1995).

2.5. El café en el Perú

Los cafés en el Perú de la especie *Coffea arábica* presentan distintos perfiles de sabor, aroma y acidez. Según el encuentro de Expocafe (2017), “las variedades que se cultivan en el Perú son: Typica (70%), Caturra (20%) y otras (10%), además el 90% del café peruano crece bajo sombra, principalmente de leguminosas como el árbol del pacay, a una densidad promedio de 2 000 plantas por hectárea”.

En el Perú, el principal producto de agroexportación es el café mangos (Ministerio de Agricultura y Riego, 2018). Además, según el último Censo Nacional Agropecuario del INEI (2012), se determinó que:

Un aproximado de 223 mil familias conducen 425 400 hectáreas de café, localizadas en 15 regiones, 95 provincias y 450 distritos. Sin embargo, solo 7 de ellas (Junín, San Martín, Cajamarca, Cusco, Amazonas, Huánuco y Pasco) concentran el 91% del total de productores y del área cultivable.

Asimismo, la mayoría de productores de café del país tienen dificultades para acceder a fuentes de financiamiento (Programa de Asistencia Técnica-USAID, 2002).

El rendimiento por hectárea en nivel nacional (media de 13 quintales) es inferior comparado con otros países productores de café. Sin embargo, “en algunas zonas cafetaleras que tienen un mejor nivel de desarrollo (como Jaén, Bagua, San Ignacio o Villa Rica, entre otras), los niveles de producción oscilan entre 30 y 80 quintales por hectárea” (Díaz Vargas & Willems, 2017).

2.6. Proceso productivo del café

El proceso productivo de café - también es conocido como beneficio del café - hace referencia al tratamiento del café cosechado hasta obtener granos secos y estables (Temis Perez et al., 2011).

Es decir, la transformación del fruto de la planta de café conocido comúnmente como cereza. Los frutos maduros de café pueden ser procesados por dos métodos distintos para obtener los granos: beneficio seco y húmedo (Pineda et al., 2012).

El beneficio seco es implementado para fermentar y secar el café al sol sobre una losa de cemento o plataforma. Por otro lado, el beneficio húmedo es el proceso mediante el cual la pulpa y el mucílago son separados del grano del café por medios mecánicos como despulperas. Posteriormente el grano es fermentado en depósitos con grandes volúmenes de agua por periodos comprendidos entre 12 a 36 horas y finalmente es sometido al proceso de lavado para remover los residuos que permanecen en el grano de café. De ese modo, el beneficio húmedo del café tiene como resultado una considerable cantidad de aguas residuales (Devi, Singh, & Kumar, 2008). En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo de los dos tipos de procesamiento del café o beneficio.

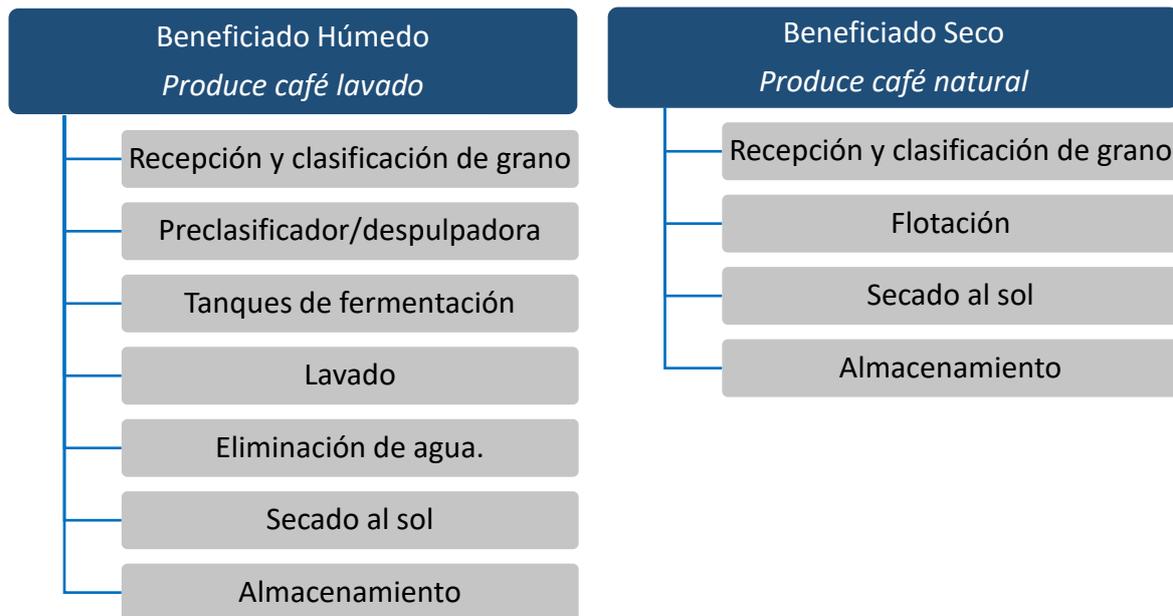


Figura 3. Flujograma del beneficio húmedo y seco del café. Adaptación de Temis (2011)

El beneficio húmedo del café surgió como una opción para solucionar el problema de la fermentación inmediata y excesiva del café en regiones donde hay mucha precipitación como lo es en las zonas tropicales (Orozco et al., 2005).

En cuanto al proceso de secado del beneficio húmedo, se tiene como objetivo que el grano alcance una humedad entre el 11 a 12 %. Posteriormente, se debe disponer en un lugar seco, ventilado y seguro para su almacenamiento. Dicho café es comúnmente conocido como café pergamino, dado que el grano está contenido en su cascarilla (Desco, 2013).

Cabe mencionar que existe un proceso semi-seco. Dicho proceso es una variación del proceso húmedo, en el que, a los frutos del café se les quita la pulpa, pero el proceso de fermentación se realiza directamente en la losa de cemento o plataforma (FAO, 2006).

Por otro lado, al igual que la variedad del café, los diferentes tipos de beneficio producen bebidas con gustos y aromas que el cliente puede elegir de acuerdo a sus preferencias. Los cafés de mejor calidad (y por lo general los más caros) son los de la especie arábica preparados por el proceso húmedo y se les conoce como cafés suaves por poseer un sabor fino, aromático y con cuerpo (Temis Perez et al., 2011).

a. Descascarillado

Según el Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé (1999), el descascarillado es el proceso de separación entre el pergamino y grano del café. Este proceso también es conocido como trillado. Dicho proceso tiene como objetivo separar el pergamino o envoltura que envuelve el grano mediante una trilladora. Este equipo cuenta con un tornillo alimentador de granos de café que los hace pasar por un espacio reducido, generando fricción y así ocasionando la remoción del pergamino. El producto de este proceso está listo para ser exportado o tostado para las industrias de café soluble. Este producto, sin pergamino, es comúnmente denominado café verde.

b. Subproductos del procesamiento de café

Como se detalla en la Tabla 2, los subproductos derivados del procesamiento del café son: la pulpa, cascarilla o pergamino, el mucílago y el grano. Asimismo, las aguas de despulpado, aguas del arrastre de la pulpa y del proceso de lavado.

Entre éstas, las aguas mieles son de singular importancia Según Galluser (2015) “contienen altas concentraciones de carga orgánica contaminante y pueden generar un impacto negativo al tener contacto con los recursos del medio ambiente debido al desecho indiscriminado sin previo tratamiento”.

Tabla 2. Porcentaje en peso de subproductos del procesamiento de café

Subproducto	Porcentaje en peso seco (%)
Pulpa	26 - 28
Cascarilla o pergamino	10 - 12
Mucílago	5 - 13
Grano	51 -55

Fuente: Adaptación de López, 2012.

c. Agua residual del procesamiento del café o agua miel

El agua utilizada para despulpar y lavar el grano después del proceso de fermentación son efluentes conocidos comúnmente como agua miel. Sus características fisicoquímicas son conferidas por la pulpa y el mucílago de café mediante el contacto turbulento en la etapa del lavado del café (Galluser, 2015).

Estudios realizados muestran que las aguas miel pueden tener una DQO en el orden de 7 000 a 12 000 mg/l con un pH de 3,8, a comparación del agua negra urbana que tiene generalmente entre 500 a 1 000 mg/l de DQO (Metcalf-Eddy, 1985).

El vertimiento de las aguas mieles sin ningún tratamiento genera el incremento significativo de la carga de DQO, sólidos totales, malos olores y pérdida de la calidad visual (Perez Díaz, Castillo Ramos, Carballo Abreu, & Veliz Gutierrez, 2014).

Las aguas mieles pueden ser particularmente nocivas si se descargan en cuerpos de agua debido al extremo grado de acidez y alta carga orgánica. Asimismo, si son retenidas en pozos tienen el riesgo de contaminar las aguas subterráneas (Molina, 2000).



Figura 4. Vertimiento de aguas mieles en el distrito de Soritor, provincia de Moyobamba, departamento de San Martín. Archivo personal.

En relación al impacto negativo sobre los componentes bióticos, las aguas miel ocasionan un impacto biológico en la mortalidad de los peces, los microcrustáceos y el crecimiento de las algas (Matuk Velasco, Puerta Quintero, & Rodríguez Valencia, 1997). Más aún, el efluente del procesamiento del café trae consigo problemas sociales; sobre todo cuando hay limitaciones del uso de los recursos hídricos con fines recreativos y de sustento familiar (Pérez Díaz et al., 2014).

Asimismo, se ha determinado que el agua miel tiene efectos fitotóxicos debido a que inhibe la germinación de semillas en el suelo. Además, se han observado alteraciones nucleares y cromosómicas en el ciclo celular de las células de la raíz de la *Lactuca sativa* (Aguar, Andrade-Vieira, & de Oliveira David, 2016).

De este modo, el vertimiento de las aguas residuales del procesamiento del café o aguas mieles, representan un impacto ambiental negativo significativo; dado que contamina los cuerpos de agua superficiales y subterráneas, además de afectaciones sobre la biodiversidad, calidad de los suelos, la salud humana, la calidad de vida de las personas, la economía, entre otras (López, 2012).

Una muestra del impacto ambiental del agua residual del procesamiento del café se puede evidenciar en la zona cafetalera de Tapachula, México. En este lugar las aguas del procesamiento húmedo para la extracción del fruto del café son consideradas como una de las fuentes de mayor contaminación orgánica (Orozco et al., 2005).

2.7. Marco normativo

Actualmente en el Perú existen los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Agua, los cuales fueron aprobados mediante el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM y modificados mediante el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Dicha norma categoriza los estándares de calidad ambiental de agua dividiéndolos en cuatro categorías: a) Categoría I: Poblacional y Recreacional, b) Categoría II: Actividades Marino Costeras, c) Categoría III: Riego de Vegetales y bebida de animales y d) Categoría IV: Conservación del Ambiente Acuático. Cada una de estas categorías tiene diferentes estándares de los parámetros en la calidad del agua. Es preciso señalar que el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) son fiscalizables en la medida que se demuestre causalidad respecto a los efluentes vertidos.

Asimismo, la normativa peruana regula los límites máximos permisibles para los efluentes de sectores como la industria de la harina de pescado, cemento, curtiembre,

papel, hidrocarburos y actividades minero metalúrgicas. Del mismo modo, la normativa ambiental vigente regula los límites máximos permisibles para los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales. Sin embargo, no existe una normativa ambiental que establezca los límites máximos permisibles para el sector agroindustrial en donde se enmarquen los parámetros para los efluentes provenientes del procesamiento del café.

En el ámbito internacional, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (2015), “estableció los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas a cuerpos de aguas superficiales de actividades productivas de agroindustria y ganadería” mediante la Resolución N° 631-2015. Esta normativa incluye las aguas residuales provenientes del procesamiento del café mediante el beneficio húmedo.

Tabla 3. Parámetros físico-químicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales del procesamiento del café a cuerpos de agua superficiales

Parámetro	Unidades	Procesamiento ecológico del café
pH	-	5 - 9
DQO	mg/l O ₂	3 000
DBO ₅	mg/l O ₂	-
SST	mg/l	800
SSED	mg/l	10
Grasas y aceites	mg/l	30

Fuente: Artículo 9° de la Resolución N° 631-2015-COLOMBIA

Por otra parte, la Organización Mundial para la Salud (OMS) estableció los límites máximos permisibles de vertimiento para irrigación en la horticultura. Como se muestra en la Tabla 4, las concentraciones de materia orgánica en los efluentes del procesamiento del café son muy elevadas comparadas con lo que prescribe la OMS.

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del efluente del procesamiento del café junto con los límites permisibles de la OMS (1995) para la descarga del efluente tratado al canal de riego

Parámetros	Características del efluente	Límites permisibles OMS
pH	4,5	6,8 – 8,5
Conductividad eléctrica (mho/cm)	$3,1 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}
Temperatura (°C)	25	20
Turbidez (NTU)	430	5 – 10
Sólidos totales (mg/l)	2 050	650
Sólidos totales suspendidos (mg/l)	700	200
Sólidos disueltos (mg/l)	1 350	450
DQO (mg/l)	22 000	300
DBO (mg/l)	12 000	100
MPN (células coliforme/100 ml)	1×10^9	$1,5 \times 10^7$

Fuente: Devi, 2008.

2.8. Demanda Química de Oxígeno – DQO

La Demanda Química de Oxígeno (DQO), como su nombre lo indica, es la cantidad necesaria de oxígeno para oxidar un componente orgánico o inorgánico. Sin embargo, los componentes orgánicos suelen ser de mayor interés en aguas residuales, debido a que es una medida indirecta del contenido de la materia orgánica. Generalmente el poder contaminante de un efluente se mide en DQO (Galluser, 2015). Ahora bien, la cantidad de oxígeno es determinada mediante el consumo de un oxidante en específico como el ión dicromato (CrO_7^{2-}). Dicho oxidante es reducido al ión crómico

(Cr + 3). Asimismo, la DQO es expresada como en mg/L. Usualmente, para acelerar la oxidación de determinados compuestos orgánicos, se emplea catalizadores como el sulfato de plata debido que algunos compuestos orgánicos obstaculizan el análisis (Pisarevsky, Polozova, & Hockridge, 2005).

Por otro lado, la DQO de un efluente tiende a ser mayor que la DBO debido al mayor número de compuestos que su oxidación es química es mayor que la oxidación biológica. Asimismo, la relación de DQO/DBO indica el grado de biodegradabilidad del efluente (Metcalf y Eddy, 1996, citados por Galluser, 2002).

2.9. Potencial de hidrógenos – pH

El potencial de hidrógenos (pH) hace referencia al grado de acidez o alcalinidad de una solución. La escala de pH es de tipo logarítmica y tiene un rango de 0 a 14. El agua en su estado natural tiene un pH neutro, es decir cercano a 7. Los valores debajo de 7 son considerados como ácidos y por encima de 7 son considerados como alcalinos. (Rigola, 1999 citado por Valerin, Carla 2002).

2.10. Residuos agrícolas

a. Cáscara de arroz

Según el Instituto Nacional de Innovación Agraria (2016), “en el Perú el arroz es el primer producto en área sembrada y cosechada, muy por encima del café, papa y maíz amarillo; con 380,000 hectáreas en promedio”. Tal es así que “se ha constituido como uno de los componentes esenciales de la canasta básica familiar de los peruanos”.

Además de su consumo doméstico, el arroz es un producto agrícola importante que tiene un valor de exportación extremadamente alto. En la fabricación de arroz,

la cáscara de arroz es el subproducto de la molienda de arroz. Hasta ahora, la cáscara de arroz se ha utilizado con éxito como combustible en muchas fábricas industriales y se utiliza como combustible de biomasa en la generación de electricidad debido a su baja humedad y funcionamiento simple (Sánchez, 2017).

b. Pacay

La sombra del árbol del pacay no solo regula el ingreso de la luz solar sobre los plántones de café. También influye en la floración y maduración del fruto, por consiguiente, la cosecha. De este modo, una sombra regulada y bien distribuida, mejora la producción, calidad y reduce la presencia de plagas y enfermedades (Desco, 2013).

En ese sentido, el café suele estar asociado con especies leguminosas de uso múltiple como las del género *Inga*. (Figura 5) debido al gran aporte de materia orgánica que generan y por la contribución de nitrógeno al suelo, así como el asocio con árboles maderables o frutales y la sombra permanente durante todo el ciclo reproductivo del café (Farfán Valencia, 2014).

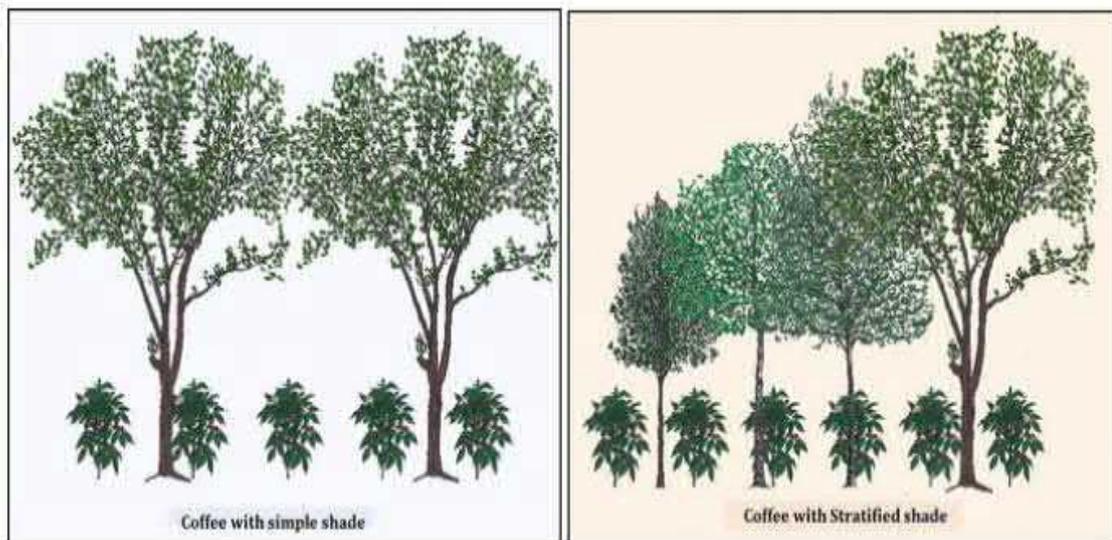


Figura 5. Sistema agroforestal simple y estratificado con *Inga* spp. Copyright 2013
Guía Técnica de Sistemas Agroforestales.

2.11. Adsorción

La adsorción es el mecanismo mediante el cual las moléculas se adhieren y concentran en la superficie de un sólido. Este mecanismo de adhesión se debe a las fuerzas de Van der Waals (adsorción física o fisorción). Asimismo, se puede dar por procesos químicos como la adsorción química o quimisorción. Si bien hay diferencias entre los dos tipos (adsorción física y química), hay circunstancias en la que resulta complejo definir un tipo de adsorción específica (Moreno Marengo, 2013). En la Tabla 5 se muestran las características principales de los procesos de fisorción y quimisorción.

Tabla 5. Características principales de la fisisorción y quimisorción

Fisisorción	Quimisorción
Interacción débil	Interacción más fuerte
No específico, no selectivo	Específica
Multicapa	Monocapa
$-\Delta H_{ads} \sim 4 - 40$ kJ/mol	$-\Delta H_{ads} \sim 4 - 800$ kJ/mol
No activado	Activado
Reversible	Irreversible (generalmente)

Fuente: Moreno, 2013

2.12. Isoterma de adsorción de Freundlich

De acuerdo con Rosas (2019), “el modelo matemático de Freundlich es una expresión de origen empírico que inicialmente se consideraba para un mecanismo de adsorción análogo al asumido para Langmuir”. No obstante, se ha determinado que la isoterma de Freundlich se adapta mejor a mecanismos de adsorción de tipo físico en circunstancias más complejas y con adsorbentes (Rosas, 2019). Este modelo asume los siguientes supuestos:

- No hay adsorción química y no hay interacción entre las moléculas.
- Modelo matemático descrito como una relación exponencial:

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}}$$

En donde q_e es la cantidad de adsorbato adherido al adsorbente en el equilibrio (mg/g), K_F es la constante de Freundlich relacionada con la capacidad de adsorción (mg/g) (l/mg)^{1/n}, n es la constante de Freundlich relacionada con la intensidad de la adsorción y C_e es la concentración en el equilibrio o concentración final. La pendiente y la intersección de la ecuación linealizada determinan el valor de las constantes.

$$\ln q_e = \ln K_F + \left(\frac{1}{n}\right) \ln C_e$$

De acuerdo con Annadurai (2008), “la magnitud de n es un indicativo de favorabilidad y capacidad del sistema adsorbato/adsorbente, donde $n > 1$ representa condiciones favorables de adsorción. En la mayoría de casos un valor entre $1 < n < 10$, muestra una adsorción favorable”.

2.13. Bioadsorción

La bioadsorción es el mecanismo de adsorción de componentes orgánicos o inorgánicos hacia a un sólido de origen biológico (biomasa) ya sea vivo o muerto. El mecanismo de bioadsorción es llevado a cabo por intercambios iónicos o interacciones electrostáticas (Pinzón-Bedoya & Villamizar, 2009). Ahora bien la bioadsorción es comúnmente utilizada para la captación de contaminantes en medios acuosos (Aksu, 2005).

En la bioadsorción, la biomasa cumple con la función de adsorbente en una solución (solvente) que contiene partículas disueltas (adsorbatos) que serán adheridas y retenidas en la biomasa por medio de diferentes mecanismos. Para ello, es necesaria la afinidad de la biomasa por los adsorbatos. Este proceso continúa hasta que se llega a un equilibrio entre el adsorbato disuelto y el adsorbato enlazado a la biomasa (Cañizares-Villanueva, 2000).

Desde hace 65 años se iniciaron los ensayos de bioadsorción. No obstante, por razones económicas y ambientales, recién desde hace 20 años los estudios se han enfocado en la aplicación de la bioadsorción para el tratamiento de aguas residuales utilizando materiales bioadsorbentes de bajo costo (Pinzón-Bedoya & Villamizar, 2009). Cabe precisar que los bioadsorbentes también pueden ser selectivos para contaminantes en específico (Moreno Marengo, 2013).

La aplicación de la bioadsorción sugiere que el material precursor debe cumplir lo siguiente:

- Material con alta disponibilidad y sin uso (residuos)
- Fácil de obtener y procesar.
- Económico.

Según la literatura revisada, hay diversos materiales precursores de origen biológico para la generación de bioadsorbentes. Entre ellos se han propuesto desde organismos microscópicos como bacterias, hongos, algas; así como organismos macroscópicos como restos vegetales y residuos de crustáceos. Dichos precursores son destacables porque son abundantes, de bajo costo y tienen el potencial de ser bioadsorbentes debido a que presentan grupos químicos activos en sus estructuras (Rafatullah, Sulaiman, Hashim, & Ahmad, 2010).

Cabe recalcar que el material bioadsorbente puede ser diferente dependiendo de la especie, la textura, el periodo estival y la zona geográfica (Pinzón-Bedoya & Villamizar, 2009).

a. Proceso de obtención

El proceso de obtención consiste en una conversión termoquímica denominada pirólisis (Ospina Guarín, Buitrago Sierra, & López, 2014). Dicho proceso químico consiste en transformar el material precursor en un carbón, pero en ausencia de oxígeno. El producto tiene una estructura cristalina reticular similar a la del grafito; asimismo es altamente poroso con áreas superficiales en del orden de $1\ 500\ \text{m}^2/\text{g}$ de carbón. Los átomos de carbón ubicados en la superficie son los responsables de la bioadsorción. (Universidad Politécnica de Sevilla, 2002).

Ahora bien, existen diversos tipos de pirólisis en función a la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia de la biomasa o precursor en el reactor. En la siguiente tabla se detalla los tipos de pirólisis en función de los parámetros mencionados.

Tabla 6. Tipos de pirólisis en función del tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento, temperatura y los productos obtenidos

Proceso	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento	Temperatura (°C)	Productos
Carbonización	Días	Muy lenta	400	Biochar
Pirólisis lenta	5 – 60 min	Lenta	450 – 550	Gas, líquido y biochar
Rápida	0,5 – 5 seg	Muy rápida	650	Bioaceites
Flash	< 1 seg	Rápida	< 650	Bioaceites y gas
Ultrarrápida	< 0,5 seg	Muy rápida	1 000	Químicos y gas
Hidropirólisis	< 10 seg	Rápida	<500	Bioaceites
Metanopirólisis	< 10 seg	Rápida	> 700	Químicos

Fuente: Martínez 2017.

El proceso de activación consiste en multiplicar el área superficial creando una estructura más porosa (Navarrete, Quijano, & Vélez, 2014). Es preciso mencionar que el área superficial de cada carbón varía en función de la materia prima, del proceso de activación y del agente activador (Solís, Morales Téllez, Ayala Tirado, & Durán de Bazúa, 2012).

La activación del material carbonizado consiste en el desarrollo de la estructura porosa antes generada, mediante la adición de agentes oxidantes. La activación a partir de biomasa, puede llevarse a cabo tanto por dos métodos: activación física y activación química (Universidad Sevilla, 2011).

En cuanto a la elección del precursor para la elaboración de carbón es pertinente considerar el proceso de fabricación y su posible aplicación. Del mismo modo, es fundamental considerar su disponibilidad, precio y pureza (Rodríguez et al., 2009).

Si bien puede producirse carbón a partir de carbón mineral o coque de petróleo; se tiene especial interés sobre los residuos de biomasa, puesto que es materia prima de bajo costo, además su tratamiento es amigable con el medio ambiente (Ospina Guarín et al., 2014).

En tal sentido, los materiales lignocelulósicos han sido utilizados ampliamente para la elaboración de bioadsorbentes ya que presentan una adecuada capacidad de adsorción. Entre estos se pueden mencionar las cáscaras de diversas frutas, la fibra de coco, la corteza de plátano, la cáscara de arroz, así como también el bambú y aserrín de maderas, el bagazo de la caña de azúcar, entre otros muchos materiales de origen biológico (Solís et al., 2012)

2.14. Biochar

El biochar es un material sólido obtenido por la conversión termoquímica de biomasa en un ambiente limitado de oxígeno. Es decir que el biochar se obtiene mediante pirólisis (ver Tabla 6). El biochar tiene diversas aplicaciones como agente de mejora en calidad de suelos, así como el incremento en la eficiencia de recursos, remediación y/o protección contra una contaminación ambiental en particular y también es un método de mitigación de gases de efecto invernadero. Más aun, es un material estable, altamente poroso y con altos porcentajes de carbón. Estas propiedades le confieren además una gran área superficial. En ese sentido, el biochar es ampliamente utilizado para mejorar la fertilidad del suelo y descontaminar los suelos alterados. Por otro lado,

su gran área superficial le permite contaminantes orgánicos (principalmente metales) e inorgánicos en el agua (Tang, Lv, Gong, & Huang, 2015).

El biochar es un tipo de bioadsorbente que se está posicionando como un producto de bajo costo que se puede aplicar para remover los contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua. En ese sentido, el biochar puede ser aplicado como medio filtrante para el tratamiento de aguas (Martínez Villalba & Bohórquez León, 2017).

Según la Iniciativa Internacional de Biochar (IBI por sus siglas en inglés), la relación molar de H:C es un indicador recomendado para distinguir la producción de biochar de otros procesos termoquímicos de materia orgánica alterada (IBI, 2015).

III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1. Objetivo general

Evaluar la remoción de materia orgánica expresada como Demanda Química de Oxígeno del agua residual del procesamiento del café mediante distintos bioadsorbentes derivados de residuos agrícolas.

3.2. Objetivos específicos

- Determinar la concentración de materia orgánica en el agua residual del procesamiento del café en términos de Demanda Química de Oxígeno.
- Caracterizar el biochar obtenido a partir de las cáscaras de pacay, arroz y café.
- Analizar la remoción de la Demanda Química de Oxígeno del agua residual mediante los diferentes biochar obtenidos.
- Realizar pruebas de adsorción con distintas dosis del bioadsorbente formulado más efectivo.

3.3. Hipótesis general

Ha: Es posible remover significativamente la DQO del agua residual del procesamiento del café mediante bioadsorbentes derivados de residuos agrícolas.

Ho: No es posible remover significativamente la DQO del agua residual del procesamiento del café mediante bioadsorbentes derivados de residuos agrícolas.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales

Los instrumentos y materiales empleados para la recolección del agua residual del procesamiento del café o agua miel fueron los siguientes:

- 01 cooler de 8 galones de capacidad.
- 01 cadena de custodia.
- 01 potenciómetro portátil.
- 01 congeladora.
- 17 gel packs.
- 100 frascos de PVC de 10 ml.

Los instrumentos y materiales utilizados para la elaboración de biochar fueron los siguientes:

- 01 balanza.
- 01 par de guantes térmicos.
- 01 equipo gasificador con controlador automático.
- 01 kg de cáscara de pacay.
- 01 kg de cáscara de arroz.
- 02 kg de cáscara de café.
- 03 balones de gas GLP.

Los instrumentos y materiales utilizados en el laboratorio fueron los siguientes:

- 6 560 ml de agua residual del procesamiento del café.
- 250 g de biochar de cáscara de arroz.

- 250 g de biochar de cáscara de café.
- 250 g de biochar de cáscara de pacay.
- 01 balanza analítica.
- 01 caja de guantes quirúrgicos.
- 01 mortero grande.
- 01 tamiz N° 6 (3.35 mm).
- 01 tamiz N° 10 (2.00 mm).
- 01 tamiz N° 18 (1.00 mm).
- 01 potenciómetro portátil.
- 01 equipo multiparámetro de mesa marca Hach, modelo HQ44D.
- 08 pipetas de 20 ml.
- 01 espátula.
- 08 planchas de calentamiento con agitador magnético.
- 32 beakers de 250 ml de capacidad.
- 16 embudos de vidrio.
- 06 beakers de 1,000 ml.
- 01 pizeta de agua destilada.
- 01 fiola de 100 ml.
- 01 caja de papel filtro Whatman N° 40.
- 05 preservantes de ácido sulfúrico 1:1.
- 01 refrigerador.
- 01 estufa.
- 01 mufla.
- 01 conductímetro de mesa.

4.2. Métodos

El agua residual del procesamiento del café y los residuos agrícolas (cáscaras de café, pacay y arroz) fueron recolectados de la finca de Walter Gutiérrez, ubicada a las afueras del distrito de Soritor, provincia de Moyobamba, Departamento de San Martín (Figura 6). En la siguiente tabla se indican las coordenadas del punto donde se recolectó el agua residual del procesamiento del café para su análisis.

Tabla 7. Punto de recolección del agua residual del procesamiento de café

Este	Norte	Zona	Datum	Altitud
267417	9318606	18 M	WGS84	943

Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. Punto donde se tomó la muestra de agua residual del procesamiento de café.

Archivo personal.

Es pertinente señalar que la finca seleccionada para el presente estudio, no utiliza productos sintéticos (pesticidas, herbicidas y fertilizantes artificiales). Asimismo, se encuentra asociada a la ONG Solidaridad Network; la cual brinda soporte técnico a los agricultores para implementar prácticas sostenibles en la producción.

Con respecto a las muestras obtenidas de la finca, cabe precisar que la cáscara de café y el agua residual del café procedieron únicamente de la especie *Coffea arabica*, de la variedad *Typica*. Asimismo, la cáscaras de pacay y arroz fueron procedentes de las especies *Inga edulis* y *Oryza Sativa*, respectivamente.

Cabe precisar que la presente investigación es de tipo longitudinal debido a que compara datos obtenidos (pH y DQO) en diferentes momentos (antes y después) de una misma sustancia (agua miel) con el objetivo de evaluar cambios atribuibles al biochar. Asimismo, es de tipo experimental debido a que analiza el efecto producido por la acción o manipulación de una o más variables independientes (tipo y dosis de biochar) sobre una variable dependiente (calidad de las aguas residuales del café tratadas).

Ahora bien, la investigación se realizó mediante la integración de diez metodologías. En el siguiente diagrama (Figura 7) se describe el procedimiento general que se desarrolló para la elaboración y evaluación de bioadsorbentes derivados de residuos agrícolas en la remoción de la DQO del agua residual del procesamiento del café.

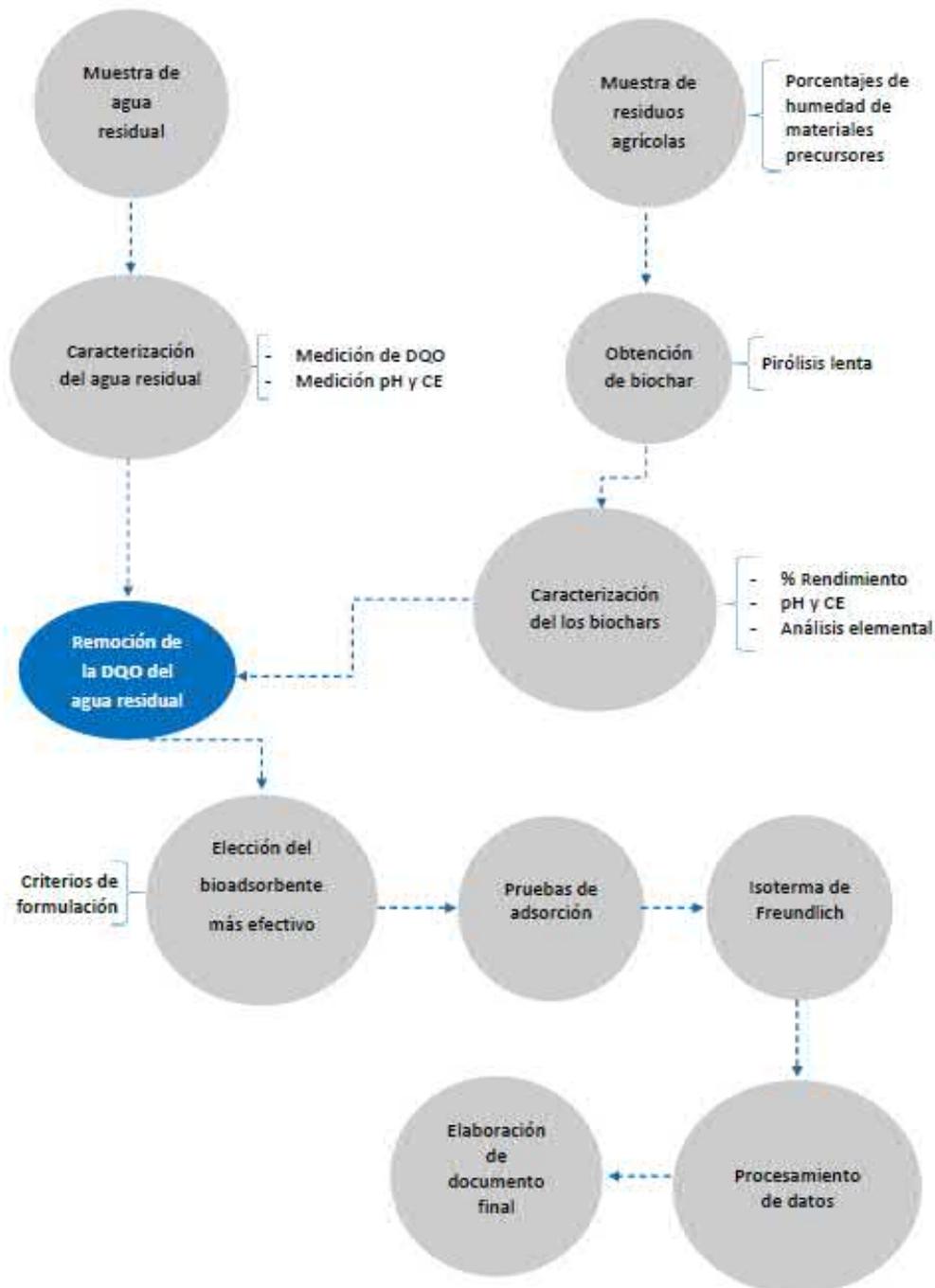


Figura 7. Flujograma del procedimiento general de la investigación. Elaboración propia.

a. Toma de muestra y almacenamiento del agua residual

El volumen de agua residual necesario (6,5 litros) para desarrollar la investigación fue recolectado de una finca cafetalera ubicada en el distrito de Soritor, provincia de Moyobamba, departamento de San Martín. La toma de muestra se realizó

siguiendo los requisitos para toma de muestras de agua y preservación del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales aprobado por la Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA. En ese sentido, la muestra de 6.5 litros fue almacenada a 4°C para evitar algún cambio en las características fisicoquímicas del efluente. Asimismo, antes de su respectivo análisis químico (DQO) y después de ser sometidas a los distintos tratamientos, las muestras de agua residual se preservaron adicionando 0,5 ml de ácido sulfúrico por cada 100 ml de agua residual (APHA, 1992).

b. Medición del pH y conductividad eléctrica del agua residual

La medición de pH y conductividad eléctrica del agua residual del procesamiento del café se determinó antes y después de cada tratamiento. Se utilizó el equipo multiparámetro de mesa marca Hach, modelo HQ44D. Las mediciones fueron llevadas a cabo siguiendo el procedimiento del manual de uso del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur:

- Conectar la sonda de pH y conductividad eléctrica.
- Conectar el equipo al suministro de energía. Encender el equipo.
- Sumergir la sonda en la muestra: en caso del electrodo de pH, cuidar que no toque el fondo del recipiente que contiene la muestra. En el caso de la sonda de conductividad eléctrica, esta deberá sumergirse un mínimo de 2.5 cm para obtener una lectura confiable.

c. Medición de la DQO

Cada muestra de agua tratada y preservada fue recolectada en un frasco de PVC 100 ml de boca ancha. Posteriormente, los frascos fueron llevados al laboratorio

SGS del Perú. Cabe precisar que dicho laboratorio se encuentra acreditado por INACAL. El método analítico que aplica el mencionado laboratorio sigue lo dispuesto en la Parte 52220-D (método colorimétrico) de los *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater del American Public Health Association, American Water Works Association* y el *Water Environmental Federation*.

d. Porcentaje de humedad de materiales precursores

El porcentaje de humedad de las cáscaras de pacay, arroz y café fue determinado de forma gravimétrica. Se procedió a pesar 4 g de cada material precursor en un crisol que fue previamente secado en la estufa a 110 °C durante 60 minutos. Posteriormente, los materiales precursores fueron secados en una estufa a 110 °C durante 24 horas. Finalmente se procedió a tomar el peso final del crisol. La metodología se realizó por triplicado, según el lineamiento ASM C566 (ASTM International, 2018). En la siguiente figura se muestran los tres materiales precursores antes de realizar el análisis gravimétrico.



Figura 8. Materiales precursores. Archivo personal.

e. Obtención de biochar

La obtención del biochar se llevó a cabo mediante reacciones de pirolisis del tipo lenta, a una temperatura de 425 °C, a un ratio de calentamiento de aproximadamente 10 °C por minuto, a presión atmosférica y con un tiempo de residencia de 60 minutos (Mohan, Sarswat, Ok, & Pittman, 2014). La reacción de pirolisis se llevó a cabo en un gasificador horizontal (Figura 9) perteneciente a la Universidad Nacional Agraria La Molina.



Figura 9. Gasificador en donde se llevó a cabo las reacciones de pirolisis para la obtención de biochar. Archivo personal.

f. Porcentaje de rendimiento de los materiales precursores

Para la obtención de biochar se tuvo en cuenta la cantidad de material necesario para los distintos análisis. Por cada materia prima evaluada (cáscara de pacay, café y arroz) fue necesario 12 gramos de biochar para el análisis de pH y conductividad eléctrica, 100 gramos para el análisis elemental, 29 gramos para la evaluación de la remoción de la DQO del agua residual del procesamiento del café y para las

isotermas de adsorción se estimó alrededor de 155 gramos; por lo que se aproximó a un total de 300 gramos de biochar de pacay, café y arroz.

Para determinar la cantidad de biochar producido por cada tipo de material precursor se tomaron datos del peso inicial del saco vacío (W_i), la cantidad de material precursor agregado (B) y el peso final del saco con biochar (W_f). Una vez registrados estos datos se calculó el total de gramos producidos de la siguiente manera (Martínez Villalba & Bohórquez León, 2017):

$$\text{Biochar producido (g)} = W_f - W_i$$

Además, se calculó para cada proceso el porcentaje de rendimiento siguiendo la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{Biochar producido}}{B} \times 100$$

g. Medición del pH y conductividad eléctrica del biochar obtenido

Para medir el pH y conductividad eléctrica del biochar obtenido, se consideró el procedimiento establecido por la Iniciativa Internacional de Biochar. De este modo, se aplicó la relación de 1 g de biochar en 20 ml de agua destilada. Posterior a la homogenización de la solución se procedió a medir el pH y conductividad eléctrica con el equipo multiparámetro del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Ambiental (IBI, 2015).

h. Análisis elemental del biochar obtenido

El análisis elemental fue llevado a cabo con el objetivo de determinar las proporciones de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno de cada biochar obtenido. Este análisis se realizó por triplicado con las muestras en base seca.

Fueron secadas en estufa durante 24 horas a 105 °C. El análisis elemental fue llevado a cabo por el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional La Molina siguiendo la norma ASTM D4239.

i. Análisis de la remoción de la DQO

El análisis de la influencia de los distintos tipos de biochar en la remoción de la Demanda Química de Oxígeno del agua residual del procesamiento del café se llevó a cabo mediante la integración de tres metodologías (Dalahmeh & SLU, 2016; Devi et al., 2008; Huggins, Haeger, & Biffinger, 2016).

En primera instancia, el diseño experimental llevado a cabo para estudiar la influencia de los distintos tratamientos en la remoción de la DQO fue constituido por 20 unidades experimentales: 4 tratamientos (incluyendo un grupo control) por 5 repeticiones. En la siguiente tabla se detalla el diseño experimental con sus respectivas unidades experimentales en donde B es el tratamiento control (agua residual sin la aplicación de biochar) y BA1, BA2 y BA3 son los tratamientos con biochar de pacay, arroz y café respectivamente.

Tabla 8. Diseño experimental

Tratamientos	Repeticiones				
	R1	R2	R3	R4	R5
B	B-R1	B-R2	B-R3	B-R4	B-R5
BA1	BA1-R1	BA1-R2	BA1-R3	BA1-R4	BA1-R5
BA2	BA2-R1	BA2-R2	BA2-R3	BA2-R4	BA2-R5
BA3	BA3-R1	BA3-R2	BA3-R3	BA3-R4	BA3-R5

Fuente: Elaboración propia.

Para cada unidad experimental (excepto a los del grupo control) se consideró la dosis optima determinada por Devi (2008). Se aplicó una dosis de 4,8 gramos de biochar por cada 120 ml de agua residual. Asimismo, siguiendo lo establecido por Dalahmeh (2016), se trabajó con un tamaño de partícula de 0,7 a 5,0 mm de diámetro. Para ello se utilizaron los tamices N° 6, N° 10 y N° 18. Todos los tratamientos y sus respectivas repeticiones se realizaron a temperatura ambiente (25 °C) y fueron conducidos en matraces de 250 ml de capacidad utilizando un agitador de velocidad convencional; manteniendo una agitación de 400 PRM por 24 horas según lo descrito por Huggins (2016).

Cabe precisar que - para efectos de verificar la influencia netamente de los distintos tipos de biochar sobre el agua residual del café - se optó por incluir un tratamiento control. Dicho tratamiento mantuvo las mismas condiciones que los experimentos (agua residual del procesamiento del café a 400 RPM por 24 horas a temperatura ambiente) pero sin la adición de biochar.

Luego de cada tratamiento haya sido sometido al agua residual a 400 RPM por 24 horas a temperatura ambiente, las muestras de agua tratada fueron recolectadas en frascos de PVC de 100 ml de boca ancha y preservadas según lo descrito en el literal c. Posteriormente las muestras fueron llevadas al laboratorio acreditado SGS del Perú para el análisis de la DQO. El método analítico que aplicó el mencionado laboratorio sigue lo dispuesto en la Parte 52220-D (método colorimétrico) de los *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater del American Public Health Association, American Water Works Association* y el *Water Environmental Federation*.

El porcentaje de remoción de la DQO fue calculado para cada unidad experimental acorde la siguiente ecuación (Moreno Marengo, 2013):

$$\%Remoción = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100$$

En donde:

- *% Remoción* es el porcentaje de remoción de la DQO (%).
- C_0 es la concentración inicial del soluto en la solución (mg/l).
- C_e es la concentración en el equilibrio o concentración final (mg/l).

De este modo, se obtuvieron distintas medias de porcentaje de remoción para cada unidad experimental. En primera instancia se evaluó la distribución normal de los datos obtenidos. Para ello se realizó la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov. En caso de que la significancia de la prueba (para todos los grupos) haya sido menor a 0,05 se procedió a normalizar los datos con el siguiente artificio (Moreno Marengo, 2013):

$$\%Remoción = \ln(\%Remoción + 1)$$

En donde *% Remoción* es el porcentaje de remoción de la DQO.

Posteriormente, se analizaron los datos para determinar la media y desviación estándar para cada grupo o tratamiento. Se aplicó un análisis de varianza de una sola vía (ANOVA) para comparar la remoción media de la DQO del agua residual del café entre los tres tratamientos y el grupo control. Las pruebas post-hoc (prueba de diferencia significativa honesta de Tukey) se llevaron a cabo para determinar si existen diferencias significativas de remoción media entre los

tratamientos. De este modo se pudo identificar el tratamiento con mayor capacidad de remoción de la DQO.

Es pertinente indicar que se midió el pH del agua residual antes y después en cada unidad experimental antes y después de cada tratamiento con biochar. Dicha medición se llevó a cabo con el multiparámetro de mesa marca Hach, modelo HQ44D, siguiendo la metodología descrita en el literal b.

j. Formulación del bioadsorbente más efectivo

Para determinar las proporciones óptimas de biochar que constituyan al bioadsorbente más efectivo, se optó como criterio principal el porcentaje de remoción de la Demanda Química de Oxígeno del agua residual del procesamiento del café. Sin embargo, también se consideraron otros criterios secundarios con el objetivo de formular un bioadsorbente que esté constituido con las mejores características de cada tipo de biochar.

De este modo, se consideró la capacidad de remoción de la DQO y neutralización del agua residual de cada biochar obtenido, así como su contenido de carbono, pH y conductividad eléctrica. Asimismo, se tomó en cuenta el porcentaje de humedad y rendimiento de cada residuo agroindustrial o material precursor. En la siguiente tabla se señalan los criterios mencionados con sus respectivos valores asignados.

Tabla 9. Criterios para la formulación del bioadsorbente más efectivo.

N	Criterios	Valor
1	Porcentaje de remoción de DQO	50 %
2	pH final del agua residual tratada	10 %
3	Porcentaje de humedad del precursor	8 %
4	Porcentaje de rendimiento del precursor	8 %
5	pH del biochar	6 %
6	Conductividad eléctrica del biochar	6 %
7	Porcentaje de carbón del biochar	6 %
8	Relación H:C del biochar	6 %

Fuente: Elaboración propia.

k. Pruebas cinéticas de adsorción

Luego de haber formulado el bioadsorbente más efectivo en términos de porcentaje de remoción y los criterios descritos en la sección anterior (ver Tabla 9); se realizaron pruebas cinéticas de adsorción para determinar las isothermas correspondientes a la remoción de la DQO del agua miel o agua residual del procesamiento del café.

Para ello se trató 120 ml de agua residual con diferentes dosis de bioadsorbente en el intervalo de 1,8 a 10,8 g. Las otras condiciones de operación fueron: tiempo de tratamiento de 24 horas, velocidad de agitación de 400 RPM y tamaño de partícula bioadsorbente entre 0,7 y 5,0 mm (Dalahmeh & SLU, 2016; Devi et al., 2008; Huggins et al., 2016).

Posteriormente, las isothermas determinadas fueron evaluadas respecto a la isoterma de adsorción de Freundlich (Solís et al., 2012). Para ello, el equilibrio del proceso de adsorción fue analizado mediante la ecuación de Freundlich:

$$q_e = K_F C_e^{1/n}$$

En donde q_e es la cantidad de adsorbato adherido al bioadsorbente en el equilibrio (mg/g), K_F es la constante de Freundlich, la cual hace referencia a la capacidad de adsorción del adsorbente en ml/g, C_e indica la concentración del soluto en el equilibrio en mg/ml y n es una constante adimensional que está relacionada a la intensidad de la adsorción. La cuantificación de la cantidad adsorbida q_e se determinó aplicando la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{W}$$

En donde q_e es la cantidad de adsorbato adherido al bioadsorbente en el equilibrio (mg/g), C_o es la concentración inicial del soluto en la solución (mg/l), C_e es la concentración del soluto en el equilibrio (mg/l), V indica el volumen de la solución de adsorbato usada expresada en litros y W representa la masa de adsorbente adicionada en gramos.

Finalmente, la ecuación fue linearizada para calcular el valor de las constantes de Freundlich; donde la pendiente y el intercepto representan los valores de intensidad de la adsorción (n) y la capacidad de adsorción (K_F), respectivamente (Devi et al., 2008; Moreno Marengo, 2013; Solís et al., 2012)

V. RESULTADOS

5.1. Agua residual del procesamiento del café

El volumen de agua residual necesaria para desarrollar la investigación fue obtenido de una finca cafetalera de beneficio húmedo ubicada en el distrito de Soritor, provincia de Moyobamba, departamento de San Martín (Ver Tabla 7). En el Anexo 11.1 se adjunta las fotografías del procedimiento de toma de muestra del agua residual del procesamiento del café en campo.

Los parámetros de pH y conductividad eléctrica fueron tomados en campo. Asimismo – como medida de línea base - se tomó una muestra para determinar la DQO inicial. Los resultados de los análisis fisicoquímicos del agua residual del procesamiento del café (Tabla 10) revelaron un pH ácido, una alta carga orgánica y una baja conductividad eléctrica.

Tabla 10. Características del agua residual del procesamiento del café

Parámetros	Unidad	Resultado
Temperatura	°C	21,2
pH	-	4,1
Conductividad Eléctrica	μS/cm	300
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	17 225

Fuente: Elaboración propia

5.2. Porcentaje de humedad de los materiales precursores

El porcentaje de humedad de los residuos agrícolas o materiales precursores (cáscara de pacay, arroz y café), se presentan en la Tabla 11. Se puede observar que el resultado promedio para todos los precursores es menor al 10% de humedad; siendo

la cáscara de café con mayor contenido de humedad (9,91%), seguido de la cáscara de pacay (9,76%) y finalmente la cáscara de arroz (9,58%).

Tabla 11. Porcentaje de humedad promedio de los materiales precursores

Material precursor	Porcentaje de humedad
Cáscara de pacay	9,76%
Cáscara de arroz	9,58%
Cáscara de café	9,91%

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar el análisis de varianza unifactorial (ANOVA), no se encontró diferencias significativas entre los materiales precursores con el porcentaje de humedad ($F: 1; p = 0,300$), por lo que no se vio la necesidad de realizar una prueba de comparación múltiple de medias con el criterio de Tukey.

5.3. Caracterización del biochar obtenido

Como se describió en el literal e. de la sección 4.2, la obtención de biochar de los materiales precursores se pirolizaron en un gasificador horizontal a una temperatura de 425 °C, a una razón de calentamiento de aproximadamente 10 °C por minuto, a presión atmosférica y con un tiempo de residencia de 60 minutos. En el Anexo 11.2 se adjuntan las fotografías del procedimiento de obtención de biochar derivado de los materiales precursores.

a. Porcentaje de rendimiento de biochar

El porcentaje de rendimiento para cada precursor se presenta en la Tabla 12. Se puede observar que la cáscara de arroz obtuvo un mayor rendimiento de biochar

(40,31%), seguido de la cáscara de pacay (34,32%) y finalmente la cáscara de arroz (32,58%).

Tabla 12. Porcentaje de rendimiento de biochar

Material precursor	Código de biochar	Peso seco (g)	Peso pirolizado (g)	Porcentaje de rendimiento (%)
Cáscara de pacay	BA1	2 695	925	34,32%
Cáscara de arroz	BA2	11 785	4 750	40,31%
Cáscara de café	BA3	16 820	5 480	32,58%

Fuente: Elaboración propia.

Cabe precisar que todos los tipos de biochar obtenidos a partir de los materiales precursores fueron elaborados con mis mismos parámetros operacionales descritos en la sección 5.2.2.5; mediante pirolisis tipo lenta, a una temperatura de 425 °C, con un ratio de calentamiento de aproximadamente 10 °C/min, a presión atmosférica y con un tiempo de residencia de 60 minutos.

b. Conductividad eléctrica y pH del biochar obtenido

Los resultados de conductividad eléctrica y pH se muestran en la Tabla 13. El análisis de varianza unifactorial (ANOVA) indica que la conductividad eléctrica presenta diferencias entre los distintos tipos de biochar (F: 9349,758; $p < 0,01$). En ese sentido, los valores de conductividad eléctrica indican que el biochar derivado de la cáscara del pacay (BA1) es significativamente mayor entre los tres tipos de biochar.

Por otro lado - respecto a los valores obtenidos de pH - no se encontraron diferencias significativas entre los valores del biochar BA1 y BA2 ($p > 0,05$). Sin

embargo, los valores de pH entre el BA1 y BA3 si representaron una diferencia significativa ($p = 0,002$).

Tabla 13. Resultados de conductividad eléctrica y pH en biochar obtenido

Material precursor	Código de biochar	Conductividad Eléctrica promedio ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH promedio
Cáscara de pacay	BA1	11 230	8,50
Cáscara de arroz	BA2	740	8,30
Cáscara de café	BA3	5 010	8,07

Fuente: Elaboración propia

c. Análisis elemental de biochar

Los resultados del análisis elemental para carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno se muestran en la Tabla 14. Se puede observar que el biochar derivado de la cáscara de café tiene el mayor porcentaje de carbón (79,96%), luego la cáscara de pacay (72,97%) y finalmente la cáscara de arroz (55 %).

Tabla 14. Resultados de análisis elemental

Material precursor	Código de biochar	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
Cáscara de pacay	BA1	72,97	2,80	2,47	0,09	13,75
Cáscara de arroz	BA2	55,00	2,11	0,69	0,03	7,01
Cáscara de café	BA3	79,96	3,90	0,84	0,03	11,99

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en la siguiente tabla se presentan las relaciones molares de H:C y O:C del biochar obtenido. Cabe precisar que para fines prácticos se consideró 100 gramos como peso base.

Tabla 15. Relaciones molares del biochar

Material precursor	Código de biochar	H:C	O:C
Cáscara de pacay	BA1	0,4605	0,1413
Cáscara de arroz	BA2	0,4604	0,0956
Cáscara de café	BA3	0,5853	0,1125

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 15 se puede observar que todas las relaciones molares H:C se encuentran por debajo de 0,7 para todos biochar. Esto indica que todos los precursores han sido alterados termoquímicamente. Del mismo modo, la relación molar de O:C para todos los biochar es menor a 0,4. Esto indica que los biochar obtenidos son estables. En el Anexo 11.3 se adjuntan los reportes de análisis elemental realizado por el Laboratorio de Energías Renovables de la UNALM.

5.4. Remoción de la DQO del agua residual del procesamiento del café

La fase experimental se realizó en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur. En el Anexo 11.4 se adjuntan las fotografías del procedimiento de remoción de la DQO del agua residual del procesamiento del café mediante los tratamientos de biochar.

Las muestras de agua tratadas con biochar fueron analizadas por el laboratorio SGS del Perú. Dicho laboratorio se encuentra acreditado por INACAL con Registro N° LE – 002. En el Anexo 11.5 se adjuntan los informes de ensayo correspondientes a la DQO después de cada tratamiento.

Ahora bien, la Tabla 16 muestra los porcentajes de reducción de la DQO para cada repetición en los cuatro tratamientos; observándose con mayor porcentaje al biochar

derivado de la cáscara de pacay (BA1). Asimismo, se observa un porcentaje de reducción (promedio de 9,84%) en el tratamiento control o blanco (B).

Tabla 16. Porcentajes de reducción de la DQO del agua residual del café

Código	Descripción	R1	R2	R3	R4	R5	Porcentaje de remoción promedio
B	Blanco	12,53	6,83	14,93	9,07	5,86	9,84
BA1	Cáscara de pacay	24,09	7,99	44,56	24,34	20,90	24,37
BA2	Cáscara de arroz	16,70	18,40	18,40	13,43	16,88	16,76
BA3	Cáscara de café	11,35	13,19	6,94	14,81	12,97	11,85

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 10 muestra los porcentajes de reducción de los distintos tratamientos. Se puede observar que en la mayoría de repeticiones (excepto en la segunda repetición), el porcentaje de reducción del BA1 es superior al blanco y a los demás tratamientos. Asimismo, se observar que el porcentaje de reducción del BA2 y BA3 no difiere significativamente del tratamiento sin biochar (B).

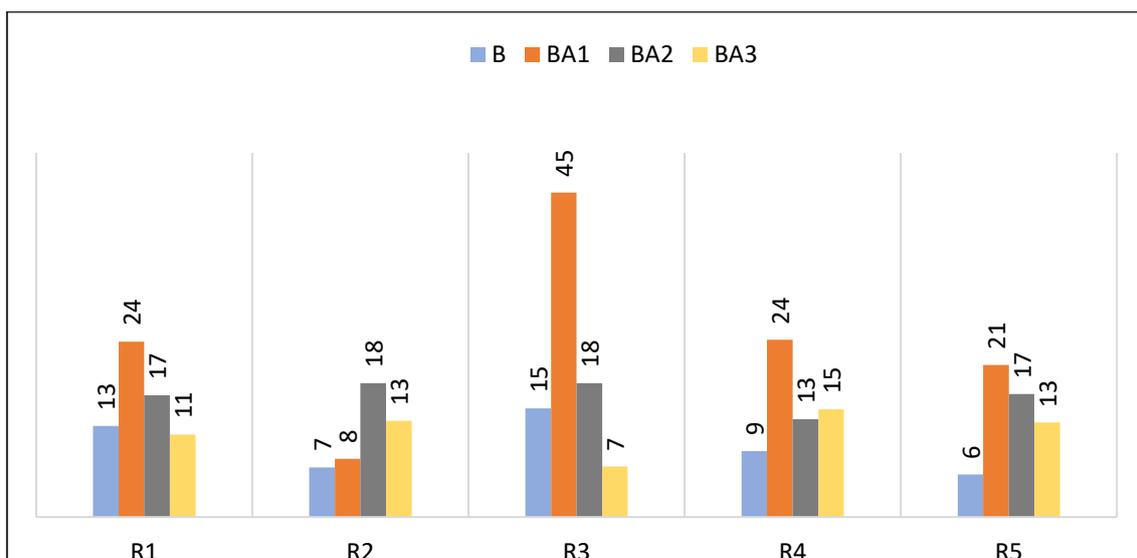


Figura 10. Porcentajes de reducción de DQO de los tratamientos. Elaboración propia.

Del mismo modo, la prueba de unidireccional ANOVA (ver Tabla 17) indicó que hay diferencias en el porcentaje de remoción de la DQO después de los tratamientos empleados ($F: 4, 185; p < 0,05$).

Tabla 17. Análisis de varianza de un factor para el porcentaje de remoción de DQO

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intergrupos	627,389	3	209,130	4,185	0,023
Intragrupos	799,550	16	49,972		
Total	1426,939	19			

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, de acuerdo con la prueba post hoc de HSD de Tukey, se observó que las diferencias significativas se encuentran entre el grupo B y BA1. Es decir, entre el tratamiento sin biochar y el tratamiento con biochar derivado de la cáscara de pacay. En el Anexo 11.6 se adjunta el cuadro de comparaciones múltiples entre los distintos tratamientos.

5.5. Comportamiento del pH del agua residual del procesamiento del café

En la Tabla 18 y Figura 11 se presenta la variación del pH del agua residual luego de que haya sido tratada con los tres tipos de biochar. Para el grupo control o blanco (B) no se adicionó biochar. En ese sentido se puede observar que el pH del blanco se mantuvo sin variaciones en todas las repeticiones. Del mismo modo el pH final de los tratamientos con el biochar BA3 no vario significativamente respecto al blanco. Por otro lado, el biochar BA1 y BA2 variaron significativamente respecto al blanco. Sin embargo, la variación más significativa fue del biochar BA1, teniendo un promedio de 6,4.

Tabla 18. pH final del agua residual tratada

Código	Descripción	R1	R2	R3	R4	R5	pH promedio
B	Blanco	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
BA1	Cáscara de pacay	6,2	6,7	6,7	6,3	6,5	6,4
BA2	Cáscara de arroz	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7
BA3	Cáscara de café	4,1	4,2	4,2	4,1	4,2	4,2

Fuente: Elaboración propia.

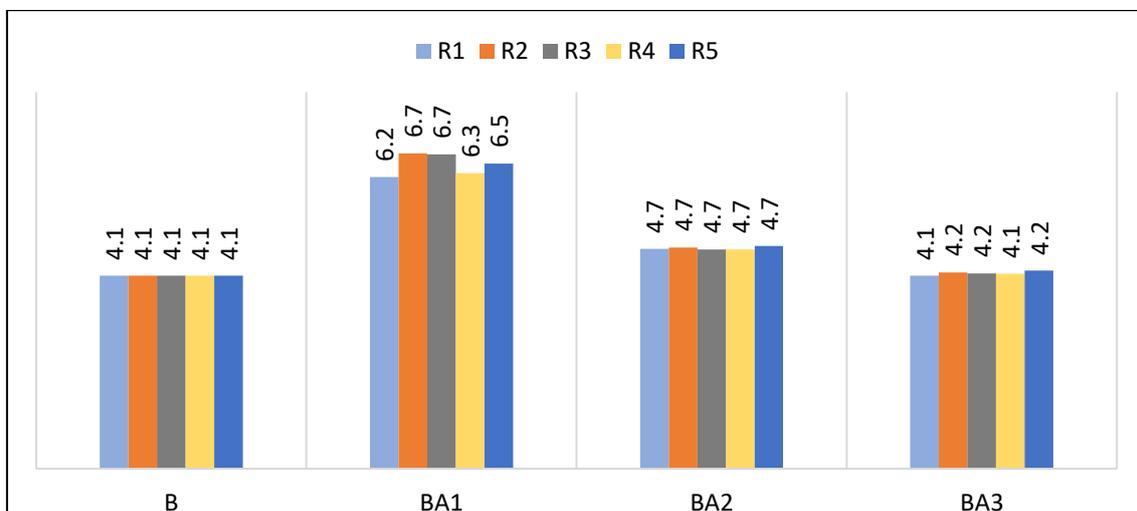


Figura 11. pH del agua tratada con cada tipo de biochar. Elaboración propia.

En la Tabla 19 se muestran los resultados de la prueba de ANOVA unidireccional del pH final del agua residual tratada con los tres tipos de biochar. Los resultados sugieren que hay diferencias entre el pH final del agua residual luego de haber empleado los tratamientos ($F: 573,530; p < 0,01$).

Tabla 19. Análisis de varianza de un factor para pH final del agua tratada

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intergrupos	21,646	3	7,215	573,530	0,000
Intragrupos	0,252	20	0,013		
Total	21,898	23			

Fuente: Elaboración propia.

Más aún, de acuerdo con la prueba post hoc de HSD de Games-Howell, se observa que las diferencias significativas se encuentran entre los grupos B y BA1, B y BA2, BA1 y BA2, BA1 y BA3 y BA2 y BA3. Esto quiere decir que el biochar derivado de la cáscara de pacay y arroz influyó significativamente en el pH final del agua residual del café. Por otro lado, el biochar derivado de la cáscara de café no influyó en la variación del pH final del agua residual. En el Anexo 11.7 se adjunta el cuadro de comparaciones múltiples entre los distintos tratamientos.

5.6. Determinación del bioadsorbente más efectivo

El bioadsorbente más efectivo fue formulado en función a los criterios descritos en la sección 4.2. De este modo, en la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos respecto a las características de los materiales precursores, el biochar obtenido y sus efectos sobre el pH y la remoción de la DQO del agua residual del procesamiento de café o agua miel.

Tabla 20. Resultados generales obtenidos para cada análisis

N	Análisis	BA1	BA2	BA3
1	Porcentaje de remoción de DQO	24,4 %	16,8 %	11,9 %
2	pH final del agua residual tratada	6,4	4,7	4,2
3	Porcentaje de humedad del precursor	9,8 %	9,6 %	9,9 %
4	Porcentaje de rendimiento del precursor	34,3 %	40,3 %	32,6 %
5	pH del biochar	8,5	8,3	8,1
6	Conductividad eléctrica del biochar	11,23	0,74	5,01
7	Porcentaje de carbón del biochar	73 %	55 %	80 %
8	Relación H:C del biochar	0,4605	0,4604	0,5853

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, en la Figura 12 se muestra el puntaje obtenido para cada tipo de biochar en cada análisis realizado. Se observa que el biochar BA1 (biochar derivado de la cáscara de pacay) tiene el mayor puntaje en casi todos los análisis realizados y por ende también tiene el mayor puntaje global (2,14). Posteriormente sigue el biochar BA2 (biochar derivado de la cáscara de arroz) y BA3 (biochar derivado de la cáscara de café) con puntajes globales de 1,50 y 1,10, respectivamente.

En ese sentido, no se consideró necesario formular un bioadsorbente que esté constituido con distintas proporciones de los tres tipos de biochar obtenido. De este modo, en concordancia con los criterios descritos en la Tabla 9 y 20; el biochar derivado de la cáscara de pacay (BA1) fue considerado como el bioadsorbente más efectivo en su totalidad.

Análisis	Porcentaje	BA1	BA2	BA3
Porcentaje de remoción de DQO	50%	2	1	0
pH final del agua residual tratada	10%	2	1	1
Porcentaje de humedad del precursor	8%	3	3	3
Porcentaje de rendimiento del precursor	8%	2	3	2
pH del biochar	6%	2	2	2
Conductividad eléctrica del biochar	6%	2	1	2
Porcentaje de carbón del biochar	6%	2	1	3
Relación H:C del biochar	6%	3	3	3
Resultado		2,14	1,50	1,10

Puntuación	
Deficiente	0
Insuficiente	1
Correcto	2
Óptimo	3

Figura 12. Evaluación del biochar más efectivo. Elaboración propia.

5.7. Pruebas cinéticas de adsorción

Las pruebas cinéticas de adsorción para determinar las isothermas correspondientes a la remoción de la DQO fueron realizadas sobre el bioadsorbente más efectivo (BA1); es decir sobre el biochar derivado de la cáscara de pacay. En la siguiente tabla se muestran las dosis de bioadsorbente aplicadas para cada una de las repeticiones:

Tabla 21. Dosis de BA1 para la determinación de las isotermas de adsorción

Dosis	R1		R2		R3		R4		R5	
	BA1 (g)	Agua residual (ml)								
1	1,8062	120	1,8099	120	1,8088	120	1,8078	120	1,809	120
2	3,802	120	3,8071	120	3,8043	120	3,806	120	3,8054	120
3	5,8042	120	5,8055	120	5,8043	120	5,8061	120	5,8056	120
4	8,8022	120	8,8018	120	8,8026	120	8,8042	120	8,8057	120
5	10,8087	120	10,8098	120	10,8024	120	10,805	120	10,8077	120

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó en la sección 4.2, cada unidad experimental mantuvo un tiempo de tratamiento de 24 horas a una velocidad de agitación de 400 RPM con partículas entre 0,7 y 5,0 mm de diámetro y a una temperatura ambiente de 25 °C. Ahora bien, en la Tabla 22 se muestran los promedios de las concentraciones finales o concentración en el equilibrio (C_e) luego del tratamiento con las distintas dosis. Asimismo, se muestra el promedio de la capacidad de adsorción obtenida para cada dosis. En el Anexo 11.8 se adjuntan los resultados de capacidad de adsorción para cada repetición con sus respectivas dosis.

Tabla 22. Resultados promedios de capacidad de adsorción del BA1

Dosis	Concentración inicial (mg/l) C_o	Concentración en el equilibrio (mg/l) C_e	Capacidad de adsorción (mg soluto/g adsorbente) q_e
1	15 952 ,2	13 418 ,6	168 ,1
2	15 952 ,2	12 406 ,5	111 ,8
3	15 952 ,2	12 346 ,2	74 ,5
4	15 952 ,2	12 409 ,8	48 ,3
5	15 952 ,2	12 607 ,6	37 ,1

a. Isoterma de Freundlich

En la Figura 13 se grafican los valores tomados como logaritmos de la concentración en el equilibrio (C_e) y la capacidad de adsorción (q_e) presentados en la Tabla 22.

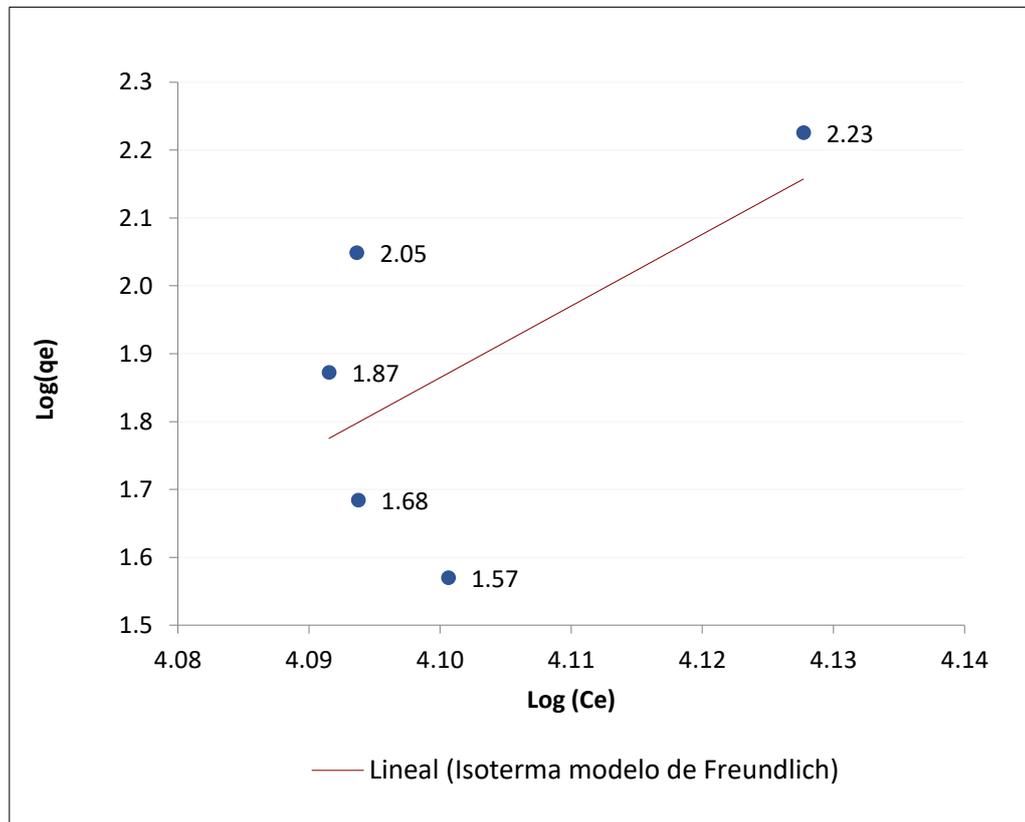


Figura 13. Isoterma de Freundlich del biochar derivado de la cáscara de pacay (BA1). Elaboración propia.

De la gráfica anterior, la isoterma de Freundlich resulta una línea recta cuya pendiente es igual a n y su intercepto sobre la ordenada igual a $\text{Log}(KF)$. Las constantes de Freundlich son obtenidas a partir de la siguiente ecuación linealizada:

$$\text{Log}(q_e) = 10,565 \times \text{Log}(C_e) - 41,453$$

En donde:

$$\frac{1}{n} = 10,565 \quad \wedge \quad \text{Log}(K_F) = -41,453$$

En sentido, en la Tabla 23 se muestran las constantes de Freundlich obtenidas para el biochar derivado de la cáscara de pacay.

Tabla 23. Constantes de Freundlich del BA1

K_f	n	R^2
4E-42	0,1	0,3588

Fuente: Elaboración propia.

5.8. Comportamiento de la DQO en los ensayos cinéticos

La Figura 14 muestra los porcentajes de remoción de la DQO registrados después de la aplicación de la dosis N° 1 (1,8 g / 120 ml), dosis N° 2 (2,8 g / 120 ml), dosis N° 3 (3,8 g / 120 ml), dosis N° 4 (4,8 g / 120 ml) y dosis N° 5 (5,8 g / 120 ml) sobre el agua residual del procesamiento del café.

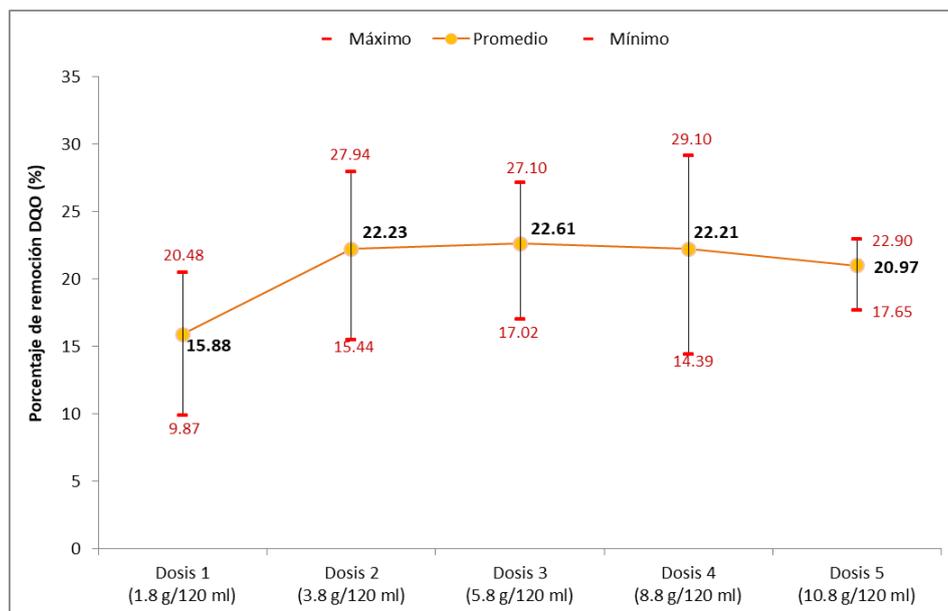


Figura 14. Porcentajes de remoción de la DQO del agua residual respecto a las dosis aplicadas. Elaboración propia.

Asimismo, la Tabla 24 muestra las medidas estadísticas obtenidas del comportamiento de la DQO en los ensayos realizados.

Tabla 24. Medidas estadísticas del comportamiento del porcentaje de reducción de la Demanda Química de Oxígeno

Estadísticos	Dosis 1	Dosis 2	Dosis 3	Dosis 4	Dosis 5
Número de valores	5	5	5	5	5
Mínimo	9 ,875	15 ,44	17 ,02	14 ,39	17 ,65
Mediana	16 ,39	22 ,16	22 ,79	22 ,48	21 ,32
Máximo	20 ,48	27 ,94	27 ,1	29 ,1	22 ,9
Media	15 ,88	22 ,23	22 ,61	22 ,21	20 ,97
Desviación estándar	4 ,021	5 ,014	3 ,738	5 ,949	2 ,022
Error estándar	1 ,798	2 ,242	1 ,672	2 ,66	0 ,9041

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 14, los resultados no muestran diferencias significativas entre las dosis. Asimismo, el análisis de varianza unifactorial de los resultados obtenidos indica que no hay diferencias significativas en los porcentajes de reducción de la DQO respecto a las dosis aplicadas ($F: 2,076; p > 0,05$). En la siguiente tabla se muestran los resultados de la prueba de ANOVA unidireccional del porcentaje de reducción de la DQO del agua residual tratada con las cinco dosis. En el Anexo 11.9 se adjuntan los informes de ensayo correspondientes a la DQO después de la aplicación de cada dosis.

Tabla 25. Análisis de varianza de un factor para la reducción de la DQO mediante las dosis estudiadas

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intergrupos	4005099,738	4	1001274,934	2,076	0,122
Intragrupos	9645747,948	20	482287,397		
Total	13650847,68	24			
	6				

Fuente: Elaboración propia.

5.9. Comportamiento del pH en los ensayos cinéticos

En la Figura 15 se muestran los valores de pH del agua residual del procesamiento del café después de la aplicación de la dosis N° 1 (1,8 g / 120 ml), dosis N° 2 (2,8 g / 120 ml), dosis N° 3 (3,8 g / 120 ml), dosis N° 4 (4,8 g / 120 ml) y dosis N° 5 (5,8 g / 120 ml) sobre el agua residual del procesamiento del café.

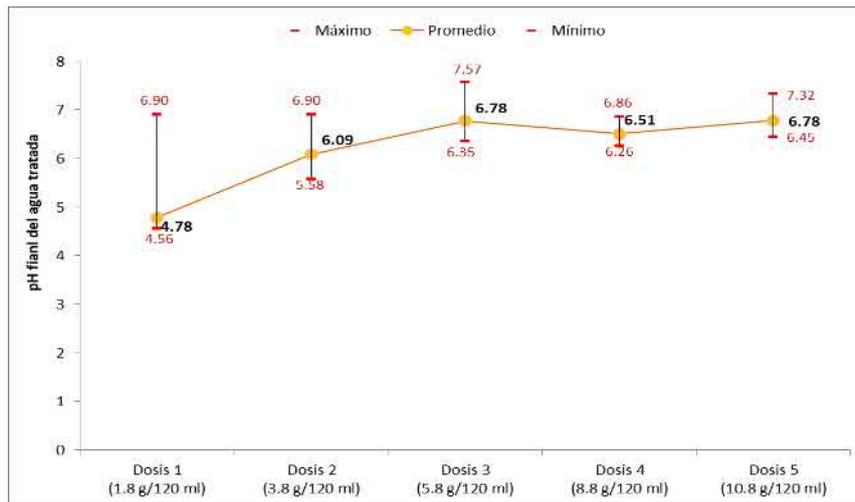


Figura 15. Valores del pH final del agua residual respecto a las dosis aplicadas. Elaboración propia. Por otra parte, la Tabla 26 muestra las medidas estadísticas obtenidas del comportamiento del pH en los ensayos realizados.

Tabla 26. Medidas estadísticas del comportamiento del pH

Estadísticos	Dosis 1	Dosis 2	Dosis 3	Dosis 4	Dosis 5
Número de valores	5	5	5	5	5
Mínimo	4,56	5,58	6,35	6,26	6,45
Mediana	4,81	5,79	6,49	6,37	6,71
Máximo	4,99	6,90	7,57	6,86	7,32
Media	4,784	6,088	6,778	6,508	6,780
Desviación estándar	0,186	0,546	0,5375	0,2894	0,3314
Error estándar	0,08316	0,2442	0,2404	0,1294	0,1482

Fuente: Elaboración propia.

Según lo observado en la Figura 15 y lo registrado en la Tabla 26, se observa diferencias en el comportamiento del pH respecto a los tratamientos aplicados. De

este modo, según la Tabla 27, los resultados de la prueba de ANOVA unidireccional del pH final del agua residual tratada con los cinco tipos de dosis sugieren que hay diferencias entre el pH final del agua residual luego de haber empleado los tratamientos (F: 21,332; $p < 0,01$).

Tabla 27. Análisis de varianza de un factor para pH final del agua tratada con las cinco dosis de BA1

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intergrupos	13,911	4	3,478	21,332	0,000
Intragrupos	3,261	20	0,163		
Total	17,171	24			

Fuente: Elaboración propia.

Más aún, de acuerdo con la prueba Post hoc de HSD de Games-Howell, se observaron que las diferencias significativas se encuentran entre las dosis D1 y D2, D1 y D3, D1 y D4 y D1 con D5. Esto quiere decir que el efecto de la primera dosis (D1) sobre el pH final del agua residual es significativamente diferente respecto a las demás dosis empleadas. Por otro lado, el efecto de las demás dosis (D2, D3, D4 Y D5) sobre el pH final del agua residual no sugiere diferencia significativamente entre ellas. En el Anexo 11.10 se adjunta el cuadro de comparaciones múltiples entre las distintas dosis.

VI. DISCUSIÓN

6.1. Calidad del agua residual del procesamiento del café

La presente investigación se llevó a cabo en una finca que utilizó en el beneficio húmedo 5 litros de agua por cada kilogramo de cerezo de café de la especie *Coffea arabica*, específicamente de la variedad *Typica*. Ahora bien, la concentración de DQO registrada en la presente investigación fue de 17 225 mg/l. Por otra parte, Garay (2016) determinó una concentración de 22 399 mg/l en una finca cafetalera en la región de Cajamarca. Cabe señalar que el mencionado autor precisó que la concentración registrada (22 399 mg/l) es la sumatoria de las aguas de despulpado (12 665 mg/l) y las aguas de lavado (9 734 mg/l). Asimismo, en su finca de estudio destacó utilizó una relación de 10 litros de agua por cada kilogramo de cerezo de café de la especie *Coffea arabica*. No especificó la variedad. Los volúmenes de agua utilizados por Garay (2016) coinciden con los de Salazar (2012); quien determinó que en las principales plantas de beneficio húmedo de café de la cuenca del río Entaz (Villa Rica), es en promedio 11.65 litros de agua por cada kilogramo de cerezo de café.

De este modo, la concentración de DQO registrada en las aguas residuales del procesamiento de café en la presente investigación guarda relación con lo registrado por Garay (2016) si consideramos solamente las aguas de lavado y además un factor de dilución debido a que en la presente investigación se usó la mitad de agua.

Asimismo, Aguiar (2016) colectó un volumen de agua residual del beneficio húmedo de café localizado en Espíritu Santo (Brasil) con una concentración de DQO similar a la registrada por Garay (2016); sin embargo Aguiar (2016) no precisó la proporción de agua por kilo de café y tampoco con que variedad de café trabajó en su investigación.

En cuanto a la materia orgánica biodegradable presente en las aguas residuales, es sabido que la relación DBO/DQO indica cuan biodegradable es la materia orgánica. La materia orgánica es difícil de degradar si la relación de DBO/DQO es menor a 0,2. Si la relación varía entre 0,2 a 0,5 es levemente biodegradable; y si la relación de DBO/DQO es mayor de 0,5 es fácilmente biodegradable (Pisarevsky, Polozova, & Hockridge, 2005). En ese sentido, en la presente investigación no se procedió a medir la DBO debido a que los resultados toman cinco días. No obstante, se tomó como referencia las relaciones de DBO/DQO del agua residual del procesamiento del café de otros autores. De este modo, Garay (2016), Aguiar (2016) y Devi (2008) obtuvieron valores de 0,601; 0,526 y 0,545 respectivamente. Esto indica que el agua residual del procesamiento del café es fácilmente biodegradable.

Finalmente, los resultados de DQO en los estudios mencionados en los párrafos precedentes guardan relación con lo mencionado por Garay (2016). Dicho autor indica que se han realizado estudios de caracterización físico-química de las aguas residuales generadas por el beneficio del café en diferentes trabajos de investigación, en donde los investigadores expresan en común las elevadas cargas orgánicas contaminantes (DBO, DQO, entre otros) independientemente de la variedad del grano de café y de la calidad del agua empleada para el beneficio húmedo de café.

Con respecto a la normativa ambiental que regula las concentraciones de DQO de los efluentes del procesamiento del café, es pertinente mencionar que el Decreto No. 3395 – COLOMBIA establece que el límite máximo permisible del parámetro DQO para verter aguas mieles a los cuerpos receptores es de 3 000 mg/l; por lo que, según los datos obtenidos, el agua no podría descargarse al ambiente.

En lo que respecta al pH, los resultados obtenidos en la caracterización del agua residual indican que se trata de un efluente con un pH adverso (4,1). El valor de pH registrado en el presente estudio guarda relación con lo observado por Devi (2008) en la India, Aguiar (2016) en Brasil y Galluser (2015) en el Perú. Por otra parte, es preciso tomar en cuenta que el Decreto No. 3395 – COLOMBIA establece que los rangos y límites permisibles de pH para verter aguas mieles a los cuerpos receptores debe estar entre 5,0 y 9,0. Asimismo, es importante tener en cuenta que según la OMS el rango de pH para las aguas destinadas al consumo humano está entre los 6,5 a 8,5; por lo que, según los datos obtenidos, no pueden destinarse a este uso.

Según Puerta (2011) el grado de acidez de las aguas residuales o aguas mieles, es conferido por el mucílago del café presente en el efluente debido a que esta sustancia orgánica proporciona partículas y componentes durante el contacto turbulento e intenso con el agua limpia durante el proceso de lavado de café (ver Figura 3). El mucílago del café está constituido entre 85% a 91% de agua y entre 6% y 7% de azúcares, compuestos por 63% de azúcares reductores. Estos componentes explican la propiedad perecedera y la ocurrencia de su fermentación natural, aumentó de acidez y formación de etanol a temperatura ambiente.

En lo que respecta a la conductividad eléctrica del agua residual, el valor registrado (300 $\mu\text{S/cm}$) es el mismo que lo observado por Devi (2008) en la India (300 $\mu\text{S/cm}$). Ambos valores cumplen con el límite establecido (1 000 $\mu\text{S/cm}$) por la OMS para el agua destinada al consumo humano.

Ahora bien, los resultados de DQO y pH registrados en la presente investigación reafirman que las características fisicoquímicas de las aguas mieles pueden alterar la

composición y modificar la vida biológica de las aguas naturales, teniendo efectos significativos sobre la mayoría de especies y ecosistemas (Devi et al., 2008; Espigares & Pérez, 2009; López, 2012; Matuk Velasco et al., 1997; Molina, 2000; Perez Díaz et al., 2014; Salazar et al., 2013).

6.2. Características del biochar derivado de los residuos agrícolas estudiados

a. Características de los residuos agrícolas

Los residuos agrícolas (cáscara de pacay, arroz y café) que fueron procesados como materiales precursores de biochar presentaron menos del 10% de humedad. El porcentaje de humedad de la cáscara de pacay (9,76%) guarda relación el porcentaje de humedad determinado por Morales (2014) en Ayacucho (9,58%). Asimismo, el porcentaje de humedad de la cáscara de arroz (9,58%) también guarda relación con lo registrado por Prada & Cortés (2010) en Colombia (8,67%). Del mismo modo, el porcentaje de humedad de la cáscara de café (9,91%) obtenido en la presente investigación, mantiene relación con lo determinado por Solís (2012) en México (9,47%).

Según Martínez & Bohórquez (2017), si se tiene que el porcentaje de humedad del material precursor es menor al 10%, entonces no es necesario el secado del material previo a la pirólisis. En virtud a ello, los residuos agrícolas seleccionados en la presente investigación (cáscara de pacay, arroz y café) no superan el máximo de humedad para ser pirolizados como primera etapa. Esta característica es favorable en términos de inversión de tiempo y energía para la producción de biochar.

b. Características de los biochar obtenidos

Los porcentajes de rendimiento de biochar obtenidos en la presente investigación resultaron ser inversamente proporcional a contenido de humedad de sus respectivos materiales precursores: cáscara de pacay (34,32%; 9,76%), cáscara de arroz (40,31%; 9,58%) y cáscara de café (32,58%; 9,91%).

Estos resultados guardan relación con lo que sostiene Carbajal (2012), quien señala que el carbono fijo es inversamente proporcional al contenido de humedad, contenido de cenizas y material volátil del carbón. De este modo, se sugieren que los materiales precursores tengan baja humedad (<10%) para que obtener una mayor productividad de biochar.

En lo que respecta al contenido de carbón en los materiales precursores, se halló que el biochar derivado de la cáscara de arroz presentó una proporción significativamente menor (55,00%) en comparación del biochar derivado del pacay (72,97%) y el biochar de la cascarilla del café (79,96%).

Estos resultados guardan relación con lo que sostiene Cheenmatchaya & Kungwankunakorn (2014) en Tailandia, quienes señalan que el biochar derivado de la cáscara de arroz es un material con un alto contenido de sílice y bajos contenidos de ceniza. Asimismo, el estudio de Gómez et al. (2011) determinaron que la cáscara de arroz puede contener hasta 42% de sílice. Ello es acorde con lo que este estudio halla.

En lo que respecta a la alteración termoquímica, la presente investigación determinó que todos los materiales precursores fueron alterados debido a que la relación molar entre hidrógeno y carbono de los materiales resultó ser menor a

0,7. Según la IBI (2015) esto significa que efectivamente los materiales precursores fueron alterados y convertidos en gran proporción en estructuras de anillos aromáticos fusionados. Asimismo, se determinó que todos los materiales precursores son estables debido a que la relación molar entre oxígeno y carbono resultó ser menor a 0,4.

Cabe precisar que según Spokas (2010), los ratios entre las relaciones molares de hidrógeno – carbono y oxígeno – carbono están estrechamente relacionadas.

Con respecto a los valores de pH, se determinó una media de 8,2 entre los tres tipos de biochar obtenidos. Asimismo, no se encontraron diferencias significativas entre los valores registrados. Estos resultados guardan relación con lo que sostienen Lehmann & Joseph (2009) y Escalante et al. (2016), quienes han consignado reacciones donde el pH del biochar varía de ácido a alcalino, con una media de pH 8,1 y un intervalo de pH entre 6,2 y 13.

La conductividad eléctrica de los biochar obtenidos fue en todos los casos superior a $1\ 000\ \mu\text{S cm}^{-1}$, a excepción del biochar derivado de la cáscara de arroz ($\leq 800\ \mu\text{S cm}^{-1}$). Estos valores son similares a los obtenidos por Rosado, Paneque, Miller, López, & Knicker (2016) y Lehmann & Joseph (2009). Cabe precisar que este parámetro está relacionado con la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del biochar. Según Liang et al. (2006) los responsables del incremento de la CIC y la reactividad del biochar son los grupos carboxílicos que se forman sobre los puentes de núcleos aromáticos del biochar que resultan de su oxidación.

6.3. Evaluación de la remoción de la DQO del agua residual del procesamiento del café

A partir de los hallazgos encontrados y presentados en la sección 5.4 se acepta la hipótesis alterna general de la presente investigación; la cual establece que es posible remover significativamente la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del agua residual del procesamiento del café mediante bioadsorbentes derivados de residuos agrícolas. La diferencia significativa fue observada únicamente entre el grupo control (agua residual sin biochar) y el tratamiento con el biochar derivado de la cáscara de pacay (tratamiento BA1). Esto se debe a que los componentes orgánicos que conforman la biomasa original de la cáscara del pacay influyen directamente en las propiedades químicas y físicas del biochar formado (BA1), lo que define a su vez los efectos benéficos del tratamiento BA1 sobre las aguas residuales del procesamiento del café.

Según Curiel (2016), los mejores materiales para la producción de biochar “son los procedentes de biomasa leñosa, ya que los rendimientos en contenido de carbón son mayores con cantidades elevadas de lignina”. El carbono procedente de la lignina forma parte de estructuras aromáticas que mejora la estabilidad del biochar. Ahora bien, las estructuras aromáticas presentes en la matriz carbonosa del biochar incrementan la capacidad de intercambio catiónico (Milesi 2016) y en consecuencia aumentan la conductividad eléctrica del biochar (Liang, 2006). Dichas características fueron observadas únicamente en el biochar derivado de la cáscara de pacay.

Más aún, según Aponte (2019) las plantas con más lignina tienen mayor stock de carbono en su biomasa. Asimismo, el stock de carbono está en función del volumen maderable y de la densidad básica (Urrelo 2016). De este modo, se infiere que el

contenido de lignina y densidad básica de la cáscara de pacay le confiere mejores propiedades al biochar sobre la remoción de la DQO de las aguas residuales del café.

Por otro lado, según lo descrito anteriormente en la sección 4.2, se optó por incluir un tratamiento control con la finalidad de evaluar directamente la influencia de los tratamientos (BA1, BA2 y BA3) sobre la DQO del agua residual del procesamiento del café. Dicho tratamiento mantuvo las mismas condiciones que los experimentos (agua residual del procesamiento del café a 400 RPM por 24 horas a temperatura ambiente) pero sin la adición de biochar.

Sin embargo, los resultados indicaron una remoción promedio de 9,84% de la DQO del agua residual en el grupo control. Giraldo & Ortiz (2018) observaron que en un sistema con agitación (500 RPM) se llevan a cabo etapas microbiológicas teniendo una reducción del 29,91% en la DQO del agua residual. En ese sentido, se infiere que el proceso de agitación en la presente investigación influyó en la remoción de la DQO del agua residual del procesamiento del café.

Respecto a los resultados de remoción de la DQO mediante el biochar derivado de la cáscara de pacay (substrayendo el porcentaje de remoción del grupo control), se mantuvo una diferencia significativa en relación a la concentración inicial del efluente.

Los resultados de remoción de la DQO mediante el uso de biochar guardan relación con lo que sostiene Devi et al. (2008) en la India, Huggins et al. (2016) en Estados Unidos y Dalahmeh (2016) en Suecia con aguas residuales domésticas (1 000 mg/l DQO). No obstante, en lo que no concuerda el estudio de los autores referidos con el presente, es que los porcentajes de remoción de la DQO con biochar son mayores al 80%. En este estudio se determinó 24,53% de remoción de la DQO.

Cabe señalar que según Devi et al. (2008), en sistemas de tratamiento para aguas residuales del procesamiento del café con biochar activado derivado de la cáscara de palta, se determinó que el valor de pH del agua a tratar debe mantenerse en el rango de 6,5 y 8,5; siendo 7,0 el valor óptimo para que la capacidad de adsorción sea máxima y alcance remociones de la DQO cercanas al 90%. El valor de pH del efluente a tratar en la presente investigación fue de 4,1.

De este modo, las concentraciones finales de la DQO del agua tratada con el biochar derivado de la cáscara de pacay excedieron (en todas las repeticiones) el límite máximo permisible de la DQO para el vertimiento de aguas residuales del procesamiento del café aprobado mediante el Decreto No. 3395 – COLOMBIA. En ese sentido, y en concordancia con la normativa ambiental colombiana, el agua tratada en la presente investigación no podría descargarse a cuerpos receptores.

a. Variación de pH del agua residual del procesamiento del café

Se halló que el valor de pH del tratamiento control o blanco (agua residual sin biochar sometida a las mismas condiciones experimentales) se mantuvo sin variaciones en todas las repeticiones (4,1) a pesar de haber presentado una disminución promedio de 9,84% en la DQO. Asimismo, el valor de pH final de los tratamientos con el biochar derivado de la cáscara de café (BA3) no vario significativamente respecto al tratamiento control. En cambio, el biochar derivado de la cáscara de pacay y cáscara de arroz influenciaron significativamente en el pH final del agua residual del café. La variación más significativa fue del tratamiento con biochar de la cáscara de pacay, puesto que el valor de pH pasó de 4,1 a 6,4.

Ahora bien, según la Dirección General de Salud Ambiental – DIGESA (2010), la conductividad eléctrica en el agua residual indica la presencia de sales en el agua, lo que hace aumentar su capacidad de transmitir una corriente eléctrica. De este modo, las moléculas de los compuestos orgánicos que no se disocian en soluciones acuosas tienen una conductividad muy escasa o nula. En ese sentido, se infiere que el tratamiento de biochar derivado de la cáscara de pacay pudo incrementar significativamente el valor de pH del agua residual tratada debido a que este material presentó mayor conductividad eléctrica y por ende pudo disolver más sales minerales en el agua tratada, disminuyendo la concentración de iones hidrógeno.

Asimismo, es importante tomar en cuenta que el suelo en la zona de estudio es del tipo oxisol (Escobedo, 2005). Este tipo de suelos presentan de forma natural y retenida óxidos de hierro y aluminio, así como algunos otros metales como cadmio, cobre y manganeso (Alvarado, Mata, & Chinchilla, 2014).

En ese sentido, uno de los mecanismos por los cuales los metales y elementos traza de los suelos pueden ser movilizados es mediante vertimiento de contaminantes ácidos (Antoniadis, Robinson, & Alloway, 2008).

En virtud a lo mencionado anteriormente y en concordancia con la normativa ambiental colombiana para vertimientos de efluentes del proceso productivo de café, el valor de pH del agua residual del procesamiento de café tratado con el biochar de la cáscara de pacay se encuentra dentro de los rangos y límites permisibles para ser vertido a los cuerpos receptores. Del mismo modo, el valor de

pH del agua tratada con biochar de la cáscara de pacay no movilizaría los metales pesados presentes en el suelo en caso el efluente sea vertido al suelo natural.

6.4. Pruebas de adsorción del bioadsorbente más efectivo

Como se mencionó 5.7, las pruebas cinéticas de adsorción para determinar la isoterma de Freundlich fue realizada sobre el bioadsorbente más efectivo; es decir el biochar derivado de la cáscara de pacay (BA1). Cabe precisar que este biochar fue seleccionado en función de los criterios descritos en la Tabla 20.

Los resultados de la cantidad de adsorbato (DQO) adherido al biochar en el equilibrio y la concentración final en el equilibrio fueron graficados para posteriormente linearizar la ecuación y calcular los valores de las constantes de Freundlich. La constante de Freundlich y el valor de n obtenidos en la presente investigación fue de $4E-2$ y de $0,1$, respectivamente. Según lo establecido por Annadurai et al. (2008), esto indica que el biochar derivado de la cáscara de pacay tiene una baja capacidad e intensidad de adsorción.

Estos resultados no guardan relación con lo obtenido por Devi et al., (2008), quien señala haber obtenido un valor de $6E+04$ para la constante de Freundlich y de $4,2$ para n . Estos resultados fueron obtenidos mediante la aplicación de carbón activado derivado de la cáscara de palta sobre el agua residual del procesamiento de café.

a. Variación de la DQO del agua residual entre las dosis de aplicación

A partir de los resultados obtenidos, se observa que no hay diferencias estadísticamente significativas en los porcentajes de reducción de la DQO con respecto a las dosis aplicadas del biochar derivado de la cáscara de pacay. En ese sentido, se infiere que no existe relación de dependencia entre las cinco dosis

aplicadas de biochar (BA1) sobre la DQO del agua residual del procesamiento del café.

Estos resultados no guardan relación con lo que sostiene Devi et al. (2008) para el agua residual del procesamiento del café con la aplicación de carbón activado derivado de la cáscara de palta. Estos autores señalan que el equilibrio fue alcanzado a una dosis de adsorbente de 4 g/100 ml.

b. Variación del pH del agua residual entre las dosis de aplicación

En lo que respecta a la relación entre el pH del agua residual del procesamiento del café y las dosis aplicadas del biochar derivado de la cáscara de pacay, se observó diferencias significativas en el comportamiento del pH respecto a los tratamientos aplicados. Se halló que el efecto de la primera dosis de biochar (1,8 g/120 ml) sobre el pH final del agua residual fue estadísticamente significativo entre las demás dosis.

De este modo, mediante la aplicación de 3,8 g de biochar de cáscara de pacay por cada 120 ml de agua residual del procesamiento de café o aguas mieles, se podría obtener una reducción del 15% de la DQO con un pH final 6,4. En ese sentido, y en concordancia con la normativa ambiental colombiana, las aguas mieles tratadas con el biochar de la cáscara de pacay cumplirían los rangos y límites permisibles para el pH, pero excederían el límite máximo permisible para DQO.

VII. CONCLUSIONES

- Las cáscaras de pacay, arroz y café presentan menos del 10% de humedad. Esta característica los posiciona como materiales precursores de biochar más eficientes en términos de tiempo y energía, debido a que no requieren una etapa previa de secado antes de pasar por el proceso de pirólisis. La producción de biochar es inversamente proporcional al contenido de humedad del material precursor.
- Solamente mediante el biochar derivado de la cáscara de pacay, es posible remover significativamente la DQO del agua residual del procesamiento del café.
- El pH del agua residual tratada con el biochar derivado de la cáscara de pacay, se encuentra dentro de los rangos para ser vertida al cuerpo receptor.
- Con una dosis de 3,8 g de biochar de cáscara de pacay por cada 120 ml de agua residual del procesamiento de café, se obtiene una reducción aproximada del 24% de la DQO con un pH final 6,4. El agua tratada cumple los rangos permisibles para pH pero excede el límite máximo permisible para DQO.
- La agitación de la plancha magnética del grupo control o blanco, reduce en promedio el 9,84% de la DQO del agua residual debido a que oxigena la muestra.

VIII. RECOMENDACIONES

- Para determinar una caracterización más exhaustiva y completa del agua residual del procesamiento del café, se recomienda realizar un análisis de línea base que considere otros parámetros adicionales a la demanda química de oxígeno como la demanda bioquímica de oxígeno, turbidez, sólidos totales y en suspensión.
- Los residuos agrícolas como la cáscara de pacay, cáscara de arroz y cáscara de café han demostrado no solo ser materiales precursores de biochar más eficientes en términos de tiempo y energía, sino también el biochar producido es de muy buena calidad debido a que son alterados termoquímicamente y convertidos en gran proporción en estructuras de anillos aromáticos fusionados. En ese sentido, el biochar obtenido en campo también puede ser mezclado con el suelo para mejorar significativamente la productividad de los cultivos y reducir la lixiviación de nutrientes. Cabe precisar que se puede producir biochar en campo mediante la técnica de los conos Kon-Tiki. Asimismo se puede aprovechar el calor desprendido para secar los materiales precursores.
- En los ensayos con agitadores magnéticos para evaluar la remoción de la DQO mediante la aplicación de biochar, se recomienda incluir un tratamiento sin la presencia del bioadsorbente para determinar la remoción atribuible al bioadsorbente y no a la agitación.
- No se recomienda aplicar el biochar derivado de la cáscara de pacay como único tratamiento para las aguas residuales del procesamiento del café. Debido a que el

pacay es un precursor a disposición de los agricultores peruanos y la producción de biochar puede realizarse en campo, se recomienda que sea un medio filtrante de un sistema de tratamiento. El sistema de tratamiento debe estar contextualizado en los productores peruanos de café. En ese sentido, debe ser un tratamiento pasivo que no implique altos costos y tecnicismos para su operación y mantenimiento. De este modo, se recomienda la implementación de un piloto del sistema de tratamiento de agua (300 l/día) desarrollado por la ONG Aqueos Solutions. Dicha institución es un consorcio de científicos investigadores, ingenieros y diseñadores ecológicos que trabajan en promover la autosuficiencia local a través del diseño ecológico y tecnologías apropiadas para el tratamiento de agua. Sus áreas de enfoque incluye la mejorar de calidad de agua a través del biochar así como diseño e infraestructura de saneamiento ecológico. Se recomienda adaptar el sistema de Aqueos Solutions para el tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café con la incorporación del biochar derivado de la cáscara de pacay como medio filtrante. Si bien el sistema de tratamiento de agua (300 l/día) desarrollado por Aqueous Solutions incorpora al biochar como elemento central para el tratamiento de agua; también considera dos procesos previos al tratamiento con biochar: pre filtración con grava (remueve sedimentos, partículas de materia orgánica como cáscaras, pulpa, etc.) y la biofiltración con arena (formación de biopelícula de microorganismos benéficos que degradan la materia orgánica biodegradable disuelta). Después de que el agua residual haya sido tratada por el filtro de bichar, esta puede ser almacenada y ser reutilizada posteriormente para la etapa de despulpado de café. En esta etapa se remueve la pulpa o cáscara del fruto de café. Es, por tanto, la operación de trillado del café en

fruta. Este trillado se produce mediante estrujamiento del fruto entre dos superficies (en movimiento relativo) y requiere de agua como medio de lubricación entre el fruto de café y las superficies en movimiento. De este modo, el sistema recomendado combina conceptos de conocimiento local, como es la filtración, y técnicas simples de bajo costo que hacen frente a la problemática ambiental que afrontan los agricultores cafetaleros peruanos. En el Anexo 11.11 se muestra el diagrama de flujo del sistema de tratamiento de agua (300 l/día) desarrollado por Aqueous Solutions.

- En caso se realice un tratamiento del agua residual del procesamiento del café solamente con biochar derivado de la cáscara de pacay, se recomienda que el agua tratada no sea vertida a un cuerpo de agua directamente y sea contenida en la superficie debido a que el agua tratada cumple los rangos y límites permisibles para el pH, pero exceden el límite máximo permisible para DQO. Asimismo, en caso el efluente sea vertido al suelo natural, el valor del pH del agua tratada no implicaría una movilización de metales pesados presentes en el suelo de la zona.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, L. L., Andrade-Vieira, L. F., & de Oliveira David, J. A. (2016). Evaluation of the toxic potential of coffee wastewater on seeds, roots and meristematic cells of *Lactuca sativa* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *133*, 366–372.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.07.019>
- Aksu, Z. (2005). Application of biosorption for the removal of organic pollutants: A review. *Process Biochemistry*, *40*(3–4), 997–1026.
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.04.008>
- Alvarado, A., Mata, R., & Chinchilla, M. (2014). Arcillas identificadas en suelos se Costa Rica a nivel generalizado durante el periodo 1931 - 2014: Mineralogía de arcillas en suelos con características vérticas y oxidico caoliníticas. *Agronomía Costarricense*, *38*(1), 107–131.
- Ambiental, D. G. de S. (2010). *Parámetros organolépticos*. Lima.
- Annadurai, G., Ling, L. Y., & Lee, J. F. (2008). Adsorption of reactive dye from an aqueous solution by chitosan: isotherm, kinetic and thermodynamic analysis. *Journal of Hazardous Materials*, *152*(1), 337–346.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.002>
- Antoniadis, V., Robinson, J. S., & Alloway, B. J. (2008). Effects of short-term pH fluctuations on cadmium, nickel, lead, and zinc availability to ryegrass in a sewage sludge-amended field. *Chemosphere*, *71*(4), 759–764.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.10.015>
- APHA. (1992). American Public Health Association Method 3112: Standard Methods for

the Examination of Water and Wastewater. *Methods for Examination of Water and Wastewater*, 552, 7.

Artusi, N. (2015). *Café de Etiopía a Starbucks: La historia secreta de la bebida más amada y más odiada del mundo*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Planeta.

ASTM International. (2018). *ASTM C566-97, Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying* (Vol. 265; A. C566-97, Ed.). Pennsylvania.

Burbano, E. (2014). *Transferencia de conocimientos en propagación de café (coffea) variedad catimora de implementación de buenas prácticas agrícolas en 15 familias del programa Red Unidos de la vereda El Pensil del municipio de la Argentina Huila*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD.

Cañizares-Villanueva, R. O. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 42(3), 131–143.

Carbajal, C. P. (2012). *Utilización industrial y mercado de diez especies maderables potenciales de bosques secundarios y primarios residuales* (Vol. 2). Lima.

Cheenmatchaya, A., & Kungwankunakorn, S. (2014). Preparation of Activated Carbon Derived from Rice Husk by Simple Carbonization and Chemical Activation for Using as Gasoline Adsorbent. *International Journal of Environmental Science and Development*, 5(2), 171–175. <https://doi.org/10.7763/ijesd.2014.v5.472>

Clifford, M. N., & Willson, K. C. (1995). *Coffe: bothany, biochemistry and production of beans and beverage* (A. Edition, Ed.). Connecticut: The AVI Publishing Company.

Dalahmeh, S., & SLU, S. U. of A. S. (2016). Capacity of biochar filters for wastewater

treatment in onsite systems. In *Capacity of biochar filters for wastewater treatment in onsite systems* (ISBN). Sweden: University of Agricultural Sciences.

Desco. (2013). Control de calidad del café. In *Manual Técnico* (Vol. 66).

Devi, R., Singh, V., & Kumar, A. (2008). COD and BOD reduction from coffee processing wastewater using Avacado peel carbon. *Bioresource Technology*, 99(6), 1853–1860. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.039>

Díaz Vargas, C., & Willems, M. (2017). *Linea Base del Sector Café en el Perú*. Lima.

Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López, J., Campo, J., Valtierra, E., ... Etchevers, J. (2016). Biocarbón: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34, 367–382. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00367.pdf>

Escobedo, R. (2005). Zonificación ecológica económica de la Región San Martín. In I. de I. de la A. Peruana (Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Espigares, M., & Pérez, J. (2009). *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas residuales*. 22. Retrieved from http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Agua_s_Residuales_composicion.pdf

Expocafe. (2017). *Café Peruano*. Retrieved from <http://www.expocafeperu.com.pe/CafePeruano.php>

FAO. (2006). *Un café más sano*. Retrieved from <http://www.fao.org/ag/esp/revista/0607sp1.htm>

Farfán Valencia, F. (2014). *Agroforestería y sistemas agroforestales con café* (Cenicafe).

Caldas: Cenicafe.

Galluser, S. (2015). *Evaluación de diferentes Dosis de Microorganismos Eficientes (EM) en combinación con una especie de planta acuática (Eichornia crassipes) para la purificación de las aguas residuales provenientes del beneficio húmedo de Café (Coffea arabica)*. Tarapoto.

Garay, J. M. (2016). Biosistema para purificar aguas residuales del beneficio húmedo del café del distrito la Coipa en la región Cajamarca 2014. *Tesis Doctoral En Ingeniería Química Ambiental. EPG Universidad Nacional de Trujillo*, 92.

Giraldo Piñeros, Y. D., & Ortiz Sanchez, M. A. (2018). *Producción de biogás a partir de la codigestión de biomasa residual en un sistema de digestión anaerobia con agitación a escala de laboratorio*. Universidad de America.

Gómez, E., Alvarez, G., Guitierrez, G., Alfredo, J. A., Martinez, M., Jáuregui, C., & Cervantes, J. (2011). Influencia de las propiedades superficiales en reacciones de halogenación de sílice de origen biogénico. *Acta Universitaria*, 21(4), 55–64.

Huggins, T. M., Haeger, J. C., & Biffinger, Z. J. R. (2016). Granular Biochar Compared with Activated Carbon for Wastewater Treatment and Resource Recovery. *Water Research*, (Vi), 225–232. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.07.014>

IBI. (2015). *Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil*.

ICO. (2016). Monthly export statistics - April 2015 In thousand 60kg bags.

Infocafes. (2008). Producción de café en Perú. Retrieved from

<http://infocafes.com/portal/infocafes/produccion-de-cafe-en-peru/>

Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar for Environmental Management. In *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*.

<https://doi.org/10.4324/9781849770552>

Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., ... Neves, E. G.

(2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1719–1730.

<https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0383>

López, et al . (2012). Efecto del vertido directo de las aguas mieles en la calidad físico-química del agua de la Subcuenca del Río Jigüina, Jinotega. *Revista Científica-FAREM Estelí*, (1), 5–16.

Martínez Villalba, A. C., & Bohórquez León, L. D. (2017). *Evaluación de la eficiencia de biochar producido a partir de pirólisis lenta de bagazo de caña como medio filtrante para retención de fenoles en matriz acuosa* (U. Salle, Ed.). Bogotá: Universidad de la Salle.

Matuk Velasco, V., Puerta Quintero, G. I., & Rodríguez Valencia, N. (1997). Impacto biológico de los elfuentes del beneficio húmedo del café. *Cenicafé*, 48(4), 234–252.

Ministerio de Agricultura y Riego. (2018). Boletín Estadístico de Comercio Exterior Agrario. In *Boletín Estadístico*. Retrieved from <https://www.minagri.gob.pe/portal/download/pdf/herramientas/boletines/comercio-exterior/2018/bece-ene2018.pdf>

- Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. S., & Pittman, C. U. (2014). Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent - A critical review. *Bioresource Technology*, 160(February 2014), 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.120>
- Molina, L. V. (2000). *Gastos defensivos del beneficiado de café en zona pacífica central de Nicaragua*. CATIE.
- Morales Miranda, M. (2014). Obtención de un polvo instantáneo por atomización a partir del extracto de la cáscara de Vicia faba tostada (Vol. 8). Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga.
- Moreno Marengo, A. R. (2013). *Estudio de diferentes bioadsorbentes como posibles retenedores de fosfatos en aguas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Navarrete, D., Quijano, N., & Vélez, C. (2014). Elaboración de carbón activado a partir de materiales no convencionales para ser usado como medio filtrante (Vol. 8). Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Orozco, C., Barrientos, H., Lopezlena, A., Cruz, J., Selvas, C., & Giesseman, B. (2005). Evaluación de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café: características químicas. *Revista de Higiene y Sanidad Ambiental*, 5, 123–131.
- Ospina Guarín, V. M., Buitrago Sierra, R., & López, D. P. (2014). Preparación y caracterización de carbón activado a partir de torta de higuierilla. *Tecno Lógicas*, 17(32), 75–84.
- Perez Díaz, N., Castillo Ramos, R., Carballo Abreu, L., & Veliz Gutierrez, J. (2014).

Impacto ambiental en el cultivo y procesamiento del café y su repercusión social.

Pinar del Rio.

Pineda, C., Reyes, C., & Oseguera, A. (2012). Beneficiado y calidad del café. *Manual de Caficultura*, 213–241.

Pinzón-Bedoya, M. L., & Villamizar, L. E. V. (2009). Kinetic modeling biosorption of Cr(III) using orange shell. *DYNA (Colombia)*, 76(160), 95–106.

Pisarevsky, A. M., Polozova, I. P., & Hockridge, P. M. (2005). Chemical oxygen demand. In *Russian Journal of Applied Chemistry* (Vol. 78). <https://doi.org/10.1007/s11167-005-0239-6>

Prada, A., & Cortés, C. E. (2010). Thermal decomposition of rice husk: an alternative integral use. *Orinoquia*, 14(S1), 155–170. <https://doi.org/10.22579/20112629.103>

Programa de Asistencia Técnica-USAID. (2002). *Informe final de ejecución del proyecto: "Producción de café sostenible, procesamiento, comercialización y mercadeo"* (Vol. 00). El Salvador.

Puerta Quintero, G. I., & Rios Arias, S. (2011). Composición química del mucílago de café, según el tiempo de fermentación y refrigeración. *Cenicafé*, 62(hasta 1999), 23–40.

Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R., & Ahmad, A. (2010). Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1–3), 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.047>

Rosado, J., Paneque, M., Miller, A. Z., López, R., & Knicker, H. (2016). Evaluación de la alteración de biochars utilizados como enmienda de un cultivo de girasol bajo

condiciones de clima mediterráneo. *Red Española de Compostaje*, 245–249.

Retrieved from

http://digital.csic.es/bitstream/10261/152373/1/Evaluacion_alteracion_biochar_VJorREC_2016.pdf

Rosas, L. (2019). Isotermas de adsorción de cationes metálicos en solución acuosa mediante borra de café peruano. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Salazar Hinostroza, J., & Ñique Alvarez, M. (2012). *Estimación del volumen de las aguas residuales vertidos a la cuenca del Río Entaz por Principales Plantes de Beneficio Húmedo de Café de los distritos de Villa Rica y San Luis de Shuario en el año 2011*. Tingo Maria.

Salazar, Lady, Quiroga, R., Castillo, L., & Vega, H. (2013). Diagnóstico del tratamiento de aguas residuales mediante los sistemas Cenicafe y Majavita del beneficio ecológico del café con módulo becolsub en la hacienda Majavita. *Universidad Libre de Colombia*, (5), 9.

Sánchez, A. (2017). *Diseño de una planta de gasificación con cogeneración para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en un proceso industrial*. 180. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2010.12.057>

Solís, J. A., Morales Téllez, M., Ayala Tirado, R. C., & Durán de Bazúa, M. C. (2012). Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 27(1), 36–48.

- Spokas, K. A. (2010). Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management*, 1(2), 289–303. Retrieved from <https://pubag.nal.usda.gov/pubag/downloadPDF.xhtml?id=47731&content=PDF>
- Tang, J., Lv, H., Gong, Y., & Huang, Y. (2015). Preparation and characterization of a novel graphene/biochar composite for aqueous phenanthrene and mercury removal. *Bioresource Technology*, 196, 355–363. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.047>
- Temis Perez, A. ., Lopez Malo, A., & Sosa Morales, E. (2011). Producción de café (*Coffea arabica* L.): cultivo, beneficio, plagas y enfermedades. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 5(2), 54–74.
- Universidad Sevilla. (2011). Manual Del Carbón Activo. *Aula.Aguapedia.Org*, 1–89. Retrieved from http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod_resource/content/1/CARBON ACTIVO DEFINITIVO tar.pdf

X. ABREVIATURAS

APHA American Public Health Association

CIC Capacidad de Intercambio Catiónico

DBO Demanda Bioquímica de Oxígeno

DQO Demanda Química de Oxígeno

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations

IBI International Biochar Initiative

ICO International Coffee Organization

OMS Organización Mundial de la Salud

pH Potencial de hidrógenos

XI. ANEXOS

Anexo 11. 1. Fotografías de la toma de muestra del agua residual del café



Finca de Walter Gutierrez



Proceso del lavado de café



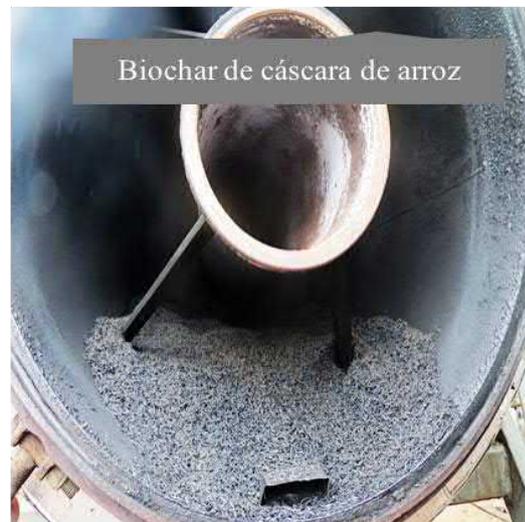
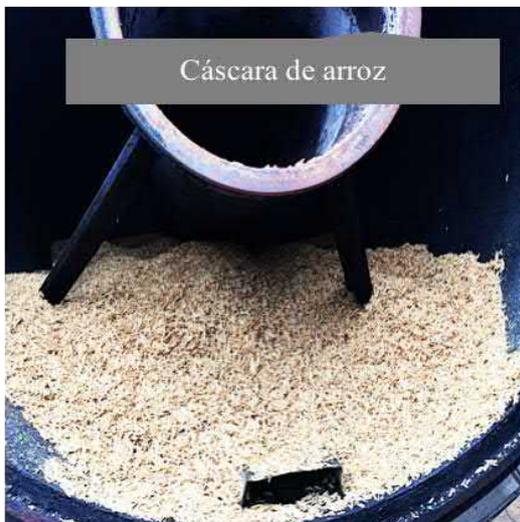
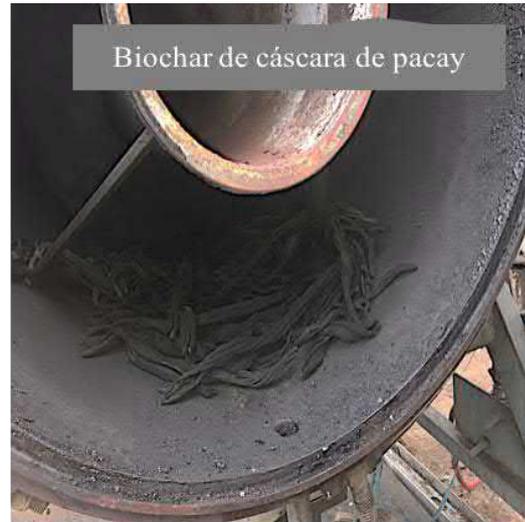
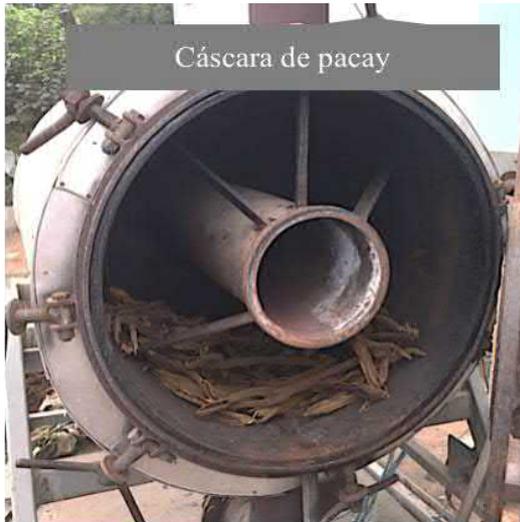
Materiales para la toma de muestra



Preparación de los materiales



Anexo 11. 2. Fotografías del proceso de obtención de biochar



Anexo 11. 3. Informes de análisis elemental



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES
Unidad de Biomasa Energética

REPORTE DE ANÁLISIS ELEMENTAL (C, H, N, O, S)
LER – BIOMASA 064 - 2018

Solicitante : Sr. Adrián Garaycochea Mendoza del Solar
 Atención : Sr. Adrián Garaycochea Mendoza del Solar
 Muestra : Biochar de cáscara de café
 Procedente de : Lima, Perú
 Fecha Recepción : 05 / 07 / 2018
 Norma: : ASTM D4239

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
UBE-(07/2018)-0155	Biochar de cáscara de café	79.96	3.90	0.84	0.03	11.99

NOTA:

- El análisis se realizó con las muestras en base seca (las muestras tal como se recibieron fueron secadas en estufa durante 24 horas a 105 °C).
- Se realizó el análisis por triplicado de cada muestra, obteniéndose resultados aproximados y se determinó la desviación estándar (medida de la dispersión de los valores respecto a la media) de la muestra.



Laboratorio de Energías Renovables



 José Calle Moravi, Ph. D.
 Jefe del Laboratorio de Energías Renovables



↑ Av. La Molina s/n La Molina - Lima - Lima - Perú ☎ Tel: 814 7800 / Anexo 263
 ✉ renovables@lamolina.edu.pe 🌐 www.lamolina.edu.pe/ler/



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES
Unidad de Biomasa Energética

REPORTE DE ANÁLISIS ELEMENTAL (C, H, N, O, S)
LER – BIOMASA 062 - 2018

Solicitante : Sr. Adrián Garaycochea Mendoza del Solar
Atención : Sr. Adrián Garaycochea Mendoza del Solar
Muestra : Biochar de arroz - Biochar de paca
Procedente de : Lima, Perú
Fecha Recepción : 02 / 07 / 2018
Norma : ASTM D4239

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
UBE-(07/2018)-0150	Biochar de arroz	55.00	2.11	0.69	0.03	7.01
UBE-(07/2018)-0151	Biochar de paca	72.97	2.80	2.47	0.09	13.75

NOTA:

- El análisis se realizó con las muestras en base seca (las muestras tal como se recibieron fueron secadas en estufa durante 24 horas a 105 °C).
- Se realizó el análisis por triplicado de cada muestra, obteniéndose resultados aproximados y se determinó la desviación estándar (medida de la dispersión de los valores respecto a la media) de la muestra.





José Calle Maraví, Ph. D.
Jefe del Laboratorio de
Energías Renovables

Anexo 11. 4. Fotografías del procedimiento de remoción de la DQO del agua residual





Unides experimentales



Cada unidad experimental fue llevada
400 RPM por 24 horas a 25 °C



Proceso de filtrado para remover el biochar de cada unidad experimental



Las muestras filtradas fueron preservadas para su posterior análisis

Anexo 11. 5. Informes de ensayos de los resultados de la DQO



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



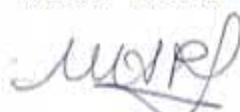
**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814126**

GARAYCOCHEA MENDOZA DEL SOLAR ADRIAN
CALLE MONTE CARLO 212 DEPARTAMENTO 302
ENV / LB-344050-003
PROCEDENCIA : Soritor - San Martin

Fecha de Recepción SGS : 07-07-2018
Fecha de Ejecución : Del 07-07-2018 al 10-07-2018
Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
C-1
B-R1
BA1-R1
BA2-R1
BA3-R1
B-R2
BA1-R2
BA2-R2

Emitido por SGS del Perú S.A.C.
Impreso el 10/07/2018



Rocío J. Manrique Torres
C.I.P. 136634
Coordinador de Laboratorio

Página 1 de 6



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814126**

Estación de Muestreo
BA3-R2
C-2
B-R3
BA1-R3
BA2-R3
BA3-R3
B-R4
BA1-R4
BA2-R4
BA3-R4



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814126**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					C-1	S-R1	BA1-R1
FECHA DE MUESTREO					06/07/2018	06/07/2018	06/07/2018
HORA DE MUESTREO					17:00:00	17:00:00	17:00:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHAS220D	mg/L	1.8	4.5	15,855.5	13,974.5	11,377.8

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BA2-R1	BA3-R1	S-R2
FECHA DE MUESTREO					06/07/2018	06/07/2018	06/07/2018
HORA DE MUESTREO					17:00:00	17:00:00	17:00:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHAS220D	mg/L	1.8	4.5	9,035.4	8,562.8	13,090.0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BA1-R2	BA3-R2	BA3-R2
FECHA DE MUESTREO					06/07/2018	06/07/2018	06/07/2018
HORA DE MUESTREO					17:00:00	17:00:00	17:00:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHAS220D	mg/L	1.8	4.5	11,885.3	11,036.5	13,874.4



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814126**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					C-2	S-R3	BA1-R3
FECHA DE MUESTREO					07/07/2018	07/07/2018	07/07/2018
HORA DE MUESTREO					17:00:00	17:00:00	17:00:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHAS2200	mg/L	1.8	4.5	14,477.8	13,489.0	13,321.4

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					SA2-R3	BA3-R3	B-R4
FECHA DE MUESTREO					07/07/2018	07/07/2018	07/07/2018
HORA DE MUESTREO					17:00:00	17:00:00	17:00:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHAS2200	mg/L	1.8	4.5	11,813.3	12,007.3	12,316.0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BA1-R4	BA2-R4	BA3-R4
FECHA DE MUESTREO					07/07/2018	07/07/2018	07/07/2018
HORA DE MUESTREO					17:00:00	17:00:00	17:00:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHAS2200	mg/L	1.8	4.5	8,026.3	11,813.3	13,472.2



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814126**

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de certificación
 MR: Método del proceso
 LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso
 MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adcorada
 MSD %RPD: Diferencia Percentual Relativa entre los duplicados de la muestra adcorada
 DSa %RPD: Diferencia Percentual Relativa entre los duplicados del proceso

Parámetro	Unidad	LC	MR	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	4.5	4.5	97 - 107%	93 - 105%	0 - 2%



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814126**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHA5220D	Calleo	Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D: 23rd Ed: 2017, Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method

Notes:

El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.

Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.

Este documento es emitido por la Compañía bajo sus Condiciones Generales de Servicio, que pueden encontrarse en la página http://www.sgs.com.pe/ES/Terceros/condiciones_servicio.aspx. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de incertidumbres y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su adherencia o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia, queda prohibida la reproducción parcial, salvo autorización escrita de SGS de Perú S.A.C.

Los resultados del Informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s) y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas.

Última Revisión Julio 2015

Página 6 de 6



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814237**

GARAYCOCHEA MENDOZA DEL SOLAR ADRIAN

CALLE MONTE CARLO 212 DEPARTAMENTO 302

ENV / LB-344050-004

PROCEDENCIA : SANTAR - SAN MARTIN

Fecha de Recepción SGS : 10-07-2018

Fecha de Ejecución : Del 10-07-2018 al 12-07-2018

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
Co3
B-R5
BA1-R5
BA2-R5
BA3-R5
B-R6
BA1-R6
BA2-R6

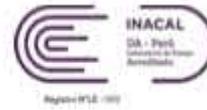
Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 12/07/2018

Rocío J. Manrique Torres
C.I.P. 136634
Coordinador de Laboratorio



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814237**

Estación de Muestreo
BA3-RE



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814237**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					Cc3	B-R5	BA1-R5
FECHA DE MUESTREO					19/07/2018	19/07/2018	19/07/2018
HORA DE MUESTREO					10:20:00	10:20:00	10:20:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHAS2200	mg/L	1.8	4.5	14,594.8	13,271.1	11,942.3

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BA2-R5	BA3-R5	B-R5
FECHA DE MUESTREO					19/07/2018	19/07/2018	19/07/2018
HORA DE MUESTREO					10:20:00	10:20:00	10:20:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHAS2200	mg/L	1.8	4.5	12,834.4	12,433.3	13,740.3

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BA1-R5	BA2-R5	BA3-R5
FECHA DE MUESTREO					19/07/2018	19/07/2018	19/07/2018
HORA DE MUESTREO					10:20:00	10:20:00	10:20:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHAS2200	mg/L	1.8	4.5	11,945.2	12,181.7	12,701.4



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814237**

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de certificación
 MR: Blanco del proceso
 LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso
 MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicional
 MSO %RPD: Diferencia Percentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicional
 DSa %RPD: Diferencia Percentual Relativa entre los duplicados del proceso

Parámetro	Unidad	LC	MR	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSO %RPD
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	4.5	<4.5	100 - 104%	93 - 104%	0%



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814237**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHAS220D	Callao	Demanda Química de Oxígeno	SMEDWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D; 23rd Ed: 2017, Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method

Notas:

El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.

Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.

Este documento es emitido por la Compañía bajo sus Condiciones Generales de Servicio, que pueden encontrarse en la página <http://www.sgs.com.pe/es/RS/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia, queda prohibida la reproducción parcial, salvo autorización escrita de SGS Perú S.A.C.
Los resultados de informe de ensayo solo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s) y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas.

Última Revisión: Julio 2015

Página 5 de 5

Anexo 11. 6. Comparaciones múltiples entre los tratamientos B, BA1, BA2 y BA3 y su significancia en el porcentaje de la remoción de la DQO del agua residual del procesamiento del café.

Variable dependiente: Porcentaje de remoción de DQO							
	(I) Tratamientos con biochar	(J) Tratamientos con biochar	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD de Tukey	B	BA1	-14,5321346*	4,4708767	,023	-27,323401	-1,740868
		BA2	-6,9212839	4,4708767	,434	-19,712551	5,869983
		BA3	-2,0121241	4,4708767	,969	-14,803391	10,779143
	BA1	B	14,5321346*	4,4708767	,023	1,740868	27,323401
		BA2	7,6108508	4,4708767	,355	-5,180416	20,402118
		BA3	12,5200105	4,4708767	,056	-,271256	25,311277
	BA2	B	6,9212839	4,4708767	,434	-5,869983	19,712551
		BA1	-7,6108508	4,4708767	,355	-20,402118	5,180416
		BA3	4,9091597	4,4708767	,696	-7,882107	17,700427
	BA3	B	2,0121241	4,4708767	,969	-10,779143	14,803391
		BA1	-12,5200105	4,4708767	,056	-25,311277	,271256
		BA2	-4,9091597	4,4708767	,696	-17,700427	7,882107

*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.

Anexo 11. 7. Comparaciones múltiples entre los tratamientos B, BA1, BA2 y BA3 y su significancia en el pH final del agua residual del procesamiento del café

Variable dependiente: pH final							
(I) Tratamientos con biochar		Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%		
					Límite inferior	Límite superior	
Games-Howell	B	BA1	-2,33667*	.08861	.000	-2.6636	-2.0097
		BA2	-,57333*	.01542	.000	-.6302	-.5164
		BA3	-.04500	.01727	.155	-.1087	.0187
	BA1	B	2,33667*	.08861	.000	2.0097	2.6636
		BA2	1,76333*	.08994	.000	1.4387	2.0880
		BA3	2,29167*	.09027	.000	1.9675	2.6158
	BA2	B	,57333*	.01542	.000	.5164	.6302
		BA1	-1,76333*	.08994	.000	-2.0880	-1.4387
		BA3	,52833*	.02315	.000	.4573	.5993
	BA3	B	.04500	.01727	.155	-.0187	.1087
		BA1	-2,29167*	.09027	.000	-2.6158	-1.9675
		BA2	-,52833*	.02315	.000	-.5993	-.4573

Anexo 11. 8. Resultados de capacidad de adsorción y pH final del agua residual del procesamiento de café

		Repetición 1							
				Fecha:	17-Jul-18	Hora:	09:50	Código: R1	
Dosis	Código	Adsorbente (g)	Agua miel (l)	Clave	Co (mg/l)	pHo	Ce (mg/l)	pHf	Capacidad de adsorción (mg soluto/g adsorbente)
Dosis 1	D1	1.8062	0.120	BA1-D1-R1	15,952.2	3.94	14,377.0	4.99	104.6529
Dosis 2	D2	3.8020	0.120	BA1-D2-R1	15,952.2	3.94	12,835.5	6.90	98.3703
Dosis 3	D3	5.8042	0.120	BA1-D3-R1	15,952.2	3.94	12,316.0	7.57	75.1773
Dosis 4	D4	8.8022	0.120	BA1-D4-R1	15,952.2	3.94	11,712.8	6.78	57.7956
Dosis 5	D5	10.8087	0.120	BA1-D5-R1	15,952.2	3.94	13,137.1	6.71	31.2537
		Repetición 2							
				Fecha:	17-Jul-18	Hora:	09:50	Código: R2	
Dosis	Código	Adsorbente (g)	Agua miel (l)	Clave	Co (mg/l)	pHo	Ce (mg/l)	pHf	Capacidad de adsorción (mg soluto/g adsorbente)
Dosis 1	D1	1.8099	0.120	BA1-D1-R2	15,952.2	3.94	13,338.1	4.93	173.3201
Dosis 2	D2	3.8071	0.120	BA1-D2-R2	15,952.2	3.94	12,416.5	6.39	111.4455
Dosis 3	D3	5.8055	0.120	BA1-D3-R2	15,952.2	3.94	12,047.9	7.10	80.7021
Dosis 4	D4	8.8018	0.120	BA1-D4-R2	15,952.2	3.94	11,310.6	6.86	63.2816
Dosis 5	D5	10.8098	0.120	BA1-D5-R2	15,952.2	3.94	12,299.2	7.32	40.5521
		Repetición 3							
				Fecha:	18-Jul-18	Hora:	08:00	Código: R3	
Dosis	Código	Adsorbente (g)	Agua miel (l)	Clave	Co (mg/l)	pHo	Ce (mg/l)	pHf	Capacidad de adsorción (mg soluto/g adsorbente)
Dosis 1	D1	1.8088	0.120	BA1-D1-R3	15,952.2	4.08	13,639.8	4.63	153.4100
Dosis 2	D2	3.8043	0.120	BA1-D2-R3	15,952.2	4.08	13,489.0	5.78	77.6973
Dosis 3	D3	5.8043	0.120	BA1-D3-R3	15,952.2	4.08	13,237.6	6.38	56.1225
Dosis 4	D4	8.8026	0.120	BA1-D4-R3	15,952.2	4.08	13,003.0	6.37	40.2045
Dosis 5	D5	10.8024	0.120	BA1-D5-R3	15,952.2	4.08	12,634.4	6.60	36.8563
		Repetición 4							
				Fecha:	18-Jul-18	Hora:	08:00	Código: R4	
Dosis	Código	Adsorbente (g)	Agua miel (l)	Clave	Co (mg/l)	pHo	Ce (mg/l)	pHf	Capacidad de adsorción (mg soluto/g adsorbente)
Dosis 1	D1	1.8078	0.120	BA1-D1-R4	15,952.2	4.08	12,684.6	4.56	216.9001
Dosis 2	D2	3.8060	0.120	BA1-D2-R4	15,952.2	4.08	11,796.6	5.79	131.0226
Dosis 3	D3	5.8061	0.120	BA1-D3-R4	15,952.2	4.08	12,500.3	6.49	71.3436
Dosis 4	D4	8.8042	0.120	BA1-D4-R4	15,952.2	4.08	12,366.3	6.27	48.8753

Dosis	Código	Adsorbente (g)	Agua miel (l)	Clave	Co (mg/l)	pHo	Ce (mg/l)	pHf	Capacidad de adsorción (mg soluto/g adsorbente)
Dosis 5	D5	10.8050	0.120	BA1-D5-R4	15,952.2	4.08	12,416.5	6.82	39.2674
Repetición 5									
				Fecha:	19-Jul-18	Hora:	08:00	Código:	R5
Dosis	Código	Adsorbente (g)	Agua miel (l)	Clave	Co (mg/l)	pHo	Ce (mg/l)	pHf	Capacidad de adsorción (mg soluto/g adsorbente)
Dosis 1	D1	1.8090	0.120	BA1-D1-R5	15,952.2	4.03	13,053.3	4.81	192.2985
Dosis 2	D2	3.8054	0.120	BA1-D2-R5	15,952.2	4.03	11,494.9	5.58	140.5571
Dosis 3	D3	5.8056	0.120	BA1-D3-R5	15,952.2	4.03	11,629.0	6.35	89.3592
Dosis 4	D4	8.8057	0.120	BA1-D4-R5	15,952.2	4.03	13,656.5	6.26	31.2847
Dosis 5	D5	10.8077	0.120	BA1-D5-R5	15,952.2	4.03	12,550.6	6.45	37.7686

Anexo 11. 9. Informes de ensayos de la DQO después de la aplicación de las dosis estudiadas



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



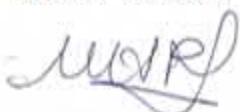
**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814752 - A**

GARAYCOCHEA MENDOZA DEL SOLAR ADRIAN
CALLE MONTE CARLO 212 DEPARTAMENTO 302
ENV / LB-344050-005
PROCEDENCIA : LAB - INGENIERIA AMBIENTAL

Fecha de Recepción SGS : 18-07-2018
Fecha de Ejecución : Del 18-07-2018 al 20-07-2018
Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
BA1-D1-R1
BA1-D2-R1
BA1-D3-R1
BA1-D4-R1
BA1-D5-R1
BA1-D1-R2
BA1-D2-R2
BA1-D3-R2
BA1-D4-R2
BA1-D5-R2

Emitido por SGS del Perú S.A.C.
Impreso el 20/07/2018



Rocío J. Manrique Torres
C.I.P. 136634
Coordinador de Laboratorio

Página 1 de 5



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814752 - A**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BA1-01-R1	BA1-02-R1	BA1-03-R1
FECHA DE MUESTREO					18/07/2018	18/07/2018	18/07/2018
HORA DE MUESTREO					08:00:00	08:00:00	08:00:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EW_AP4AS220D	mg/L	1.8	4.8	14.377.0	12.839.5	12.216.0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BA1-04-R1	BA1-05-R1	BA1-01-R2
FECHA DE MUESTREO					18/07/2018	18/07/2018	18/07/2018
HORA DE MUESTREO					08:00:00	08:00:00	08:00:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EW_AP4AS220D	mg/L	1.8	4.8	11.712.8	13.137.1	10.388.1

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BA1-02-R2	BA1-03-R2	BA1-04-R2
FECHA DE MUESTREO					18/07/2018	18/07/2018	18/07/2018
HORA DE MUESTREO					08:00:00	08:00:00	08:00:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EW_AP4AS220D	mg/L	1.8	4.8	12.416.8	12.047.9	11.810.8



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**

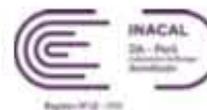


**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814752 - A**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BA1 06-R2
FECHA DE MUESTREO					18/07/2015
HORA DE MUESTREO					09:00:00
CATEGORIA					AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORIA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado
Análisis Fisicoquímicos					
Demanda Química de Oxígeno	EVI_APHAS2200	mg/L	1.8	4.5	12,250.2



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814752 - A**

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
 MB: Blanco del proceso
 LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso
 MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada
 MSD %RPD: Diferencia Potencial Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada
 Dup %RPD: Diferencia Potencial Relativa entre los duplicados del proceso

Parámetro	Unidad	LC	MB	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	4.5	<4.5	91 - 100%	90 - 101%	0 - 2%



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814752 - A**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHAS220D	Callao	Demanda Química de Oxígeno	SMWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D; 23rd Ed: 2017, Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method.

Notas:

El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.

Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.

Este documento es emitido por la Compañía bajo sus Condiciones Generales de Servicio, que pueden encontrarse en la página <http://www.sgs.com/ES/Inicio/Inicio.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su atención o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia, queda prohibida la reproducción parcial, salvo autorización escrita de SGS de Perú S.A.C.
Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s) y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas.

Última Revisión: Julio 2015

Página 5 de 5



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814837**

GARAYCOCHEA MENDOZA DEL SOLAR ADRIAN

CALLE MONTE CARLO 212 DEPARTAMENTO 302

ENV / LB-344050-006

PROCEDENCIA : LAB. ING. AMBIENTAL

Fecha de Recepción SGS : 19-07-2018

Fecha de Ejecución : Del 19-07-2018 al 23-07-2018

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
BA1-D1-R3
BA1-D2-R3
BA1-D3-R3
BA1-D4-R3
BA1-D5-R3
BA1-D1-R4
BA1-D2-R4
BA1-D3-R4

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 23/07/2018

Rocío J. Manrique Torres
C.I.P. 136634
Coordinador de Laboratorio



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814837**

Estación de Muestreo
BA1-D4-R4
BA1-D6-R4
C1-2
C1-3

11/10/2018



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814837**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BA1-01-R3	BA1-02-R3	BA1-03-R3
FECHA DE MUESTREO					19/07/2018	19/07/2018	19/07/2018
HORA DE MUESTREO					10:15:00	10:15:00	10:15:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHAS2200	mg/L	1.8	4.5	13.830.8	13.489.8	13.237.8

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BA1-04-R3	BA1-05-R3	BA1-01-R4
FECHA DE MUESTREO					19/07/2018	19/07/2018	19/07/2018
HORA DE MUESTREO					10:15:00	10:15:00	10:15:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHAS2200	mg/L	1.8	4.5	13.355.0	12.634.4	12.664.8

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BA1-02-R4	BA1-03-R4	BA1-04-R4
FECHA DE MUESTREO					19/07/2018	19/07/2018	19/07/2018
HORA DE MUESTREO					10:15:00	10:15:00	10:15:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHAS2200	mg/L	1.8	4.5	11.796.8	12.300.3	12.360.3

Página 3 de 6



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814837**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BA1-06-R4	C-2	C-3
FECHA DE MUESTREO					18/07/2018	18/07/2018	18/07/2018
HORA DE MUESTREO					10:15:00	10:15:00	10:15:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Físicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EIV_A11A52202	mg/L	1.8	4.5	12,415.5	15,018.8	13,952.2



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814837**

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
 MB: Blanco del proceso
 LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación, del cubón de proceso.
 MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
 MSD %RPD: Diferencia Percentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
 Dup %RPD: Diferencia Percentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	4.5	44.5	100%	99%	1%

Página 5 de 6.



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814837**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHAS220D	Callao	Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5020 D; 23rd Ed; 2017. Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method

Notas:

El reporte de tiempo se realizó en el sistema horario de 24 horas.

Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.

Este documento es emitido por la Compañía bajo sus Condiciones Generales de Servicio, que pueden encontrarse en la página <http://www.sgs.pe/bo-ES/TermsandConditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia, queda prohibida la reproducción parcial, salvo autorización escrita de SGS de Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s) y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas.

Última Revisión: Julio 2015



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814878**

GARAYCOCHEA MENDOZA DEL SOLAR ADRIAN

CALLE MONTE CARLO 212 DEPARTAMENTO 302

ENV / LB-344050-007

PROCEDENCIA : LAB. ING. AMBIENTAL

Fecha de Recepción SGS : 20-07-2018

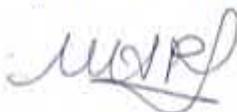
Fecha de Ejecución : Del 20-07-2018 al 24-07-2018

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
BA1-D1-R5
BA1-D2-R5
BA1-D3-R5
BA1-D4-R5
BA1-D5-R5

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 24/07/2018



Rocío J. Manrique Torres
C.I.P. 136634
Coordinador de Laboratorio

Página 1 de 4



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814878**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BA1-D1-RS	BA1-D2-RS	BA1-D3-RS
FECHA DE MUESTREO					29/07/2018	29/07/2018	29/07/2018
HORA DE MUESTREO					10:15:00	10:15:00	10:15:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos							
Demanda Química de Oxígeno	EIV_APHAS200	mg/L	1.8	4.5	13,562.3	11,494.8	11,629.2

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BA1-D4-RS	BA1-D5-RS
FECHA DE MUESTREO					29/07/2018	29/07/2018
HORA DE MUESTREO					10:15:00	10:15:00
CATEGORÍA					AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUBCATEGORÍA					AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado
Análisis Fisicoquímicos						
Demanda Química de Oxígeno	EIV_APHAS200	mg/L	1.8	4.5	13,666.5	12,850.6



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814878**

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
 MS: Rango de proceso
 LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso
 MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra asignada
 MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra asignada
 Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso

Parámetro	Unidad	LC	MS	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Retenido Químico de Plomo	mg/L	4.5	4.5	98 - 100%	95%	0%

Figura 3 de 4



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA1814878**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHAS220D	Callao	Demanda Química de Oxígeno	SMWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D; 23rd Ed; 2017; Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method

Notas:

El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.

Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.

Este documento es emitido por la Compañía bajo sus Condiciones Generales de Servicio, que pueden encontrarse en la página <http://www.sgs.net/ES/Topics/Info/Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia, queda prohibida la reproducción parcial, salvo autorización escrita de SGS de Perú S.A.C.
Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s) y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas.

Última Revisión Julio 2015

Página 4 de 4

Anexo 11. 10. Comparaciones múltiples entre las dosis D1, D21, D3, D4 y D5 y su significancia en el pH final del agua residual

Variable dependiente: pH final							
(I) Dosis de biochar			Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
Games-Howell	D1	D2	-1,30400*	.25793	.021	-2.3459	-.2621
		D3	-1,99400*	.25434	.003	-3.0190	-.9690
		D4	-1,72400*	.15385	.000	-2.2786	-1.1694
		D5	-1,99600*	.16996	.000	-2.6238	-1.3682
	D2	D1	1,30400*	.25793	.021	.2621	2.3459
		D3	-.69000	.34262	.339	-1.8737	.4937
		D4	-.42000	.27635	.586	-1.4519	.6119
		D5	-.69200	.28563	.219	-1.7318	.3478
	D3	D1	1,99400*	.25434	.003	.9690	3.0190
		D2	.69000	.34262	.339	-.4937	1.8737
		D4	.27000	.27300	.852	-.7463	1.2863
		D5	-.00200	.28239	1.000	-1.0272	1.0232
	D4	D1	1,72400*	.15385	.000	1.1694	2.2786
		D2	.42000	.27635	.586	-.6119	1.4519
		D3	-.27000	.27300	.852	-1.2863	.7463
		D5	-.27200	.19678	.654	-.9549	.4109
	D5	D1	1,99600*	.16996	.000	1.3682	2.6238
		D2	.69200	.28563	.219	-.3478	1.7318
		D3	.00200	.28239	1.000	-1.0232	1.0272
		D4	.27200	.19678	.654	-.4109	.9549

Anexo 11. 11. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento desarrollado por Aqueous Solutions

