

INFORME FINAL INVESTIGACIÓN

Evaluación de la Eficiencia del Biocarbón en el Tratamiento de Aguas Residuales del Beneficio Ecológico de Café en Pitalito, Huila

Yamileth Ortega Calderón
Efrén Vélez Chavarro

Docente:

Directora:
Doctora Elizabeth Carvajal Flórez
Codirectora:
Carolina Saldarriaga

Línea de Investigación:
Gestión del riesgo y Adaptación al cambio climático
Grupo de investigación: Centro de Altos Estudios en Cuencas Hidrográficas (CAECHI)
Universidad Santo Tomás
Bogotá D.C., Colombia
16 de diciembre de 2025

Contenido

1. RESUMEN	11
2. ABSTRACT.....	13
3. INTRODUCCIÓN.....	14
4. PROBLEMA	16
5. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	17
6. HIPÓTESIS	17
7. OBJETIVOS.....	18
7.1. General	18
7.2. Objetivos específicos	18
8. MARCO TEÓRICO.....	18
8.1 Aguas residuales del beneficio del café	18
8.2. Contaminación del agua.....	20
8.3. Biocarbón.....	21
8.4. Zoca de café	22
8.5. Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	23
8.5.1. Materia orgánica (DBO ₅ y DQO).....	23
8.5.2. Sólidos sedimentables (SS).	23
8.5.3. Sólidos Suspendidos Totales (SST).	24
8.5.4. Grasas y aceites.	24
8.5.5. pH	24
8.6. Sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA), eficiencia	25

8.6.3. Etapas del sistema SMTA	26
9. ANTECEDENTES O ESTADO DEL ARTE	28
10. METODOLOGÍA	32
10.1. Área de estudio de la investigación	32
10.5. Producción del Biocarbón	33
10.6. Selección de biocarbón para reemplazar la piedra filtro	34
10.7. Análisis físicoquímicos del Biocarbón.....	36
10.7.3. Métodos de Análisis del biocarbón.....	36
10.8. Aguas residuales del beneficio del café.....	40
10.9. Esquema experimental exploratorio	41
10.9.3. Condición de referencia:	42
10.9.4. Toma de muestras y caracterización.	46
10.9.5. Toma de alícuotas y aforo volumétrico del caudal	47
10.9.6. Cálculo del caudal y alícuotas para composición.....	47
10.9.7. Composición de la muestra	48
11. DATOS DE LOS ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	51
11.1. Análisis de las características del biocarbón	52
11.2. Resultados de parámetros <i>In situ</i>	56
11.2.1. Comportamiento del caudal, pH y temperatura a la entrada al sistema	56
11.2.2. Comportamiento del caudal a la salida del sistema con 80 y 100 litros de biocarbón. 57	
11.2.3. Comportamiento del pH a la salida del sistema con 80 y 100 litros de biocarbón.....	58
11.2.4. Comportamiento de la temperatura a la salida del sistema con 80 y 100 litros de biocarbón. 59	

11.3.	Resultados del análisis de laboratorio	60
12.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	63
12.1.	Análisis de las características del biocarbón en comparación con los resultados obtenidos de la remoción de contaminantes.....	64
12.2.	Análisis estadístico de las variables exógenas que pueden afectar los resultados.	70
12.2.1.	Caudal	70
12.2.2.	Temperatura	76
12.2.3.	Humedad	79
12.2.4.	Alícuotas	81
12.3.	Análisis de parámetros fisicoquímicos	84
12.3.1.	Potencial de Hidrogeno.....	84
12.3.2.	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	87
12.3.3.	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	88
12.3.4.	Sólidos sedimentables (SS)	89
12.3.5.	Grasas y Aceites	89
12.4.	Análisis de porcentaje de reducción	91
12.5.	Análisis descriptivo de los parámetros fisicoquímicos	93
12.5.1.	Análisis de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)	93
12.5.2.	Análisis de Sólidos Suspendidos Totales (SST)	94
12.5.3.	Análisis de Grasas y Aceites.....	96
12.5.4.	Sólidos suspendidos (SS)	97
12.6.	Análisis complementario de los datos	98
12.6.1.	Análisis complementario de los datos para DQO.....	100
12.6.2.	Análisis complementario de los datos para SST	101

12.6.3.	Análisis complementario de los datos para SS	103
12.6.4.	Análisis complementario de los datos para Grasa y Aceites	104
12.7.	Síntesis del análisis estadístico	106
13.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	106
13.1.	Condiciones ambientales (temperatura y humedad):	106
13.2.	Caudal	107
13.3.	Potencial de hidrógeno (pH).....	107
13.4.	Reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	107
13.5.	Remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Sedimentables (SS)	108
13.6.	Comportamiento de Grasas y Aceites	108
14.	RECOMENDACIONES	109
14.1.	Recomendaciones metodológicas.....	109
14.2.	Recomendaciones operativas y fisicoquímicas.....	110
14.3.	Recomendaciones para futuras líneas de investigación.....	110
15.	CONCLUSIONES	111
16.	BIBLIOGRAFÍA.....	113
17.	ANEXOS.....	120

Lista de Tablas

Tabla 1	<i>Norma de referencia para evaluar parámetros físicos y de humedad del biocarbón.</i>	36
Tabla 2	<i>Norma de referencia para evaluar la composición elemental del biocarbón.</i>	37
Tabla 3	<i>Norma de referencia para evaluar las propiedades químicas del biocarbón.</i>	37
Tabla 4	<i>Norma de referencia para determinación de HAP en suelo, lodos, biorresiduos tratados y residuos, utilizando cromatografía de gases (GC) y cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) ...</i>	38
Tabla 5	<i>Método por el cual fueron calculadas el área superficial y volumen de microporos del biocarbón</i>	38
Tabla 6	<i>Método utilizado para el análisis químico de los parámetros lignina, celulosa y hemicelulosa</i>	39
Tabla 7	<i>Parámetros para evaluar, Art. 9 de la Resolución 631 de 2015</i>	40
Tabla 8	<i>Niveles de tratamiento para el desarrollo de la investigación</i>	44
Tabla 9	<i>Cronograma de beneficio de café / monitoreo de aguas</i>	45
Tabla 10	<i>Resultados de análisis de las características del biocarbón de zoca de café</i>	52
Tabla 11	<i>Resultados de la medición de porosidad</i>	55
Tabla 12	<i>Resultados lignina, celulosa y hemicelulosa</i>	55
Tabla 13	<i>Resultados de análisis de laboratorio</i>	60
Tabla 14	<i>Porcentajes de remoción de carga contaminante</i>	62
Tabla 15	<i>Estadísticas descriptivas para caudal ($V/Tiempo$)- (l/s)</i>	72
Tabla 16	<i>Medias con intervalos de error estándar</i>	74
Tabla 17	<i>Estadísticas descriptivas para temperatura</i>	76
Tabla 18	<i>Estadísticas descriptivas para humedad</i>	79
Tabla 19	<i>Estadísticas descriptivas para alícuotas</i>	82

Tabla 20 Comparación de pH a la entrada del sistema (referencia), salida del sistema con biocarbón contrastándola con el límite legal.....	86
Tabla 21 Comparación de concentración Demanda Química de oxígeno (DQO) a la entrada del sistema y en dos diferentes configuraciones de salida, contrastándola con el límite legal	87
Tabla 22 Compara la concentración de Sólidos suspendidos totales (SST) a la entrada del sistema y en dos diferentes tratamientos a la salida del sistema, contrastándola con el límite legal.....	88
Tabla 23 Sólidos sedimentables a la entrada del sistema y en las configuraciones de salida con biocarbón	89
Tabla 24 Concentraciones de grasas y aceites en la entrada del sistema y las diferentes configuraciones con biocarbón	90
Tabla 25 Análisis descriptivo del parámetro DQO considerando media y variedad	93
Tabla 26 Análisis descriptivo del parámetro SST considerando media y variedad.....	95
Tabla 27 Análisis descriptivo del parámetro Grasas y Aceites considerando media y variedad...	96
Tabla 28 Análisis descriptivo del parámetro SS considerando media y variedad.....	98
Tabla 29 Evaluación exploratoria de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas	99
Tabla 30 Resultados de la prueba ANOVA para DQO por Tratamiento	100
Tabla 31 ANOVA para SST por Tratamiento	101
Tabla 32 Medias y variabilidad para SST por Tratamiento.....	102
Tabla 33 Análisis de varianza (ANOVA) para SS.....	103
Tabla 34 Análisis de varianza (ANOVA) para Grasas y Aceites	104

Lista de figuras

Figura 1. Sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA) 400.....	27
Figura 2. Ubicación geoespacial finca el Abismo	33
Figura 3. Proceso de producción del biocarbón en el horno kontiki	34
Figura 4. Tamizaje y selección del biocarbón	35
Figura 5. Reemplazo de la piedra filtro por biocarbón en la recámara dosificadora	36
Figura 6. Cálculo de alícuotas, calibración de equipos y purga de recipientes	49
Figura 7. Composición de la muestra y empackado.....	49
Figura 8. Composición de la muestra y empackado.....	50
Figura 9. Composición de muestra y empackado	51
Figura 10. Aumento del caudal a la entrada sistema	56
Figura 11. Evolución del pH a la entrada sistema	57
Figura 12. <i>Variación de temperatura</i>	57
Figura 13. Comportamiento del caudal	58
Figura 14. Comportamiento del pH.....	59
Figura 15. Comportamiento de la temperatura	60
Figura 16. Distribución de datos mediante gráfico de caja y bigotes para el caudal del sistema..	75
Figura 17. Distribución de datos mediante gráfico de caja y bigotes para la temperatura	78
Figura 18. Distribución de datos mediante gráfico de caja y bigotes para la humedad.....	81
Figura 19. Distribución de datos mediante gráfico de caja y bigotes para las alícuotas.....	83
Figura 20. Eficiencia de remoción por parámetro con biocarbón	92
Figura 21. Comparación de DQO con barras de error (desviación estándar).	94
Figura 22. Comparación de SST con barras de error (desviación estándar).	96
Figura 23. Comparación de Grasas y Aceites con barras de error (desviación estándar).	97



Figura 24. Comparación de SS con barras de error (desviación estándar)	98
---	----

Índice de anexos

Anexo A. Carta de autorización.....	120
Anexo B. Análisis fisicoquímico del biocarbón, laboratorio EUROFIS – UMWELT de Alemania	122
Análisis fisicoquímico del biocarbón, laboratorio EUROFIS – UMWELT de Alemania-español	126
Anexo C. Análisis fisicoquímico del biocarbón, laboratorio Universidad Nacional de Colombia, Facultad Ciencias de la Energía.....	130
Anexo D. Análisis de agua residual laboratorio AMBILAB SAS.....	133
Anexo E. Formatos de captura de datos de campo y cadena de custodia	141
Anexo F. Oficio laboratorio AMBILAB SAS	153

1. RESUMEN

El presente estudio evaluó la eficiencia del biocarbón obtenido a partir de la zoca del café, en el tratamiento de las aguas residuales del beneficio ecológico del café, mediante su aplicación en la recámara dosificadora de un Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA) 400, bajo condiciones reales de operación.

Se analizaron parámetros fisicoquímicos como Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Sedimentables in situ (SS) y Grasas y Aceites, utilizando un ensayo exploratorio con dos niveles de tratamiento (80 litros y 100 litros de biocarbón). El promedio de caudal de agua residual de café tratado por el sistema fue de 0.012 l/s, dato generado del trabajo de campo.

Los resultados obtenidos sugieren tendencias de reducción para DQO de 47.245 mg-L O₂ equivalente al 66%; para SST, se obtuvo 39.330 mg/L donde se observaron reducciones aparentes hasta del 96%; en SS 19 mg/L, lo que representa un 95% de remoción; y para Grasas y Aceites se registraron 1.560 mg/L, correspondiente al 87% ; aunque se observaron reducciones notables en la carga contaminante, los valores obtenidos no cumplieron con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 631 de 2015.

El análisis se realizó mediante estadística descriptiva y herramientas exploratorias por lo que los resultados deben interpretarse como indicativos de tendencias y no como evidencia concluyente. Por lo tanto, los resultados sugieren que el biocarbón obtenido de zoca de café podría poseer potencial como material adsorbente, aunque se requiere optimización del sistema y diseños experimentales con replicación para validar su eficiencia.

Debido a la ausencia de réplicas experimentales independientes, los resultados deben interpretarse bajo un enfoque exploratorio y descriptivo; por lo que los hallazgos representan tendencias preliminares y no evidencia estadísticamente concluyente.

Palabras clave/keywords: Agua residual; biocarbón; café; SMTA; zoca de café.

2. ABSTRACT

This study evaluated the efficiency of biochar derived from coffee stubble in treating wastewater from eco-friendly coffee processing, through its application in the dosing chamber of a 400-series Modular Anaerobic Treatment System (SMTA), under real operating conditions.

Physicochemical parameters such as Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS), in situ Settleable Solids (SS), and Fats and Oils were analyzed using an exploratory assay with two treatment levels (80 liters and 100 liters of biochar). The average flow rate of coffee wastewater treated by the system was 0.012 l/s, a value derived from fieldwork.

The results suggest reduction trends for COD of 47.245 mg-L O₂, equivalent to 66%; for TSS, 39.330 mg/L was obtained, with apparent reductions of up to 96%; for SS, 19 mg/L was recorded, representing 95% removal; and for Fats and Oils, 1.560 mg/L was registered, corresponding to 87%. Although notable reductions in the pollutant load were observed, the values obtained did not comply with the maximum permissible limits established in Resolution 631 of 2015.

The analysis was conducted using descriptive statistics and exploratory tools; therefore, the results should be interpreted as indicative of trends rather than conclusive evidence. Consequently, the findings suggest that biochar obtained from coffee stubble could have potential as an absorbent material, although system optimization and experimental designs with replication are required to validate its efficiency.

Due to the absence of independent experimental replicates, the results should be interpreted under a descriptive and exploratory approach; thus, the findings represent preliminary trends and not statistically conclusive evidence.

Keywords: Wastewater; biochar; coffee; SMTA; coffee stubble.

3. INTRODUCCIÓN

La caficultura es uno de los sectores más representativos de la economía colombiana. En el año 2023, la producción nacional alcanzó los 10,6 millones de sacos de 60 kg de café verde, mientras que el consumo interno fue de 2,2 millones de sacos (Federación Nacional de Cafeteros, 2023). Según el sistema de información cafetero (SICA), en ese mismo año, el departamento del Huila registró 85.929 familias caficultoras y una producción de 2.237.400 sacos de café excelso¹ de 60 kg (Comité de Cafeteros del Huila, 2023). Si bien es una actividad agrícola importante tanto histórica como culturalmente, que abarca el cultivo, producción y comercialización del café, también ejerce una fuerte presión sobre los recursos hídricos debido al manejo inadecuado de sus subproductos. Una hectárea de café sembrada produce 376 kilogramos de mucilago en beneficio húmedo, esta cantidad de mucilago al mezclarse con agua genera una contaminación comparable a la de una comunidad de 310.000 habitantes al año, y se estima que por cada kilo de café cereza se produce 910 milímetros de aguamiel (Burbano et al., 2019).

En el año 2015, Ramírez Gómez y colaboradores, realizaron un estudio a través del centro de investigación del café (CENICAFÉ), donde encontraron que el 72% de la carga contaminante generada en este proceso corresponde a un valor de DQO de 82.080 mg.kg⁻¹ de café cereza (cc) al despulpado y transporte de la pulpa con agua. El 28 % restante proviene de la contaminación generada por las aguas del lavado del café, con un valor de DQO aproximado de 31.920 mg.kg⁻¹. Lamentablemente en la mayoría de las fincas cafeteras, las aguas residuales son vertidas directamente a las fuentes hídricas y al suelo sin ningún tipo de tratamiento (Ramírez Gómez et al., 2015). El Estudio Nacional del Agua (ENA 2018) confirma que el sector cafetero aporta a

¹ Grano seleccionado por su calidad, tamaño y uniformidad que son criterios de exportación.

nivel nacional un promedio de 40.279 t/a de DBO, 83.377 t/a de DQO y 51.01 t/a de SST, cargas que potencialmente son vertidas a las corrientes de agua superficial (García Herrán et al., 2019).

Para el tratamiento de estas aguas residuales, CENICAFE diseñó la tecnología denominada Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio-SMTA, la cual prometía una eficiencia de remoción de carga orgánica superior al 80% de la DBO₅, buscando así el cumplimiento del decreto 1594 de 1984 (Zambrano Franco et al., 2006). Sin embargo, en 2023, la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca realizó una evaluación de un SMTA y determinó que su eficiencia de remoción de carga contaminante, para temporada de cosecha baja y media, no cumple con lo dispuesto en la resolución 631 del 2015 (López Ibarra, 2023). Para el año 2017, la Universidad Nacional Abierta y a Distancia -UNAD CCAV Pitalito realizó una investigación donde se evaluó la eficiencia del SMTA con tecnología tanque tina, arrojando valores en el primer lavado de DQO entre 12.233,3 y 49.566,67, DBO entre 3.920,00 y 31.140,00 y SST entre 2.00,00 y 10.500,0 (Samboní, 2017); que no cumplen con la norma citada.

Por lo anteriormente mencionado, la presente investigación evaluó la eficiencia del biocarbón como un material innovador en la remoción de contaminantes y cargas orgánicas, gracias a su alta área superficial y estructura porosa, el biocarbón puede absorber una amplia gama de contaminantes, incluyendo compuestos orgánicos y sólidos (Présiga-lópez et al., 2021).

El biocarbón obtenido de la zoca de café incorporado en la recámara dosificadora del sistema, sugirió un comportamiento favorable en la remoción de concentración de sustancias contaminantes, respecto a la carga inicial como referencia. Al comparar los resultados obtenidos a la salida del sistema con la incorporación de 100 litros de biocarbón se observaron tendencias de remoción del 66% de DQO; 96% de SST; 95% de SS; y para grasas

y aceites un 87%. Aunque se observaron porcentajes importantes de remoción, estos no son suficientes para cumplir con la normativa ambiental vigente.

Esta investigación se llevó a cabo en la finca el Abismo, ubicada en la vereda Monte Bonito del municipio de Pitalito, Huila, con beneficio ecológico dotado de un hidrolavador.

El objetivo de la investigación fue evaluar la eficiencia del biocarbón, como alternativa para cumplir con los parámetros fisicoquímicos (pH, DQO, SST, SS, y grasas y aceites) estipulados en el artículo 9 de la Resolución 631 de 2015, la norma ambiental colombiana vigente.

4. PROBLEMA

En estudio realizado por la estudiante Garzón Martínez, (2020), de ingeniería industrial de la Universidad de Santander, revela que, las aguas residuales producto del beneficio húmedo del café, si bien son biodegradables, poseen características fisicoquímicas que resultan particularmente agresivas con el medio ambiente. Estas aguas presentan una alta concentración de materia orgánica, medida en términos de Demanda Química de Oxígeno (DQO), que oscila entre 15.000 y 30.000 ppm en las aguas mieles y entre 60.000 y 120.000 ppm en los lixiviados de la mezcla pulpa-mucílago. Además, se caracteriza por un pH bajo o alta acidez. Estos factores en conjunto representan un alto impacto ambiental para los ecosistemas receptores (Garzón Martínez, 2020).

En el año 2015, Ramírez Gómez y colaboradores, realizaron un estudio a través del Centro de Investigación del Café (CENICAFÉ), donde encontraron que el 72% de la carga contaminante generada en este proceso corresponde a un valor de DQO de $82.080 \text{ mg.kg}^{-1}$ de café cereza (cc), proveniente del despulpado y transporte de la pulpa con agua. El 28 % restante

se atribuye a la contaminación generada por las aguas del lavado del café, con una DQO aproximada de $31.920 \text{ mg.kg}^{-1}$.

Esta actividad genera una importante contaminación en el recurso hídrico, y la problemática se agrava dado que, en la mayoría de las fincas cafeteras, las aguas residuales son vertidas a fuentes hídricas y al suelo sin ningún tipo de tratamiento (Ramírez Gómez et al., 2015).

Aunque existen sistemas de tratamiento como el SMTA, su cumplimiento con la normativa vigente es incompleto, dejando sin remover una fracción significativa de contaminantes. En este contexto, el biocarbón producido a partir de la pirólisis de biomasa, como la zoca de café, se perfila como una alternativa favorable para remoción de cargas contaminantes. Sin embargo, hasta la fecha no se han realizado estudios que evalúen sistemáticamente la eficiencia del biocarbón de zoca de café para reemplazar la piedra filtro de la recámara dosificadora de un sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA 400) en el tratamiento de aguas mieles, constituyendo una brecha crítica en la investigación aplicada al sector cafetero.

Por lo tanto, esta investigación se centra en determinar la eficiencia del biocarbón obtenido de la zoca de café para la remoción de contaminantes en las aguas mieles del café, cuando se incorpora en la recámara dosificadora de un sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA 400).

5. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es la eficiencia de remoción de contaminantes del agua residual del beneficio ecológico de café por tratamiento con biocarbón obtenido de la zoca del café?

6. HIPÓTESIS

El biocarbón obtenido de la zoca del café presenta potencial para favorecer la remoción de contaminantes en aguas residuales del beneficio ecológico del café, en relación con los

parámetros establecidos en la Resolución 631 de 2015.

7. OBJETIVOS

7.1. General

Evaluar la eficiencia del biocarbón obtenido a partir de la zoca del café en el tratamiento de las aguas residuales del beneficio ecológico del café, en el área influencia de la cuenca del Río Guarapas municipio de Pitalito, departamento del Huila.

7.2. Objetivos específicos

Determinar las características fisicoquímicas del biocarbón obtenido a partir de la zoca de café a través de procesos físicos y térmicos.

Caracterizar los vertimientos del beneficio húmedo del café tratados con biocarbón en el SMTA 400, para verificar su cumplimiento frente a los límites permisibles de la resolución 631 del 2015.

8. MARCO TEÓRICO

8.1 Aguas residuales del beneficio del café

Las aguas mieles, que resultan del beneficio húmedo del café, son un subproducto generado durante los procesos de despulpado y lavado. Aunque son biodegradables, constituyen una amenaza ambiental considerable debido a sus propiedades fisicoquímicas adversas (Garzón Martínez, 2020). Su elevada concentración de materia orgánica, cuantificada a través de la DQO, alcanza valores que oscilan entre 15.000 y 30.000 ppm en las aguas mieles y de 60.000 a 120.000 ppm en los lixiviados de la mezcla de pulpa y mucílago. Estas características, sumada a su bajo pH, que indica una alta acidez, causan un impacto negativo de gran magnitud en los ecosistemas acuáticos que reciben estos vertidos (Garzón Martínez, 2020).

El proceso de beneficio húmedo del café, si bien es fundamental para la calidad del

grano, genera un volumen considerable de aguas mieles. Estas aguas, ricas en materia orgánica, presentan altos niveles de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5) y Demanda Química de Oxígeno (DQO), además de otros contaminantes como grasas, aceites y sólidos suspendidos. La investigación realizada en la vereda El Cascajal del municipio de Timaná, departamento del Huila por (Guzmán Julier Patricia, 2021), evidenció que en unidades productivas que carecen de sistemas de tratamiento para estas aguas, los parámetros fisicoquímicos superan ampliamente los límites permisibles establecidos por la Resolución 0631/2015, afectando significativamente la calidad del recurso hídrico.

Los resultados del análisis fisicoquímico en la unidad productiva El Recodo, que no cuenta con tratamiento de aguas mieles, mostraron valores excesivamente altos en DBO5, DQO, grasas y aceites, y sólidos suspendidos totales. El pH ácido y la alta carga contaminante sugieren la viabilidad de procesos biológicos de biorremediación, pero también subrayan la urgente necesidad de implementar sistemas de tratamiento que permitan corregir el pH y estabilizar los sólidos (Guzmán Julier Patricia, 2021). La falta de tratamiento adecuado no solo deteriora la calidad del agua, sino que también afecta negativamente los ecosistemas dulceacuícolas, la flora y la fauna, alterando el cauce de las fuentes hídricas como la quebrada Las Vueltas.

Por otro lado, las unidades productivas que sí implementan sistemas de tratamiento de aguas mieles o sistemas de beneficio ecológico, como la unidad Las Vueltas (Lote 3) con el sistema Ecomill, demuestran una reducción significativa en la carga contaminante y un menor consumo de agua. Esto resalta la importancia de adoptar prácticas más sostenibles en el beneficio del café para mitigar los impactos ambientales y proteger el recurso hídrico (Guzmán Julier Patricia, 2021).

8.2. Contaminación del agua

El agua es un recurso vital para el sustento de la vida en el planeta. Sin embargo, a nivel mundial, enfrena grandes desafíos debido a su escasez y al deterioro de su calidad. Según (Cely Calixto et al., 2023), la contaminación del agua se define como la alteración de sus características físicas, químicas y microbiológicas.

Este fenómeno ocurre por el vertimiento de residuos sólidos no biodegradables, hidrosolubles, químicos y aguas residuales domésticas e industriales sin tratamiento previo, lo afecta directamente la salud humana y la de los ecosistemas (Pérez-Osorio et al., 2025).

La revisión sistemática, publicada en enero de 2024, por la doctora Angelita Dolores de Jesús Ramos, analiza los efectos del consumo de agua contaminada en la calidad de vida de las personas, sugiriendo que la presencia de diversos contaminantes puede desencadenar una serie de patologías con repercusiones significativas en la salud pública.

Los hallazgos de la investigación destacan que los principales agentes contaminantes del agua de consumo humano provienen de heces humanas y animales, así como de aguas residuales, afectando fuentes hídricas superficiales y subterráneas. Entre estos contaminantes, las bacterias del grupo coliforme se identifican como indicadores clave de la contaminación fecal y un riesgo inminente para la salud. La ingesta de agua contaminada se asocia directamente con un incremento de enfermedades gastrointestinales, incluyendo diarrea aguda, cólera, disentería, fiebre tifoidea y hepatitis, patologías que impactan negativamente el bienestar individual y colectivo, especialmente en poblaciones vulnerables (Ramos Mancheno, 2024).

Además de los contaminantes microbiológicos, el estudio señala la presencia

de residuos tóxicos, minerales y productos químicos derivados de actividades industriales y agrícolas, los cuales pueden generar patologías graves como daños hepáticos, intoxicación sanguínea y alteraciones neurológicas (Ramos Mancheno, 2024). La problemática de la contaminación hídrica se agrava en áreas con infraestructura deficiente para el tratamiento de aguas residuales, donde el vertimiento directo de desechos incrementa la carga contaminante y la exposición a riesgos.

En este contexto, la búsqueda de soluciones efectivas y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales se torna imperativa. Si bien el artículo se enfoca en los efectos de la contaminación, sus conclusiones sobre los tipos de contaminantes y las enfermedades asociadas sientan las bases para comprender la magnitud del problema. La evidencia recopilada subraya la necesidad de implementar estrategias de saneamiento y purificación que no solo eliminen los patógenos y sustancias nocivas, sino que también contribuyan a la restauración de la calidad del agua, promoviendo así una mejora sustancial en la salud y la calidad de vida de las comunidades. La investigación realizada proporciona un panorama general de la problemática, la cual será profundizada en el presente estudio al evaluar la eficiencia de un método específico, como el biocarbón, para el tratamiento de aguas residuales en el contexto específico del beneficio ecológico del café.

8.3. Biocarbón

El Biocarbón se produce mediante pirólisis, un proceso de combustión de biomasa (como residuos de cosecha o árboles) sin oxígeno y altas temperaturas (Mondragón-Sánchez et al., 2021). Su uso principal es mejorar la calidad del suelo, ya que incrementa la retención de agua y nutrientes, y fomenta la actividad microbiana. Además, contribuye a la lucha contra el cambio climático, al secuestrar carbono y reducir los gases de efecto invernadero (Pérez-Cabrera et al.,

2021)

Este material es un sólido negro y poroso, cuya estructura varía según su origen y el proceso de pirólisis. Como enmienda para el suelo, el biocarbón mejora la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.), eleva el pH y facilita el reciclaje de nutrientes para las plantas (López Zawada & Moreno Ospina, 2020). Además, su estructura porosa le confiere otras aplicaciones, como retención de agua y la absorción (Flammini et al., 2020).

La versatilidad del biocarbón como adsorbente resulta de gran importancia para el sector agrícola en la remoción de plaguicidas, donde mecanismos de interacción de Van der Waals y enlaces de hidrogeno permiten absorción de moléculas orgánicas (Dong et al., 2024).

El biocarbón permite la utilización de sus facultades mediante el ajuste de la materia prima y los parámetros de la pirólisis, maximizando su eficiencia. Las propiedades físicas incluyen la densidad, resistencia mecánica, una compleja porosa (microporos, mesoporos y macroporos), son determinantes para la retención hídrica y la capacidad de alojamiento de moléculas contaminantes; desde la perspectiva química, la reactividad del biocarbón está ligada a su temperatura de formación, la cual define variables químicas como el PH, CIC y la abundancia de los grupos funcionales superficiales. La presencia de estructuras aromáticas hidroxilos y carboxilos facilitan la interacción y captura de diversos contaminantes (Kazemi Shariat Panahi et al., 2020)

8.4. Zoca de café

En Colombia, los cafetales suelen finalizar su ciclo productivo entre los cinco y siete años. A medida que las plantas envejecen, su actividad disminuye debido a la reducción en la formación de ramas y nudos. Para contrarrestar este efecto, se utiliza la poda de zoca, una práctica que estimula el tejido vegetal con el fin recuperar la capacidad de producción (Rendón et

al., 2023)

La zoca consiste en cortar el tallo de la planta de café a 30 cm del suelo, lo que promueve la aparición de nuevos brotes. De estos, se selecciona entre 1 y 2 por sitio. Esta labor se realiza durante el periodo seco, una vez que la cosecha principal ha finalizada (Rendón, 2019)

8.5. Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Para mitigar los impactos negativos causados por la actividad cafetera en las fuentes hídricas, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, mediante la resolución 631 de 2015, artículo 9, estableció los parámetros y valores límites máximos permisibles para los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticos en cuerpos de agua superficiales. Los principales parámetros evaluados son:

8.5.1. Materia orgánica (DBO_5 y DQO).

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) son dos parámetros del agua que permiten conocer la cantidad de materia orgánica presente en las aguas residuales, siendo variables fundamentales para caracterizar el estado de un cuerpo de agua.

La DBO: Es la cantidad de oxígeno medida en mg/L, que los organismos unicelulares (bacterias) necesitan para descomponer la materia orgánica bajo condiciones de prueba (Galindo, 2022).

DQO: Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente toda la materia orgánica que se encuentra en una muestra (Galindo, 2022).

8.5.2. Sólidos sedimentables (SS).

Este parámetro predice la sedimentación en cuerpos receptores. Los sólidos sedimentables (SS) representan la fracción de partículas que se depositan por gravedad en un periodo

determinado y permiten predecir el comportamiento de sedimentación en los cuerpos de agua receptores. Su presencia en exceso puede generar acumulación de sedimentos, afectar la morfología del cauce y alterar procesos ecológicos asociados al flujo y a los organismos bentónicos (Pérez Osorio, y otros, 2025) .

8.5.3. Sólidos Suspendidos Totales (SST).

El SST es el material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual. En grandes cantidades, los sólidos afectan la calidad del agua, ya que se depositan en el fondo, cubriendo organismos acuáticos, huevos, o larvas de macroinvertebrados. Esto impide la transferencia de oxígeno, lo que puede provocar la muerte de estos organismos (Galindo, 2022).

8.5.4. Grasas y aceites.

Las grasas y los aceites son sustancias orgánicas de origen animal, vegetal o mineral. Estos compuestos pueden ser solubles o insolubles en agua y su presencia puede causar problemas en los cuerpos de agua naturales. Pueden formar una capa sobre la superficie que impide el intercambio de oxígeno entre el agua y la atmósfera. Esta falta de oxígeno puede llevar a la muerte de especies acuáticas y alterar el equilibrio de los ecosistemas (Instituto del Agua, n.d.)

8.5.5. pH

Es el valor que determina si una sustancia es ácida, neutra o básica, y se calcula con base en la cantidad de iones de hidrógeno presentes. Se mide en una escala de 0 a 14, donde 7 indica que la sustancia es neutra. Los valores por debajo de 7 señalan que es ácida, mientras que valores por encima de 7 indica que es básica (Galindo, 2022, pág. 7).

8.6. Sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA), eficiencia

La creciente preocupación por la calidad del agua y la sostenibilidad ambiental ha impulsado la búsqueda de tecnologías eficientes para el tratamiento de aguas residuales en el sector agropecuario, especialmente en la industria del café. En este contexto, los Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio (SMTA) han emergido como una alternativa prometedora para abordar esta problemática.

El Centro Nacional de Investigaciones del Café (CENICAFÉ) desarrolló en los años 90 una tecnología para la purificación de las aguas mieles del café. El objetivo era cumplir con los límites de descarga de beneficio húmedo establecido por la normativa colombiana (Decreto 1594 de 1984). Cuyo objetivo era que esta tecnología lograra una remoción de hasta el 90 % de la carga contaminante de las aguas mieles (Zambrano Franco et al., 2006).

Investigaciones recientes, como la realizada por Duran Barragan y Angulo de Castro (2022), han evaluado la eficiencia de diversas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales del beneficio húmedo del café, con un enfoque particular en las soluciones aplicables a pequeños productores. Los resultados de dicho estudio, que empleó un enfoque cualitativo y un análisis multicriterio (ambiental, técnico, económico y social), destacaron a los SMTA como las opciones más favorables. Se encontró que estos sistemas ofrecen un buen desempeño ambiental, un bajo costo económico y una buena eficacia técnica, además de no generar afectaciones sociales negativas.

Según esta investigación, los SMTA, cuando operan correctamente han mostrado capacidad de remoción hasta del 80%, lo que en su momento permitió cumplir con el decreto 1594 del 1984. El estudio también señala que la combinación de los SMTA con tratamientos adicionales, como filtros de gravas de flujo ascendente o humedales artificiales, potencia aún más

la remoción de contaminantes y ofrece la posibilidad de reutilizar el agua tratada para actividades agrícolas, promoviendo así un ciclo de producción más sostenible.

La aplicabilidad de los SMTA, y sus combinaciones con sistemas de post-tratamiento, se considera viable tanto técnica, ambiental, económica como socialmente para los pequeños caficultores. Estos sistemas no solo contribuyen a la protección de los recursos hídricos, sino que también permiten a los productores mejorar la gestión ambiental de sus cultivos y optimizar el uso del agua (Duran-Barragan & Angulo-De-Castro, 2022). La presente investigación se basó en estos hallazgos para evaluar la eficiencia del biocarbón como material adsorbente en el tratamiento de las aguas residuales del beneficio ecológico del café, comparando su potencial con las ventajas ya demostradas por los SMTA en la remoción de contaminantes.

8.6.3. Etapas del sistema SMTA

La primera etapa del Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA) es la trampa de pulpas, que retiene los sólidos más grandes proveniente del tanque de fermentación y lavado del café para evitar que interfieran en las fases posteriores del sistema. Luego, la etapa de hidrólisis acidogénica, se procesan compuestos inorgánicos y orgánicos complejos, como carbohidratos, lípidos y proteínas. Estos son hidrolizados por enzimas secretadas por bacterias (celulosa, lipasa, amilasa y bacterias de fermentación), lo que permite que dichas bacterias aprovechen carbono y la energía a medida que el tamaño de las partículas disminuye. En esta misma etapa, los microorganismos y bacterias fermentativas transforman productos como aminoácidos y azúcares en compuestos orgánicos más simples, como el etanol y ácido láctico. También se produce hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético, que pueden ser utilizado por bacterias metanogénicas (Zambrano Franco et al., 2006).

La tercera etapa es la cámara de dosificación. Con la ayuda de un filtro de grava de diferentes tamaños, esta cámara retiene la materia orgánica insoluble no hidrolizable y otras impurezas que hayan superado la fase previa. Además, dosifica un caudal entre 500 y 600 ml por minuto hacia la etapa metanogénica del SMTA (Zambrano Franco et al., 2006).

Finalmente, el tratamiento metanogénico es el componente final del SMTA, donde se completa la biodegradación de la materia orgánica. Los resultados de las etapas previas se degradan anaeróbicamente. "Este proceso lo llevan a cabo bacterias metanogénicas en el estiércol de vaca, que descomponen el hidrógeno y el ácido acético para producir dióxido de carbono y metano" (Zambrano Franco et al., 2006).

La figura 1 muestra los componentes del sistema modular de tratamiento anaerobio de aguas mieles (SMTA) 400, ubicado en la finca el Abismo del municipio de Pitalito.



Figura 1. Sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA) 400

Fuente: trabajo de campo (2024).

9. ANTECEDENTES O ESTADO DEL ARTE

Diferentes investigaciones han demostrado la eficiencia del Biocarbón para el tratamiento de aguas residuales.

En un estudio realizado por Carvajal Flórez y Marulanda en el 2019, se evaluó el uso de residuos de café como biosorbente para la remoción de metales pesados en aguas residuales, concluyendo que esta alternativa representa una tecnología eficiente y de bajo costo, con remociones de hasta el 90% (Carvajal Flórez, 2019). Este hallazgo crea expectativas para la evaluar la eficiencia del Biocarbón a partir de la zoca de café.

En este mismo año, el grupo de Fatta-Kassinis caracterizó biocarbones obtenidos mediante pirólisis lenta (550 °C, 1.5 h, atmósfera de nitrógeno) a partir de tres biodesperdicios: biosólidos urbanos (BDB), estiércol bovino (MDB) y residuos de café (SCGDB). Los resultados mostraron que el rendimiento de biocarbón dependió fuertemente del tipo de materia prima, con MDB generando el mayor rendimiento (41.6%) en comparación con BDB y SCGDB (~20%). Todos los biocarbón fueron altamente alcalinos (pH 9.4–10.4) y exhibieron incrementos sustanciales en área superficial respecto a los materiales crudos ($<0.1 \text{ m}^2/\text{g}$), alcanzando $14.03 \text{ m}^2/\text{g}$ en MDB, $3.98 \text{ m}^2/\text{g}$ en BDB y $1.53 \text{ m}^2/\text{g}$ en SCGDB. La pirólisis incrementó notablemente el contenido de carbono, especialmente en SCGDB (87.4%), y redujo la relación hidrógeno/carbono (H/C , <0.4), lo que indicó elevada aromaticidad, grado de condensación y estabilidad química del carbono. El análisis FTIR identificó grupos funcionales como O–H, N–H, C–H alifáticos y aromáticos, C=O y Si–O, asociados con distintos mecanismos potenciales de adsorción de contaminantes. Además, el biocarbón presentaron alta estabilidad térmica, baja humedad (2.4–5.2%) y propiedades adecuadas para aplicaciones ambientales, incluyendo enmienda de suelos, secuestro de carbono y adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Según los autores, las características fisicoquímicas y estructurales demostraron que estos biocarbón, especialmente MDB y SCGDB, son candidatos prometedores para aplicaciones agrícolas y de remediación ambiental (Muoghalu et al., 2023).

En 2021, Al-awadhi y colaboradores, utilizaron grano de café molido usado (*spent coffee grounds*, SCG), un residuo abundante y económico, para producir adsorbentes eficaces mediante pirólisis para aplicaciones en tratamiento de aguas. En su estudio, los SCG se pirolizaron a 300, 450 y 600 °C, generando biocarbones con mayor contenido de carbono, mayor alcalinidad, mayor carbono fijo y una estructura más estable en comparación con la biomasa original. Entre las muestras evaluadas, el biocarbón producido a 450 °C mostró las propiedades de adsorción más favorables, incluyendo la mayor capacidad de intercambio catiónico, el potencial zeta más negativo, alta conductividad eléctrica y una sobresaliente capacidad de retención de aceite, lo que lo hace especialmente eficaz para captar cationes y contaminantes orgánicos. El biocarbón producido a 600 °C presentó mejoras similares. En conjunto, los resultados resaltan que los SCG son una biomasa prometedora para producir adsorbentes carbonosos de bajo costo destinados al tratamiento de agua y aguas residuales (Al-Awadhi et al., 2022).

El biocarbón obtenido a partir de residuos de café también ha sido evaluado para la remoción de contaminantes farmacéuticos. En 2022 se reportó un estudio que demostró que estos residuos pueden transformarse en un biocarbón altamente eficiente mediante pirólisis a 800 °C en atmósfera de argón, generando un adsorbente de bajo costo para la eliminación de fármacos hidrosolubles en aguas residuales. El material resultante presentó mejoras notables respecto a la biomasa sin tratar, mostrando un elevado contenido de carbono (84.06%), una estructura mesoporosa (≈ 8.5 nm) y una superficie específica considerable (232 m²/g). Las capacidades de adsorción obtenidas fueron de 40.47 mg/g para ácido salicílico, 38.52 mg/g para diclofenaco y

75.46 mg/g para cafeína. Los resultados cinéticos se ajustaron al modelo de pseudo-segundo orden, mientras que los datos de equilibrio siguieron la isoterma de Temkin, lo que sugiere interacciones específicas entre las moléculas adsorbidas y la superficie del biocarbón. En conjunto, estos hallazgos destacan el potencial de los residuos de café como materia prima para producir biocarbones sostenibles y eficaces en la eliminación de contaminantes farmacéuticos de aguas residuales (Zungu et al., 2022).

A principios del 2025, la editorial internacional IWA Publishing, líder en temas de agua, aguas residuales y medio ambiente, publicó un estudio que evaluó la eficacia de diferentes tipos de Biocarbón en la eliminación de microcontaminantes (diclofenaco, carbamazepina, benzotriazol, irbesartán y metformina) de efluentes tratados para su reutilización. Se utilizaron cinco tipos de biocarbón, derivados de madera blanda y lodos desecado de agua. El estudio concluyó que el carbón de madera blanca fue el más eficiente, eliminando benzotriazol, carbamazepina, diclofenaco, irbesartán y metformina con una eficacia del 98 %, 92 %, 94 %, 90 % y 99 % respectivamente, tras un tiempo de contacto de 24 h, con dos 2 gramos de sorbente y una concentración de 5000 ng/L de OMP (Hosney et al., 2025).

Además, Vu y colaboradores evaluaron el biocarbón de cáscara de café (CFH), obtenido mediante pirólisis a baja temperatura (350 °C), fue evaluado como un adsorbente sostenible y de bajo costo para la eliminación de Pb^{2+} y Cu^{2+} en aguas residuales. A pesar de su baja área superficial BET (0,43 m²/g), el material presentó una estructura mesoporosa (2,8 nm) y una superficie alcalina (pH pzc = 7,8), características que favorecieron su desempeño. En ensayos en lote con 2,0 g/L de biochar y soluciones de 5,0 mg/L de metales, el equilibrio se alcanzó a los 180 minutos, logrando elevadas eficiencias de remoción (94,4 % para Pb y 93,2 % para Cu). La cinética siguió un modelo de pseudo-segundo orden, indicando un proceso dominado por

quimiosorción. En sistemas monometálicos, la isoterma de Langmuir describió mejor la adsorción, mientras que en mezclas metálicas se observó adsorción competitiva, con preferencia por Pb, ajustándose al modelo de Freundlich. Aunque los resultados fueron prometedores, el estudio resalta la necesidad de una adecuada gestión del biochar saturado con metales y de evaluaciones de sostenibilidad antes de su implementación a gran escala (Adhikari, Mahmud, Duc, et al., 2023).

Aunque no se han realizado estudios que evalúen del SMTA utilizando Biocarbón, existen investigaciones que han analizado la eficiencia de los sistemas originales de tratamiento de aguas residuales del beneficio húmedo del café. El objetivo de estos estudios es verificar si cumplen con la resolución 631 de 2015. Por ejemplo, la investigación de López I. José G. (de la Corporación Universitaria del Cauca) demostró que parámetros como el pH (3,73 UpH), la DQO (superior a 15.000 mg/LO₂) y los SST (2600 mg/L) no cumplen con los valores máximos permisibles establecidos por la norma (López Ibarra, 2023).

Por su parte, en un proyecto de investigación de Samboní Luz Amparo (de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD CCAV Pitalito), se evaluó la eficiencia del SMTA con tecnología tanque tina, arrojando valores en el primer lavado de DQO entre 12.233,3 y 49.566,67, DBO entre 3.920,00 y 31.140,00 y SST entre 2,00 y 10.500,0 (Samboní, 2017). Aunque en estas investigaciones no se evaluaron las Grasas y Aceites y tampoco se calculó el % de remoción de carga contaminante, los resultados concluyen que el sistema tampoco cumple con la norma citada, lo cual establece una base para una futura investigación en la que se reemplace la piedra filtro por el Biocarbón.

10. METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló bajo condiciones reales de operación, mediante un diseño comparativo con dos tratamientos (80 litros y 100 litros de biocarbón), evaluados a partir de muestreos puntuales. Debido a la ausencia de réplicas experimentales independientes, el análisis se abordó desde una perspectiva descriptiva y exploratoria. Los procedimientos estadísticos complementarios se utilizaron únicamente para describir tendencias observadas en los datos y no para realizar inferencias estadísticas concluyentes.

10.1. Área de estudio de la investigación

Para evaluar la eficiencia de Biocarbón en el tratamiento de aguas residuales provenientes del beneficio húmedo ecológico del café, se utilizó el Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA) 400, un sistema piloto de la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena- CAM entregado mediante reubicación al propietario de la finca el abismo señor Olivar Anacona, quién tiene total autonomía del sistema y otorgó el permiso para la toma de muestras y la realización de la investigación (anexo A). La finca está ubicada en la vereda Monte Bonito, corregimiento de Chillurco, en el municipio de Pitalito, Huila, en las coordenadas $1^{\circ}54'1,2744''$ N- $76^{\circ}5'10,4244''$ W, a una altitud de 1576 msnm aproximadamente.

En la figura 2 se presenta la ubicación geoespacial de la finca del área de estudio, País, departamento, municipio, corregimiento y vereda.

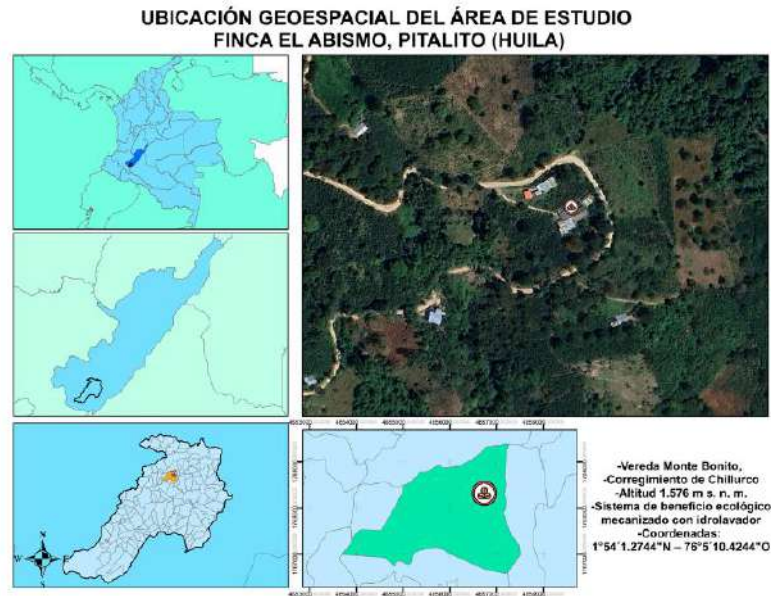


Figura 2. Ubicación geoespacial finca el Abismo

Fuente: elaboración propia.

Esta finca cafetera cuenta con una extensión de aproximadamente 3.5 hectáreas cultivadas con la variedad de café Castillo. Posee un beneficiadero ecológico mecanizado, equipado con un hidrolavador. El proceso de fermentación del café se lleva a cabo en bolsa negra y en un tanque de lavado durante 24 horas. Posteriormente, se realiza el lavado del café utilizando el equipo de hidrolavado. De acuerdo con la capacidad del sistema, el consumo de agua es de un (1) litro por kilogramo de café pergamino seco (PROINGENIERÍA SAS, 2024).

10.5. Producción del Biocarbón

El Biocarbón fue producido por la empresa suiza Cotierra, con el subproducto la zoca del café, mediante pirólisis lenta en un horno simple, llamado Kontiki, con capacidad de 500 kg, y a una temperatura máxima que oscila entre 600 a 630°C. El Biocarbón se trituró en un molino marca Trapp de doble aspa, con capacidad para 8 tulas por hora y funcionamiento de 220 voltios,

y una potencia de 1,5 caballos. En la figura 3 se muestra el proceso de producción del biocarbón mediante pirolisis lenta en el horno kontiki.



A. Tallos de zoca



B. Horno Kontiki



C. Proceso de enfriamiento



D. Proceso terminado

Figura 3. Proceso de producción del biocarbón en el horno kontiki

Fuente: trabajo de campo, 2024.

El biocarbón resultante de este proceso presentó un tamaño de partícula de aproximadamente 0,5 cm a 15 cm. Para asegurar su calidad, el material se empacó en tulas de lona y se resguardó en una bodega libre de humedad, evitando así cualquier tipo de contaminación o deterioro.

10.6. Selección de biocarbón para reemplazar la piedra filtro

La selección se realizó mediante el proceso de tamizaje, utilizando una zaranda elaborada en malla plástica de un 1 cm de diámetro. El objetivo fue obtener fragmentos de

Biocarbón de aproximadamente de 2,5 cm de diámetro, lo que equivalente al tamaño de la piedra filtrante del SMTA. Se procesó el material hasta conseguir los 280 litros necesarios para reemplazar por completo el material filtrante de la recámara dosificadora. En la figura 4 se muestra el tamizaje y selección del biocarbón para el reemplazo de la piedra filtro de la recámara dosificadora del sistema.



A. Proceso de tamizaje del biocarbón



B. Selección del biocarbón

Figura 4. Tamizaje y selección del biocarbón

Fuente: trabajo de campo, 2024

La figura 5 se evidencia el reemplazo de la piedra filtro, por el biocarbón en el módulo de la recámara dosificadora del SMTA



A. Recámara dosificadora con piedra filtro



B. Recámara dosificadora con biocarbón

Figura 5. Reemplazo de la piedra filtro por biocarbón en la recámara dosificadora

Fuente: trabajo de campo, 2024

10.7. Análisis fisicoquímicos del Biocarbón

El análisis fisicoquímico del biocarbón fue realizado por el laboratorio EUROFIS – UMWELT de Alemania y la Universidad Nacional de Colombia facultad de ciencias de la energía, financiado por la empresa COTIERRA SAS y suministrado al equipo de investigación con el objetivo de determinar las características fisicoquímicas. A continuación, se presentan los parámetros analizados y los métodos utilizados según el informe del laboratorio (anexo B) y (anexo C)

10.7.3. Métodos de Análisis del biocarbón.

La tabla 1, tabla 2, tabla 3, tabla 4, tabla 5, tabla 6 presentan los parámetros analizados del biocarbón, las normas de ensayo y el método utilizado en laboratorio.

Tabla 1

Norma de referencia para evaluar parámetros físicos y de humedad del biocarbón.

Nombre del parámetro	Norma empleada	Método analítico
Densidad aparente < 3 mm		VDLUFA A13.2.1 ²
Densidad a Granel	DIN EN ISO 17828: 2016-05 ³	
Capacidad de retención de agua (WHC) <2mm	DIN EN ISO 14238. A. 2014-03 ⁴	

² Método de análisis para la determinación de nutrientes en suelos y materiales orgánicos. Específicamente, se utiliza para el análisis de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos.

³ Esta norma define un método para determinar la densidad aparente de biocombustibles sólidos.

⁴ Esta norma se relaciona con métodos biológicos para la calidad del suelo.

Contenido total de agua DIN 51718: 2002-06⁵

Fuente: Adaptado de análisis de resultados del laboratorio EUROFINS-UMWELT.

Tabla 2

Norma de referencia para evaluar la composición elemental del biocarbón.

Nombre del parámetro	Norma empleada
Contenido de cenizas (550°C)	DIN 51719: 1997-07 ⁶
Carbono total, hidrógeno, y nitrógeno total	DIN 51732: 2014-07 ⁷
Azufre (S)	DIN 51724-3: 2012-07 ⁸
Carbono inorgánico (TIC) y Carbonato (CO ₂)	DIN 51726: 2004-06 ⁹
Oxígeno	DIN 51733: 2016-04 ¹⁰
Carbono orgánico	Cálculo

Fuente: Adaptado de análisis de resultados del laboratorio EUROFINS-UMWELT.

Tabla 3

Norma de referencia para evaluar las propiedades químicas del biocarbón.

Nombre del parámetro	Norma empleada	Método analítico
pH en CaCl ₂	DIN ISO 10390: 2005-12 ¹¹	

⁵ Esta norma especifica métodos para determinar el contenido de agua en combustibles sólidos, como el carbón vegetal.

⁶ Esta norma se utiliza para determinar el contenido de cenizas en combustibles minerales sólidos.

⁷ Esta norma define métodos instrumentales para la determinación de carbono total, hidrógeno y nitrógeno en combustibles minerales sólidos

⁸ Esta norma se relaciona con la determinación instrumental del contenido total de azufre en combustibles sólidos

⁹ Esta norma se refiere a la determinación del contenido de dióxido de carbono de carbonato en combustibles sólidos.

¹⁰ Norma para la determinación del contenido de carbono en combustibles sólidos y otros materiales

¹¹ Esta norma se utiliza para la determinación del pH en la calidad del suelo.

Conductividad a 1, 2, 3,
4 y 5 t de presión

SAA-H-LI-carbón vegetal 040¹²

Fuente: Adaptado de análisis de resultados del laboratorio EUROFINS-UMWELT.

Tabla 4

Norma de referencia para determinación de HAP en suelo, lodos, biorresiduos tratados y residuos, utilizando cromatografía de gases (GC) y cromatografía líquida de alta resolución (HPLC)

<i>Nombre del parámetro</i>	<i>Norma empleada</i>
<i>Hidrocarburos Aromáticos</i>	DIN EN 17503, procedimiento 10.2.3:
<i>Policíclicos (HAP/PAH)</i>	2022-08 ¹³

Fuente: Adaptado de análisis de resultados del laboratorio EUROFINS-UMWELT.

Tabla 5

Método por el cual fueron calculadas el área superficial y volumen de microporos del biocarbón

Nombre del parámetro	Método analítico
Porosidad y área superficial	Modelo de adsorción Single Point y Dubinin-Raduskevich ¹⁴ .

Fuente: Adaptado del informe de resultados del laboratorio de ciencias de la energía de la universidad Nacional de Colombia.

¹² Método de análisis específico para la determinación de características del carbón vegetal

¹³ Esta norma es para la determinación de HAP en suelo, lodos, biorresiduos tratados y residuos, utilizando cromatografía de gases (GC) y cromatografía líquida de alta resolución (HPLC)

¹⁴ Métodos utilizados para describir y analizar la adsorción de sustancias en superficies. Estos modelos permiten estimar parámetros como la capacidad de adsorción y la energía de adsorción en materiales adsorbentes.

Tabla 6

Método utilizado para el análisis químico de los parámetros lignina, celulosa y hemicelulosa

Nombre del parámetro	Método analítico
Materia seca (%) 1	AOAC 934.01 ¹⁵
Fibra en detergente neutro (FDN) (%) 3	AOAC 2002.04 ¹⁶
Fibra en detergente ácido (FDA) (%) 3	AOAC 973.18 ¹⁷
Lignina (ADL) (%) 3	AOAC 973.18 modificado ¹⁸
Hemicelulosa (%)	FDN – FDA ¹⁹
Celulosa (%)	FDA – lignina detergente ácida (ADL) ²⁰

Fuente: Adaptado del informe de resultados del laboratorio de ciencias de la energía de la universidad Nacional de Colombia

¹⁵ Método para la determinación de la humedad en alimentos y otros materiales. Es un procedimiento estandarizado desarrollado por la Asociación Oficial de Químicos Analíticos (AOAC) para asegurar la precisión y confiabilidad en los análisis de humedad.

¹⁶ Método para la determinación de la cantidad de grasa en alimentos mediante el uso de un método de extracción. Este procedimiento es parte de los estándares establecidos por la Asociación Oficial de Químicos Analíticos (AOAC).

¹⁷ Método oficial para la determinación de cenizas en productos alimenticios mediante incineración en horno muffle

¹⁸ Procedimiento oficial para la determinación de cenizas en productos alimenticios mediante incineración en un horno muffle. Este método implica calentar la muestra a altas temperaturas para eliminar los componentes orgánicos, dejando solo las cenizas inorgánicas.

¹⁹ Método para la determinación de la fibra detergente neutra (FDN) en forrajes y otros alimentos para animales. Este método es utilizado para evaluar la calidad nutricional de los alimentos, ya que la FDN está relacionada con la digestibilidad y el aporte energético.

²⁰ Método para la determinación de la lignina en forrajes y otros materiales vegetales. Este método es importante en el análisis de la calidad de los alimentos para animales, ya que la lignina afecta la digestibilidad y el valor nutritivo de los forrajes.

10.8. Aguas residuales del beneficio del café.

En cuanto a las aguas residuales, las variables dependientes que se monitorearon durante el estudio fueron los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Sedimentables (SS), grasas y aceites. El proceso de toma de muestras, custodia, transporte, preparación y análisis de resultados estuvo a cargo el laboratorio AMBILAB SAS, bajo los lineamientos de competencia técnica y aseguramiento de la calidad acordes con la NTC ISO/IEC 17025 (Anexo F).

La tabla 7 presenta los parámetros evaluados en cumplimiento de la resolución 631 de 2015, artículo 9.

Tabla 7

Parámetros para evaluar, Art. 9 de la Resolución 631 de 2015

Parámetro	Beneficio ecológico
pH	5 a 9 unidades
Demanda Química de Oxígeno	3.000 mg/L O ₂
DQO	
Sólidos suspendidos Totales SST	800 mg/L
Sólidos sedimentables In situ	10 mg/L
Grasas y Aceites	30 mg/L

Fuente: Adaptado de la resolución 631 de 2015, artículo 9 (*MINAMBIENTE, 2015*)

Las variables independientes del estudio fueron el volumen de biocarbón con los niveles de tratamientos de 80 y 100 litros, utilizados en reemplazo de la piedra filtro en la recámara dosificadora.

Se consideraron como variables de exógenas el caudal y la temperatura ambiental del agua residual producto del beneficio del café, las cuales influyen en el proceso de remoción del sistema. Estas fueron monitoreadas durante el desarrollo experimental con el fin de evaluar su incidencia en los resultados.

10.9. Esquema experimental exploratorio

El estudio se desarrolló mediante un diseño experimental de tipo comparativo, en condiciones reales de operación, en el cual se evaluó la eficiencia del biocarbón como material filtrante en el tratamiento de aguas residuales del beneficio ecológico del café.

Debido a las condiciones reales de operación del sistema y a las limitaciones logísticas del estudio, no se implementaron réplicas experimentales independientes. Las muestras analizadas correspondieron a submuestras obtenidas del mismo sistema experimental bajo diferentes condiciones operativas. En consecuencia, los análisis estadísticos realizados se interpretan exclusivamente desde un enfoque exploratorio y descriptivo, orientado a identificar tendencias preliminares en el comportamiento del sistema y no a establecer inferencias causales concluyentes.

Se consideró una referencia inicial correspondiente al agua residual en la entrada del sistema y dos niveles de tratamiento definidos por el volumen de biocarbón empleado (80 litros y 100 litros), sin implementación de réplicas experimentales independientes. La evaluación se realizó mediante muestreo compuesto proporcional al caudal. Para el análisis de los datos se empleó estadística descriptiva, incluyendo medidas de tendencia central y dispersión (promedio,

desviación estándar y coeficiente de variación), con el propósito de caracterizar el comportamiento de las variables evaluadas bajo las condiciones del estudio. Adicionalmente, se realizaron procedimientos estadísticos complementarios mediante el paquete Statgraphics con fines exclusivamente descriptivos y exploratorios. Debido a la ausencia de réplicas experimentales independientes, los resultados obtenidos no se utilizaron para realizar inferencias estadísticas concluyentes ni para establecer diferencias significativas entre tratamientos.

La descripción detallada de los niveles y las condiciones del experimento se presenta en las secciones 10.9.3 y 10.9.4.

10.9.3. Condición de referencia:

La referencia corresponde a las condiciones de entrada del sistema de tratamiento del agua residual de café antes de su paso por el material filtrante y se utiliza como referencia inicial, no como control experimental comparativo. Este permitió establecer las condiciones iniciales de los parámetros fisicoquímicos evaluados y tener un referente para el cálculo de la eficiencia de remoción.

El monitoreo se realizó en tiempo real mediante un muestreo compuesto proporcional al caudal, integrando cinco alícuotas en un lapso de tiempo de hora y media (duración del proceso del beneficio del café), con el fin de garantizar su representatividad. El muestreo se realizó bajo temperatura máxima de 25,8 °C y mínima de 22,5 °C, datos tomados in situ por el laboratorio.

Grupo de Tratamiento (dos niveles):

Los volúmenes de biocarbón se definieron con base en la capacidad de la recámara dosificadora del SMTA, se reemplazó el filtro de piedra por biocarbón conservando el volumen

de la piedra filtro. Las pruebas preliminares permitieron identificar condiciones operativas viables sin alterar el funcionamiento hidráulico del sistema.

Se evaluaron dos tratamientos, definidos por el volumen de biocarbón empleado en el sistema:

Tratamientos: 1 (Primer nivel) y 2 (Segundo nivel)

Se emplearon 80 y 100 litros de biocarbón en la recámara dosificadora. La evaluación se realizó mediante un muestreo compuesto proporcional al caudal. Los tratamientos integraron cinco alícuotas durante el periodo de monitoreo, el volumen de cada alícuota ajustado al caudal instantáneo, con el fin de obtener una muestra representativa del comportamiento del sistema.

Este consistió en tomar cinco muestras puntuales a lo largo del periodo de hora y media, que es la duración del proceso del beneficio del café. Posteriormente, se mezclaron todas las muestras en un recipiente limpio y descontaminado, se homogenizaron y se extrajo una muestra representativa.

Para el tratamiento de 100 litros de biocarbón se incluyó una contramuestra para verificación de resultados, con el propósito de aumentar la confiabilidad de la medición bajo condiciones operativas, tal como se detalla en la tabla 8.

Para ambos niveles, la toma de muestras se realizó a la salida del sistema metanogénico. Las muestras se recolectaron en función del tiempo y el caudal, siguiendo el procedimiento de muestreo compuesto, diseñado por el laboratorio contratado (Anexo E, procedimiento de muestreo y cadena de custodia), y finalmente se trasladó para los respectivos análisis.

Los parámetros evaluados fueron DQO, SST, SS, grasas y aceites, utilizando un muestreo compuesto proporcional al caudal.

Tabla 8

Niveles de tratamiento para el desarrollo de la investigación

<i>Tratamiento</i>	<i>Punto de muestreo</i>
Muestra sin tratamiento	Entrada del sistema
Nivel 1(80 L de biocarbón)	Salida del sistema
Nivel 2 (100 L Biocarbón)	Salida del sistema
Nivel 2 (100 L Biocarbón) contramuestra	Salida del sistema

Fuente: elaboración propia con datos de diseño estadístico.

El diseño experimental planteado corresponde a un esquema comparativo entre condiciones de entrada (referencia inicial) y dos niveles de tratamiento con biocarbón (80 y 100 litros), bajo condiciones operativas reales del sistema. Es importante señalar que no se implementaron réplicas experimentales para cada tratamiento, por lo cual el análisis de los resultados se realizó desde un enfoque descriptivo, basado en la comparación de los parámetros fisicoquímicos evaluados antes (entrada del sistema) y después del sistema con tratamiento.

En consecuencia, no se priorizó el uso de pruebas estadísticas inferenciales con fines confirmatorios, debido al número limitado de observaciones disponibles. Sin embargo, se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) únicamente como una herramienta numérica complementaria, sin fines inferenciales, con el fin de identificar posibles tendencias en el comportamiento de los tratamientos. El uso de muestreo compuesto proporcional al caudal y la inclusión de contramuestras en el tratamiento de 100 litros permitió obtener datos más representativos del comportamiento del sistema.

Se reconoce como una limitación del diseño experimental la ausencia de replicación, por lo que se recomienda que futuros estudios incorporen un diseño experimental con réplicas y análisis estadístico inferencial, con el fin de fortalecer la validez de los resultados.

El laboratorio AMBILAB S.A.S, certificado por el IDEAM, realizó el monitoreo y la caracterización de las aguas residuales generadas en el beneficio del café de la finca El Abismo. Para llevar a cabo este proceso, se basó en los protocolos y la guía para el monitoreo de vertimientos de aguas superficiales y subterráneas del IDEAM. El cronograma de monitoreo se estableció en una reunión conjunta, a la que asistieron los estudiantes de la maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas (responsables de la investigación), el propietario de la finca El Abismo y personal del laboratorio, tras una visita al lugar. La programación se definió considerando los días de recolección, beneficio y lavado de café, tal como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9

Cronograma de beneficio de café / monitoreo de aguas

Fecha	Despulpado	Lavado	Hora de muestreo	Muestra
22-oct-24	x	-	3:00 p. m.	-
23-oct-24	x	x	3:00 p. m.	Entrada del sistema y tratamiento con 80 L de biocarbón
24-oct-24	x	-	3:00 p. m.	-
25-oct-24	x	x	3:00 p. m.	Tratamiento con 100 L de biocarbón
28-oct-24	x	-	3:00 p. m.	-
29-oct-24	-	x	3:00 p. m.	Tratamiento con 100 L de biocarbón-contramuestra

Fuente: elaboración propia con datos de campo (2024).

10.9.4. Toma de muestras y caracterización.

Las muestras fueron recolectadas en campo por el laboratorio AMBILAB S.A.S entre los días del 22 al 29 de octubre del 2024, en horario aproximado de las 3:00 p. m. El muestreo se realizó durante el proceso de lavado del café, tiempo aproximado de hora y media. Posteriormente, el profesional asignado por el laboratorio hace la composición de la muestra, y extrae la muestra representativa, esta es empacada en recipientes de vidrio y plástico debidamente esterilizados y rotuladas. Finalmente, las muestras se preservan a temperaturas inferiores a 6 °C y son transportadas bajo condiciones de cadena de custodia.

El muestreo compuesto permitió integrar la variabilidad del sistema en el tiempo, fortaleciendo la representatividad de las muestras analizadas. No obstante, la ausencia de replicación experimental limita la aplicación de análisis estadísticos inferenciales, por lo que los resultados deben interpretarse como indicativos de tendencias en la eficiencia del sistema de tratamiento.

El estudio se desarrolló bajo condiciones reales de operación del sistema de tratamiento, lo cual implicó que la evaluación de cada tratamiento se realizara mediante muestreo compuesto representativo, sin la implementación de réplicas experimentales independientes.

Las muestras obtenidas durante el monitoreo corresponden a submuestras compuestas del mismo sistema experimental y no constituyen réplicas experimentales independientes. Por esta razón, los análisis estadísticos inferenciales fueron utilizados únicamente con fines exploratorios y descriptivos, evitando realizar inferencias concluyentes sobre causalidad o significancia estadística estricta.

10.9.5. Toma de alícuotas y aforo volumétrico del caudal

La toma de alícuotas y el aforo volumétrico del caudal fueron realizados por el laboratorio AMBILAB S.A.S., siguiendo sus protocolos internos de muestreo y medición, los cuales se encuentran estandarizados con lineamientos técnicos aplicables.

El procedimiento empleado corresponde a un muestreo compuesto proporcional al caudal, en el cual el volumen de cada alícuota es determinado en función del caudal instantáneo medido en campo. El caudal fue estimado mediante método volumétrico, a partir de la relación entre el volumen recolectado y el tiempo de medición.

Posteriormente, las alícuotas fueron integradas para confirmar la muestra compuesta, garantizando su representatividad frente a las condiciones reales de operación del sistema.

Los cálculos asociados a la determinación del caudal y el volumen de las alícuotas fueron realizados por el laboratorio con base en sus procedimientos técnicos estandarizados, los cuales se encuentran registrados en los formatos de captura de datos de campo y cadena de custodia correspondientes (anexo E- formatos).

En este sentido, el presente estudio se basa en los resultados generados por el laboratorio acreditado, asegurando la confiabilidad de los datos a través de la aplicación de protocolos técnicos validados, como lo especifica el oficio respuesta a solicitud de procedimientos del laboratorio (anexo F). El proceso realizado se presenta el numeral 10.9.6.

10.9.6. Cálculo del caudal y alícuotas para composición

Fórmula de cálculo de caudal y alícuotas para composición, empleada por el laboratorio:

$$\text{CAUDAL (Q): } \frac{\text{Volumen en (ml)}}{\text{Tiempo(s)}} \quad (1)$$

Ecuación 1. Fórmula general para determinar el caudal (Q), tomada de los resultados del laboratorio

Los datos tomados de esta operación son registrados en el formato captura de datos de campo aforo volumétrico del laboratorio. Con estos datos se calculó la sumatoria y promedio de los caudales puntuales a registrar en los formatos de captura de datos.

$$\text{Calculo constante } k: \frac{\text{Volumen Total a Componer (mL)}}{\Sigma Q \text{ puntual } (\frac{\text{mL}}{\text{s}})} \quad (2)$$

Ecuación 2. Determinación de la constante K, fórmula utilizada por el laboratorio.

Al finalizar esta operación, se calculó el volumen requerido de cada alícuota aplicando la fórmula utilizada por el laboratorio:

$$\text{Volumen de la alícuota} = (K * Qi) \quad (3)$$

Ecuación 3. Determinación del volumen de alícuota

Donde Qi: caudal puntual, K: Constante

Estos datos son registrados en el formato de captura de campo.

10.9.7. Composición de la muestra

Durante la preparación de la muestra, los profesionales midieron cada alícuota según el cálculo previamente realizado. Posteriormente, purgaron el recipiente de composición con la alícuota de menor valor. Acto seguido, se añadieron las alícuotas restantes por las paredes del recipiente y se homogenizó la mezcla con una varilla plástica, empleando movimientos circulares para evitar la aireación de la muestra. Una vez finalizado este proceso, la muestra se vertió en los recipientes requeridos según el formato de la orden de trabajo o el plan de muestreo aprobado por el laboratorio. Durante este traspaso, también se evitó airear la muestra. figura 6 y

7.

La figura 6 muestra el proceso del cálculo de alícuotas, calibración de equipo y la purga de los recipientes para el almacenamiento de las muestras.



Figura 6. Cálculo de alícuotas, calibración de equipos y purga de recipientes

Fuente: trabajo de campo (2024).

La figura 7 evidencia la composición de las muestras y el empacado en recipientes esterilizados para el respectivo traslado al laboratorio



A. Composición de muestra

B. Empacado de muestra

C. Muestras para laboratorio

Figura 7. Composición de la muestra y empaqueo

Fuente: trabajo de campo (2024).

Finalmente, procedieron a preservar la muestra, verificando el pH según el método específico del laboratorio y refrigerándola lo más rápido posible. Todo este proceso se realizó siguiendo las directrices del instructivo de lavado y preservación de ítems de ensayo.

Las muestras tomadas los días 25 y 29 de octubre se recolectaron siguiendo el mismo procedimiento que en el monitoreo del 23 de octubre de 2025, tal como se especifica en el cronograma de beneficio y monitoreo. En cada una de estas fechas, se obtuvieron 100 litros de muestra y contramuestra del segundo nivel. La figura 8 evidencia la composición de las muestras para traslado a laboratorio del día 25 de octubre.



B. Medición de alícuotas

A. Muestras del laboratorio

Figura 8. Composición de la muestra y empaqueo

Fuente. Trabajo de campo 2024.

En la figura 9 se evidencia la toma de muestra y la composición de las mismas para traslado a laboratorio el día 29 de octubre de 2024.



Figura 9. *Composición de muestra y empacado*

Fuente. Trabajo de campo 2024

11. DATOS DE LOS ANÁLISIS DE LABORATORIO

El análisis estadístico presentado a continuación mediante ANOVA se utilizó con un enfoque exploratorio, considerando que los datos corresponden a mediciones repetidas en el tiempo sobre las mismas unidades experimentales.

En este sentido, los resultados no cumplen completamente con el supuesto de independencia requerido para este tipo de análisis, por lo que deben interpretarse con precaución y no como evidencia concluyente, sino como un apoyo al análisis descriptivo del comportamiento de los tratamientos.

11.1. Análisis de las características del biocarbón

En la tabla 10 se presentan los resultados de los análisis de las características del biocarbón obtenido a partir de zoca de café.

Los resultados sugieren que el material presenta un alto contenido de carbono (superior al 80%), pH ligeramente alcalino (≈ 8.6 – 8.8) y adecuada capacidad de retención de agua. Asimismo, las propiedades de porosidad y composición elemental sugieren una estructura favorable para la remoción de contaminantes orgánicos y sólidos suspendidos, lo que podría resultar potencialmente beneficioso como material adsorbente para el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café, debido a su alta capacidad disponible de microporos lo que refleja la eficiencia de adsorción (Universidad Nacional de Colombia, 2025).

Tabla 10

Resultados de análisis de las características del biocarbón de zoca de café

Nombre la muestra			Muestra de biocarbón 1		Muestra de biocarbón 2	
Número de muestra			124090679		124090686	
Nombre del parámetro	Límite de determinación	Unidad	Estado de entrega	Estado libre de agua (seco)	Estado de entrega	Estado libre de agua (seco)
Densidad aparente < 3 mm	-	kg/m ³	272		273	

Densidad a Granel	-	kg/m ³	222	-	198	-
Capacidad de retención de agua (WHC) <2mm	-	%	-	154,4	-	147,3
Contenido total de agua	0,1	Masa%	7,2	-	2,5	-
Contenido de cenizas (550°C)	0,1	Masa%	4,8	5,2	1,9	2,0
Carbono total	0,2	Masa%	81,9	88,3	87,2	89,4
Hidrógeno	0,1	Masa%	1,6	1,7	2,7	2,8
Nitrógeno	0,05	Masa%	1,05	1,13	0,32	0,33
Total						
Azufre (S)	0,03	Masa%	0,05	0,06	<0,03	< 0,03
Carbono inorgánico (TIC)	0,1	Masa%	0,3	0,3	0,6	0,7
Carbonato CO ₂	0,4	Masa%	1,1	1,2	2,3	2,4
Oxígeno	-	Masa%	3,4	3,6	5,4	5,5
Carbono Orgánico	-	Masa%	81,6	8,0	86,6	88,7
pH en CaCl ₂	-		8,8	-	8,6	-
Conductividad a 1,2 t de presión FR	0,01	ms/cm	-	9,2	-	< 0,01
Conductividad	0,01	ms/cm	-	13	-	0,01

a 2 t de presión

Conductividad a 3 t de presión	0,01	ms/cm	-	16	-	0,03
Conductividad a 4 t de presión	0,01	ms/cm	-	21	-	0,04
Naftalina	0,1	mg/kg	-	6,6	-	11
Acenaftileno	0,1	mg/kg	-	<0,1	-	<0,1
Acenafteno	0,1	mg/kg	-	<0,1	-	<0,1
Fluoreno	0,1	mg/kg	-	0,2	-	3,3
Fenantreno	0,1	mg/kg	-	0,9	-	1,5
Antraceno	0,1	mg/kg	-	0,3	-	0,5
Fluoranteno	0,1	mg/kg	-	0,4	-	0,4
Pireno	0,1	mg/kg	-	0,4	-	0,4
Benzo[a]antraceno	0,1	mg/kg	-	<0,1	-	0,2
Crisén	0,1	mg/kg	-	< 0,1	-	0,2
Benzo[b]fluoranteno	0,1	mg/kg	-	< 0,1	-	0,1
Benzo[k]fluoranteno	0,1	mg/kg	-	< 0,1	-	< 0,1
Indeno[1,2,3cd]	0,1	mg/kg	-	< 0,1	-	< 0,1
Pireno						
Dibenzo[a,h]antraceno	0,1	mg/kg	-	< 0,1	-	< 0,1
Benzo[ghi]perileno	0,1	mg/kg	-	< 0,1	-	< 0,1
Benzo(e)pireno	0,1	mg/kg	-	< 0,1	-	< 0,1
Benzo[j]fluoranteno	0,1	mg/kg	-	< 0,1	-	-

Fuente: Adaptado de análisis de resultados del laboratorio EUROFINS-UMWELT.

La tabla 11 muestra el área superficial del biocarbón de zoca de café.

Tabla 11

Resultados de la medición de porosidad

Muestra	Área superficial equivalente (m²/g)	Capacidad límite de microporos (cm³/g)	Volumen límite de microporo (cm³/g)	Área superficial Single point (m²/g)
M_CO ₂ _COTIERRA-c	307,306281	62,667207	0,114719±0,000015	190,9811

Fuente: Adaptado del informe de resultados del laboratorio de ciencias de la energía de la universidad Nacional de Colombia

En la tabla 12 se muestran los contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa del biocarbón de zoca de café.

Tabla 12

Resultados lignina, celulosa y hemicelulosa

Análisis	Reporte	
	(Base húmeda)	(Base seca)
Materia seca (%) ¹	47,5	-
Fibra en detergente neutro (%) ³	40,1	84,4
Fibra en detergente ácido (%) ³	39,7	83,6

Lignina (%) 3	9,1	19,1
Hemicelulosa (%)	0,4	0,8
Celulosa (%)	30,7	64,5

Fuente: Adaptado del informe de resultados del laboratorio de nutrición animal
departamento de la producción animal facultad de medicina veterinaria y zootecnia de la
universidad Nacional de Colombia

11.2. Resultados de parámetros *In situ*

11.2.1. Comportamiento del caudal, pH y temperatura a la entrada al sistema

En la figura 10, 11 y 12 se puede observar gráficamente el comportamiento del caudal, pH y temperatura de las aguas residuales en un periodo de una hora a la entrada del sistema sin tratamiento, registrados en el formato AS-TMM-F05, versión 9, medidos para cinco muestras tomadas el 23 de octubre de 2024. La línea azul representa el caudal medio en el tiempo del muestreo y la línea de puntos representa la tendencia o promedio que ese hace a lo largo de la medición

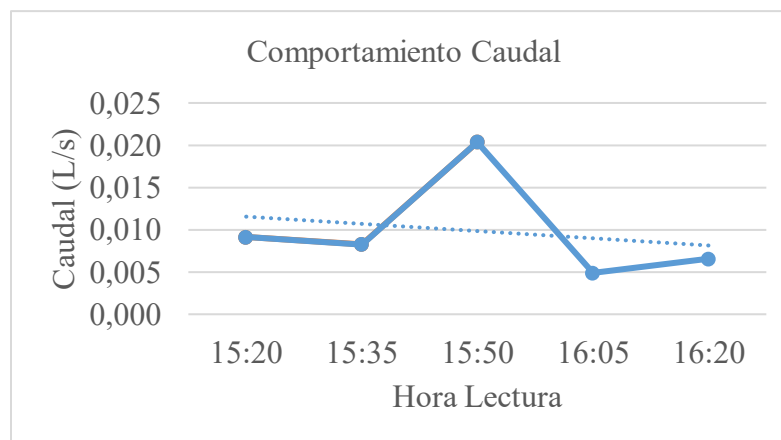


Figura 10. *Aumento del caudal a la entrada sistema*

Fuente: adaptado de datos de laboratorio AMBILAB S.A.S. (2024).

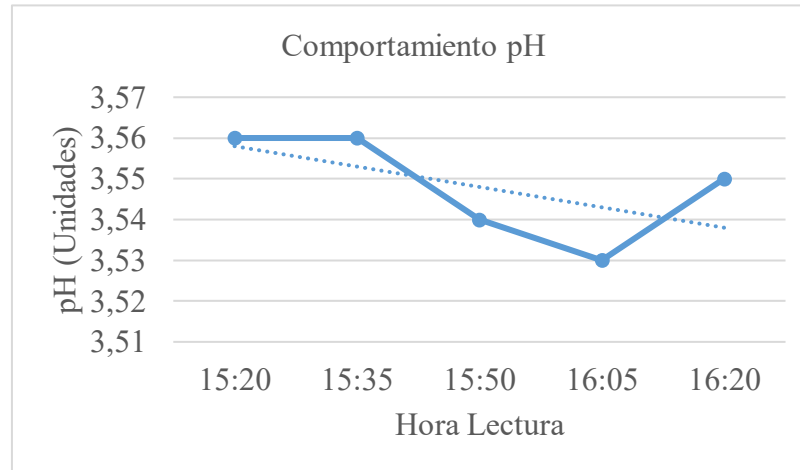


Figura 11. *Evolución del pH a la entrada sistema*

Fuente: adaptado de datos de laboratorio AMBILAB S.A.S. (2024).

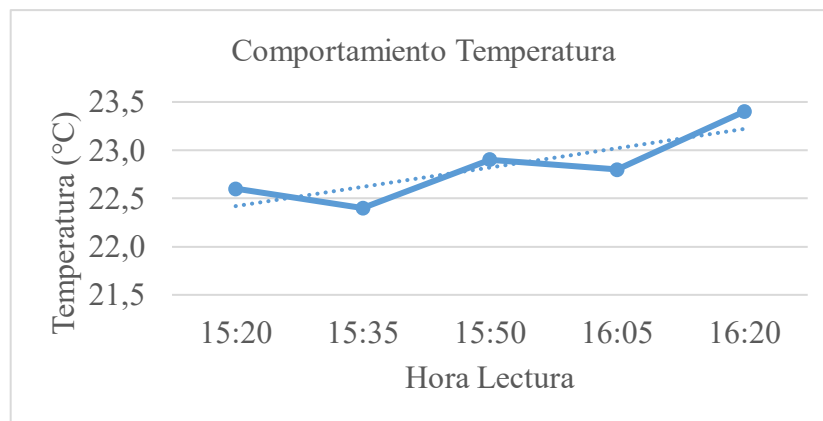


Figura 12. *Variación de temperatura*

Fuente: adaptado de datos de laboratorio AMBILAB S.A.S. (2024).

11.2.2. Comportamiento del caudal a la salida del sistema con 80 y 100 litros de biocarbón

En la figura 13 se muestra gráficamente el comportamiento del caudal de las aguas residuales en un periodo de una hora a la salida del sistema con tratamiento de 80 y 100 litros de

biocarbón. El sistema muestra una tendencia incremental hacia el final del periodo de medición (16:10) en dos de sus tres variables (100 litros y 100 litros contramuestra), el caudal 80 litros es el único que rompe la tendencia ascendente al final, mostrando una caída significativa después de las 15:55; mientras que el flujo de 100 litros es el más confiable por su linealidad. El flujo de 80 litros y 100 litros contramuestra requiere revisión técnica para identificar la causa de la inestabilidad y la caída de presión/caudal observada en los últimos 30 minutos y los primeros 30 minutos, respectivamente.

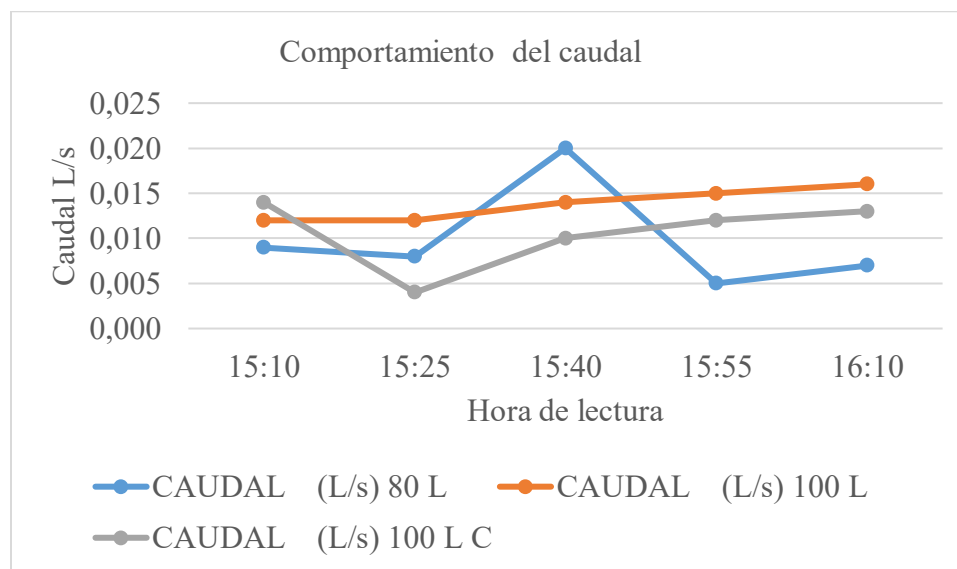


Figura 13. *Comportamiento del caudal*

Fuente: elaboración propia con datos de campo (2024).

11.2.3. Comportamiento del pH a la salida del sistema con 80 y 100 litros de biocarbón.

Para el pH (Figura 14), el sistema se mantiene en un rango de acidez extrema (3,37 - 3,56); la muestra 100 litros contramuestra es la única que muestra una tendencia clara de incremento en el pH (reducción de acidez), mientras que las otras dos tienden a la estabilidad. La

estabilidad de los valores sugiere que no hubo procesos de fermentación acelerada o cambios químicos drásticos en la hora de monitoreo, manteniendo condiciones ácidas constantes consistentes con la caracterización típica de estos efluentes.

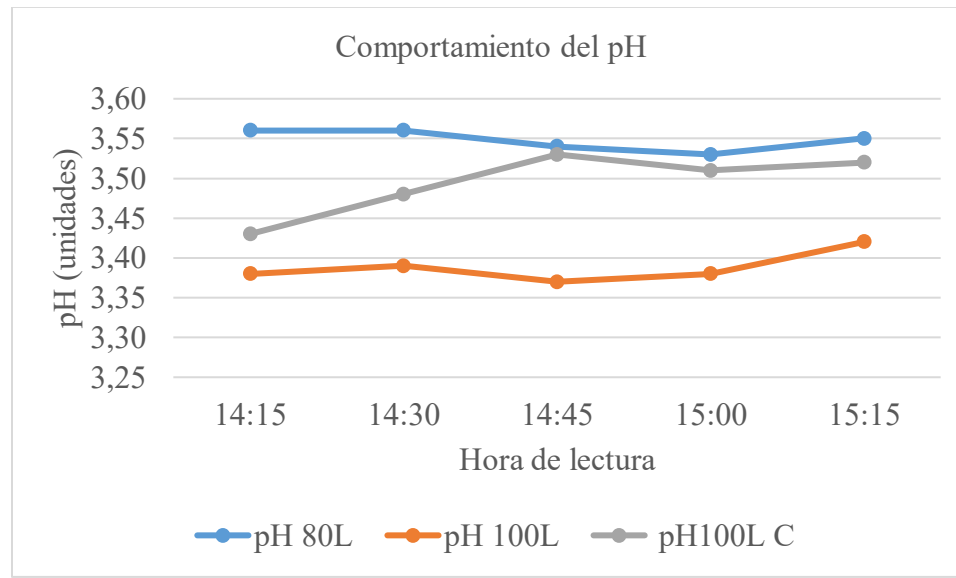


Figura 14. Comportamiento del pH

Fuente: adaptado de datos de laboratorio AMBILAB S.A.S. (2024).

11.2.4. Comportamiento de la temperatura a la salida del sistema con 80 y 100 litros de biocarbón.

En la Figura 15, el sistema muestra una estabilidad térmica general con una ligera tendencia al calentamiento hacia el final del periodo (15:15); la serie 100 litros es la más estable y fría, mientras que los 100 litros contramuestra es la que presenta mayor ganancia de temperatura inicial. Las variaciones son mínimas (menores a 0,2 °C), lo que demuestra un control ambiental efectivo o un proceso con cambios de energía térmica muy lentos durante el tiempo de observación.

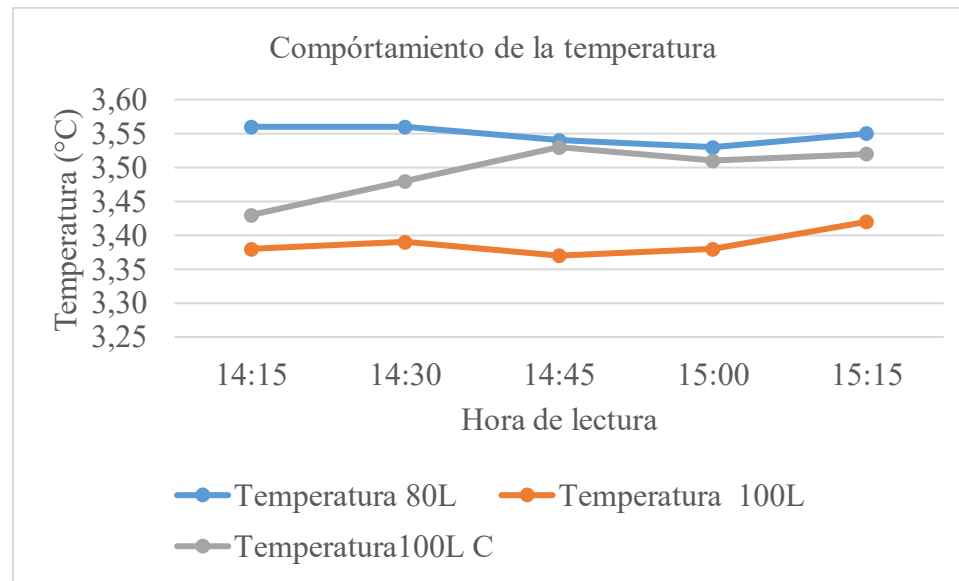


Figura 15. *Comportamiento de la temperatura*

Fuente: adaptado de datos de laboratorio AMBILAB S.A.S. (2024).

11.3. Resultados del análisis de laboratorio

La tabla 13 presenta los resultados de los análisis de laboratorio obtenidos a partir del monitoreo realizado en la entrada y salida del sistema. Estos datos corresponden a los dos niveles evaluados en el diseño experimental exploratorio. En ella se analiza la eficiencia de remoción de contaminantes mediante el uso de biocarbón, analizando las condiciones de entrada con las del efluente tratado tras su interacción con dos volúmenes de biocarbón 80 litros y 100 litros y una contramuestra para el volumen de 100 litros. Finalmente, se compara la calidad del agua de salida con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 9 de la Resolución 631 de 2015 para el beneficio ecológico del café.

Tabla 13

Resultados de análisis de laboratorio

Parámetro	Unidad	Entrada	Nivel de	Salida	Remoción	Remoción	Artículo
		del	Biocarbón	del		%	9 R-
		sistema	L	sistema			631/2015-
							Beneficio
							Ecológico
DQO	mg/L	71950	80	34937	37013	51%	3000 mg/L
			100	24705	47245	66%	O ₂
			100 (C)	29358	42592	59%	
Sólidos	mg/L	41050	80	2630	38420	94%	800 mg/L
Suspendidos			100	1720	39330	96%	
Totales, SST			100(C)	3800	37250	91%	
Sólidos	mg/L	20	80	1	19	95%	10 mg/L
Sedimentables			100	1,2	18,8	94%	
Insitu, SS			100(C)	1	19	95%	
Grasas y		1801,6	80	826	975,6	54%	30 mg/L
Aceites	mg/L		100	514,8	1286,8	71%	
			100(C)	241,6	1560	87%	
pH	Unidades	4,18 a	80	3,53 a	NA	NA	5 a 9
		22,30°C-		22,80°C-			Unidades
		4,28 a		3,56 a			
		23,50°C		2260°C			

100	3,37 a	NA	NA
	25,80°C-		
	3,42 a		
	24,50°C		
100(C)	3.43 a	NA	NA
	22,70°C-		
	3,53 a		
	22,50°C		

Fuente: adaptado de datos de laboratorio AMBILAB S.A.S. (2024).

La tabla 14 presenta los porcentajes de remoción de carga contaminante de cuatro parámetros de calidad de agua (DQO, SST, SS, Grasas y Aceites) bajo dos condiciones de tratamiento, y calcula un porcentaje de remoción global promedio.

Estos resultados corresponden a la caracterización de los vertimientos de aguas residuales provenientes del beneficio ecológico de café mecanizado con hidrolavador. Para el análisis, se consideraron dos niveles de tratamiento, en el diseño experimental exploratorio.

Tabla 14

Porcentajes de remoción de carga contaminante

Tratamiento	DQO	SST	SS	Grasas y Aceites
80 L	51%	94%	95%	54%
100 L	66%	96%	94%	71%
100 L (contramuestra)	59%	91%	95%	87%

Fuente: adaptado de datos de laboratorio AMBILAB S.A.S. (2024).

El porcentaje de remoción total presentado corresponde a un promedio simple de los parámetros evaluados, utilizado con fines descriptivos. No obstante, se reconoce que este enfoque presenta limitaciones, ya que cada contaminante posee diferente concentración inicial y relevancia ambiental. Por esta razón, el análisis de la eficiencia del tratamiento se fundamenta principalmente en la evaluación individual de cada parámetro.

Se recomienda que futuros estudios incluyan un análisis ponderado basado en la carga contaminante para una estimación más precisa de la remoción global.

12. ANALISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados se realizó con base en los datos obtenidos durante la evaluación del sistema de tratamiento en condiciones reales de operación, considerando tanto los parámetros fisicoquímicos como las variables operativas que pueden influir en la eficiencia del proceso.

En este sentido, los resultados obtenidos corresponden a mediciones compuestas representativas de las condiciones operativas del sistema durante los periodos de evaluación. Debido a la ausencia de réplicas experimentales independientes, la estimación de la variabilidad experimental y la aplicación de análisis inferenciales robustos presentan limitaciones metodológicas.

Por esta razón, las pruebas estadísticas empleadas se utilizaron únicamente con fines exploratorios y descriptivos, buscando identificar tendencias generales en el comportamiento de los tratamientos evaluados. En consecuencia, los resultados no deben interpretarse como evidencia concluyente de diferencias estadísticas entre tratamientos, sino como una aproximación

preliminar al desempeño observado bajo las condiciones específicas del estudio. Por lo tanto, los resultados deben considerarse como una aproximación al comportamiento del sistema. Se recomienda que futuros estudios incluyan réplicas experimentales y muestreos en la salida del sistema con el filtro original, con el fin de fortalecer la validez estadística de los hallazgos.

12.1. Análisis de las características del biocarbón en comparación con los resultados obtenidos de la remoción de contaminantes.

Las propiedades físicas y químicas del biocarbón de zoca de café son determinantes para interpretar los resultados del tratamiento de aguas residuales. En esta sección se compararon los datos obtenidos para el tratamiento del agua residual presentados en la sección 10.3 (tabla 13) y las características del biocarbón (1 y 2) descritas en la sección 10.1, tabla 10, tabla 11 y tabla 12.

Los análisis realizados muestran que este material tiende a mejorar la calidad del efluente, en particular en la remoción de sólidos sedimentables (SS) y en la reducción parcial de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y Grasas y Aceites. Sin embargo, pese a estos avances, los valores finales son inferiores a los límites máximos establecidos en la Resolución 631 de 2015, lo que sugiere la necesidad de complementar el proceso con tecnologías adicionales de depuración.

En los resultados experimentales descritos en la sección 10.3, tabla 13, el sistema con 80 litros de biocarbón, mostró una eficiencia intermedia frente al tratamiento que trató el agua con 100 litros de biocarbón (100 litros y 100 litros contramuestra), aunque con variaciones. Para la DQO, el tratamiento con 100 litros refleja mejor desempeño (66 %), seguido de 100 litros (contramuestra) (59 %) y, finalmente, 80 litros (51 %). Estos datos sugieren que el tratamiento con mayor volumen de biocarbón presentan una tendencia de mayor remoción en los parámetros evaluados.

La capacidad de retención de agua (WHC, por sus siglas en inglés) cuantifica el volumen de agua que la matriz porosa del biocarbón puede retener en condiciones estandarizadas. Una WHC elevada refleja mayor porosidad accesible y más sitios de interacción con la fase acuosa, lo que resulta crítico en sistemas de filtración (Adhikari, Mahmud, Nguyen, et al., 2023). En este estudio, la muestra con 100 litros de biocarbón presenta mayor WHC (154,4) frente a la muestra de 100 litros de biocarbón-contramuestra (147,3), esta diferencia se asocia con la mejor eficiencia de remoción. La menor eficiencia registrada en el análisis de 100 litros(contramuestra) (59 %) probablemente obedezca más a variaciones en la carga de entrada o a factores operativos, como la velocidad de flujo o la heterogeneidad del afluente, que a las diferencias intrínsecas en la WCH.

En el caso de grasas y aceites, el sistema con 100 litros (contramuestra) revela mayor remoción (87 %), seguido de 100 litros (71 %) y de 80 litros (54 %). En cuanto al tratamiento 100 litros (contramuestra) que presentó diferencias en los porcentajes de remoción observados respecto al sistema de 100 litros evaluado bajo condiciones iguales de volumen, se considera que puede atribuirse a las condiciones operativas del sistema, fluctuaciones en la composición del agua residual o variabilidad experimental propia del proceso.

En este contexto, la contramuestra se empleó como una evaluación adicional dentro del procedimiento experimental y no como una réplica experimental independiente. Por tanto, las diferencias observadas entre ambas condiciones deben interpretarse de manera descriptiva y exploratoria.

Los resultados pueden explicarse por las propiedades fisicoquímicas del biocarbón, ya que se trata de un material con elevada aromatización y marcado carácter hidrofóbico, lo que

incrementa su afinidad hacia compuestos orgánicos no polares, responsables tanto de la DQO como de la fracción de grasas y aceites. Esto coincide con lo reportado por Sun y colaboradores, quienes demostraron que biocarbones hidrofóbicos presentan alta eficiencia en la adsorción de aceites sobre superficies acuáticas (Sun et al., 2022)

Aunque las propiedades hidrofóbicas y la estructura porosa del biocarbón pueden favorecer la adsorción de grasas y aceites, los resultados obtenidos en este estudio no permiten establecer relaciones causales concluyentes sobre el comportamiento diferencial entre los sistemas evaluados.

Asimismo, la literatura describe que los biocarbones gracias a sus características químicas y estructurales, poseen capacidad para adsorber compuestos poliaromáticos, hidrocarburos polialifáticos, metales pesados y otros contaminantes presentes en suelos, sedimentos, aerosoles y cuerpos de agua (Mukherjee & Lal, 2013).

En este contexto, el grado de aromatización del carbono en el biocarbón se calculó basado en la relación Hidrógeno/Carbono Orgánico (H/C_{org}) descrita en la tabla 10, la cual constituye un indicador clave de la intensidad del proceso de pirólisis del que proviene. Para el Biocarbón 1, los valores obtenidos se ubicaron entre 0,232 y 0,235, calculados a partir de contenidos de carbono orgánico de 81,6–88,0 % y de hidrógeno de 1,6–1,7 %. Estos valores indican un biocarbón altamente carbonizado, con una estructura rica en anillos aromáticos estables. Por su parte, el biocarbón 2 presentó relaciones H/C_{org} entre 0,374 y 0,379, derivadas de contenidos de carbono orgánico de 86,6–88,7 % y de hidrógeno de 2,7–2,8 %. Aunque ligeramente mayores, estos valores también se encuentran por debajo del umbral de 0,4, lo que confirma un elevado grado de aromatización y estabilidad estructural. De acuerdo con las guías del International

Biochar Initiative (Budai et al., 2013) y del European Biochar Certificate (European Biochar Foundation, 2024), valores de H/C_{org} inferiores a 0.4 garantizan la estabilidad y durabilidad del biocarbón en el ambiente. En consecuencia, ambos biocarbones cumplen con los criterios internacionales de calidad, siendo el biocarbón 1 el que presenta un estado más avanzado de carbonización. Estos resultados confirman que se trata de materiales altamente carbonizados y estables, con una notable capacidad de interacción con compuestos no polares, como grasas y aceites.

En biocarbones mesoporosos, la eficiencia de remoción depende tanto del tamaño de partícula como de la mesoporosidad interna (Ahmad et al., 2014 ; Tan et al., 2015).

En este estudio fue posible observar una remoción moderada de DQO (51–66%), lo que indica que el tiempo de contacto y la difusión hacia los mesoporos no fueron suficientes para aprovechar al máximo el área interna disponible. En contraste, la remoción de sólidos suspendidos totales (91–96%) y sólidos sedimentables (94–95%) para este estudio se puede inferir que fue elevada, atribuible principalmente al efecto de tamizado mecánico y a la reducción de vacíos interparticulares, que favorecen la retención de sólidos sin generar colmatación significativa del lecho, ver tabla 10.

De acuerdo con la literatura, el estudio realizado por Muoghalu y colaboradores (2023) , el tamaño de poro y la porosidad del biocarbón son factores determinantes en la adsorción, un material con poros muy reducidos no logra retener moléculas de gran tamaño, sin importar su polaridad o carga eléctrica; en cambio, cuando presenta una elevada porosidad, ofrece un gran potencial de filtración, y dos beneficios clave al emplearse como biofiltro en el tratamiento del agua, uno favorece la retención de agua dentro de su estructura porosa, y dos permite el desarrollo de biopelículas en los poros sin provocar taponamientos. Estos mecanismos

complementan la acción del tamaño de partícula, explicando por qué la mesoporosidad interna, junto con la estructura interparticular condicionan tanto la adsorción de materia orgánica, como la eficiencia en la remoción de sólidos (Muoghalu et al., 2023).

De este modo, el área superficial obtenida ($307 \text{ m}^2/\text{g}$) indica que la muestra posee una alta superficie específica, característica típica de biocarbones activados o materiales porosos con una notable capacidad de adsorción (tabla 11) (Yan et al., 2020). Por otro lado, el área superficial medida por el método single point ($190,98 \text{ m}^2/\text{g}$) es significativamente menor que la obtenida por el método BET ($307 \text{ m}^2/\text{g}$). Esta diferencia se explica porque el método single point estima la superficie a una única presión relativa, mientras que BET considera múltiples puntos, proporcionando un valor más representativo de la superficie total accesible. La discrepancia entre ambos métodos indica que una parte de la superficie no es detectable a la presión relativa fija utilizada en el single point, probablemente debido a la presencia de microporos muy estrechos o mesoporos pequeños (Nanoscale & Weidenthaler, 2011).

Otro parámetro importante es la relación con la densidad aparente del biocarbón, la cual está directamente condicionada por la temperatura de pirólisis. A medida que esta aumenta, también lo hace la densidad aparente, debido a la disminución de la fracción volátil y al incremento proporcional del contenido de carbono. Este comportamiento se debe a que, con temperaturas más elevadas, se liberan compuestos volátiles como agua y gases orgánicos, lo que da lugar a una matriz carbonosa más compacta y estructuralmente estable. La densidad aparente y la densidad a granel, guardan una relación directa con los resultados obtenidos en el tratamiento del agua residual (Khater et al., 2024). Al analizar los resultados, se observa que la densidad aparente del biocarbón 1 fue de $272 \text{ kg}/\text{m}^3$, mientras que la del biocarbón 2 fue de $273 \text{ kg}/\text{m}^3$ (tabla 10), lo que indica que ambos materiales presentan una estructura porosa ligera. Esta característica contribuye a la alta

eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos y sedimentables. En el tratamiento con 80 litros se alcanzó un 94 % de remoción de sólidos suspendidos y 95 % de sólidos sedimentables, mientras que en los tratamientos con 100 litros el promedio fue de 94 % para sólidos suspendidos (100 litros 96 %, 100 litros (contramuestra) 91 %) y 95 % para sólidos sedimentables (100 litros 94 %, 100 litros (contramuestra) 95 %) (tabla 18).

En cuanto a la densidad a granel, esta fue de 222 kg/m^3 para el biocarbón 1 y de 198 kg/m^3 para el biocarbón 2 (tabla 10). Esta propiedad influye directamente en la capacidad de retención de grasas y aceites, ya que una menor densidad a granel, como la del biocarbón 2, genera mayor espacio interparticular, favoreciendo una mayor adsorción y, en consecuencia, una remoción más eficiente. Esto coincide con lo reportado en un estudio sobre la funcionalidad de harinas de trigo integral con sustitución de plátano verde, en el que se observó que, al disminuir la densidad a granel, también se reducía la capacidad de absorción de aceite (oil absorption capacity, OAC) (Inyang, 2016). No obstante, estas características físicas no fueron suficientes para lograr reducciones significativas en la DQO, que se mantuvo muy por encima del límite normativo (3.000 mg/L), ni para ajustar el pH, que permaneció fuera del rango permitido (5–9).

Por otro lado, el pH de un biocarbón puede variar ampliamente, encontrándose en un rango aproximado de 4,6 a 9,3, dependiendo tanto del tipo de biomasa utilizada como de las condiciones de pirólisis, a mayor temperatura de producción, el biocarbón tiende a presentar valores de pH más altos debido a la concentración de minerales básicos (Jahromi et al., 2021). En este estudio, los biocarbones presentaron un pH alcalino, con valores de 8,8 para la muestra 1 y 8,6 para la muestra 2; sin embargo, su capacidad de neutralización resultó limitada debido al bajo contenido de cenizas y carbonatos. En la muestra 1, el contenido de cenizas fue de 4,8–5,2% y el de carbonatos de 1,1–

1,2%, mientras que en la muestra 2, las cenizas representaron apenas 1,9–2,0% y los carbonatos 2,3–2,4% (tabla 10). Estos valores, aunque reflejan un carácter alcalino intrínseco del material, no fueron suficientes para contrarrestar la acidez del agua residual, de modo que el pH del efluente se mantuvo en un rango ácido de 3,3–3,6. Este resultado sugiere que la alcalinidad potencial del biocarbón depende de su fracción mineral. Además, su pH varía según el proceso productivo y la temperatura de pirolización, a bajas temperaturas (108–350 °C) se forman sustancias fenólicas y ácidos orgánicos que disminuyen el pH, mientras que a temperaturas superiores a 500 °C el pH aumenta por el mayor contenido de cenizas y elementos alcalinos (Présiga-lópez et al., 2021). Por ello, cuando la fracción mineral es baja, es necesario complementar el biocarbón con agentes neutralizantes externos para lograr una corrección efectiva del pH.

12.2. Análisis estadístico de las variables exógenas que pueden afectar los resultados.

En el tratamiento de aguas con biocarbón, analizar parámetros como caudal, temperatura, humedad y alícuotas es fundamental debido a su impacto directo en la eficacia del tratamiento y en la optimización del proceso. Estos factores influyen directamente en la eficiencia del tratamiento, determinan la capacidad de adsorción del biocarbón y permiten optimizar las condiciones del proceso para garantizar un desempeño constante y reproducible.

12.2.1. Caudal

En el presente estudio, las medidas de dispersión como la desviación estándar y el coeficiente de variación se calcularon a partir de los datos obtenidos durante el proceso de muestreo compuesto, específicamente de las alícuotas recolectadas en función del caudal a lo largo del periodo de evaluación.

Es importante aclarar que estos valores no corresponden a réplicas experimentales independientes, sino que reflejan la variabilidad operativa del sistema bajo condiciones reales de funcionamiento.

En este sentido, los indicadores de dispersión permiten evaluar la consistencia de las condiciones del proceso durante el muestreo, más que la variabilidad experimental entre tratamientos.

Por lo tanto, aunque en la metodología se establece la ausencia de réplicas experimentales, el análisis descriptivo realizado es válido como herramienta para caracterizar el comportamiento del sistema, sin que ello implique inferencias estadísticas robustas sobre diferencias entre tratamientos.

El caudal es una variable crítica en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, ya que influye en la carga contaminante y en el tiempo de contacto entre el biocarbón y el agua. Este análisis experimental permite comprender el comportamiento del caudal bajo dos tratamientos con biocarbón ((100 litros, 80 litros) y la referencia (entrada del sistema)), proporcionando información útil para la optimización del proceso.

El tratamiento con 100 litros de biocarbón mostró la menor desviación estándar (0,00335989) y el coeficiente de variación más bajo (27,5401%), lo que sugiere una mayor homogeneidad en los datos y un comportamiento más predecible del caudal. En contraste, los tratamientos con 80 litros de biocarbón y referencia (entrada del sistema) presentaron altos niveles de dispersión, con coeficientes de variación de 60,1089% y 57,4791%, respectivamente, reflejando una marcada inestabilidad del sistema. Asimismo, los rangos más amplios en estos tratamientos indican

fluctuaciones más grandes en los valores registrados, lo que refuerza las variaciones operativas durante el proceso. En cuanto al sesgo estandarizado, el tratamiento de 100 litros mostró un sesgo negativo, asociado a la acumulación de valores más bajos, mientras que el tratamiento de 80 litros y la referencia (entrada del sistema) exhibieron sesgos positivos, indicando la presencia de valores extremos elevados que distorsionan la distribución. En conjunto, estos parámetros estadísticos confirman que el tratamiento con 100 litros de biocarbón presentó menor variabilidad observada en las condiciones evaluadas, mientras que la alta variabilidad del tratamiento de 80 litros y la referencia sugiere condiciones menos estables que podrían influir en el comportamiento observado del sistema.

Adicionalmente, el caudal promedio global fue de 0,01165 l/s, con una desviación estándar de 0,00495533 y un coeficiente de variación del 42,535%, lo que refleja una dispersión considerable en los datos. El rango total fue de 0,021 mostrando diferencias amplias entre los valores mínimos y máximos.

La tabla 15 muestra el análisis en la media (Promedio), la variabilidad (Desviación Estándar y Coeficiente de Variación), la dispersión (Rango) y la forma de la distribución (Sesgo Estandarizado) en los niveles de tratamiento y la referencia (entrada del sistema).

Tabla 15

Estadísticas descriptivas para caudal (V/Tiempo)- (l/s)

Tratamiento	Promedio	Desviación	Coeficiente	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo
		Estándar	de				Estandariza
			Variación				do

100 L	0,0122	0,00335989	27,5401%	0,004	0,016	0,012	-2,23621
80 L	0,0098	0,00589067	60,1089%	0,005	0,02	0,015	1,71627
Sin tratamiento	0,0124	0,00712741	57,4791%	0,008	0,025	0,017	1,92648
Total	0,01165	0,00495533	42,535%	0,004	0,025	0,021	1,8512

Fuente: adaptado de datos de laboratorio AMBILAB S.A.S. (2024).

En la tabla 16 se muestran los resultados para los tratamientos (100 litros de biocarbón, 80 litros de biocarbón y entrada del sistema (referencia)).

El tratamiento con 100 litros de biocarbón tuvo un intervalo estrecho (0,0111375 – 0,0132625), reflejando una estimación precisa de la media. En contraste, los tratamientos con 80 litros de biocarbón y entrada del sistema (referencia) mostraron intervalos más amplios, lo que sugiere mayor incertidumbre en la estimación de la media debido a su alta dispersión.

Por su parte, el tratamiento con 80 litros de biocarbón mostró un caudal promedio más bajo (0,0098), con un intervalo de confianza que va de 0,00716561 a 0,01243447. Aunque el límite superior de este intervalo se acerca a los valores de los otros tratamientos, el mayor error estándar (0,00263439) indica una alta dispersión en los datos, lo que reduce la precisión del estimador.

Los resultados sugieren que la aplicación del tratamiento con 80 litros de biocarbón podría estar asociada a una leve reducción del caudal, aunque debido a la alta variabilidad observada, no es posible determinar si las diferencias observadas corresponden a un efecto consistente del tratamiento debido a la ausencia de réplicas experimentales independientes.

En cambio, el caudal observado en el tratamiento con 100 litros de biocarbón fue muy similar al del tratamiento a la entrada del sistema, lo que indica que, al menos en este aspecto, el uso completo de biocarbón no alteró sustancialmente la dinámica de flujo durante el experimento.

La alta variabilidad en los tratamientos 80 litros y a la entrada del sistema sugiere inestabilidad operativa o falta de control en las condiciones del flujo, lo que podría influir en el comportamiento observado del sistema durante el periodo. En cambio, el tratamiento 100 litros muestra una distribución más estable, lo que coincide con una menor variabilidad observada en los datos registrados. Los valores de sesgo indican distribuciones no simétricas, lo que debe considerarse en modelos predictivos.

La tabla 16 analiza la precisión al estimar la media de los niveles de volumen; Un rango de variabilidad estrecho, refleja una estimación más precisa.

Tabla 16

Medias con intervalos de error estándar

Tratamiento	Media	Error Estándar	Inferior Límite	Superior Límite
100 L	0,0122	0,00106249	0,0111375	0,0132625
80 L	0,0098	0,00263439	0,00716561	0,0124344
Sin tratamiento	0,043	0,0174385	0,0255615	0,0604385
Total	0,0193	0,00515195	0,014148	0,024452

Fuente: Elaboración propia análisis estadístico (2024).

La Figura 16 muestra la dispersión y los valores atípicos de caudal a la entrada del sistema.

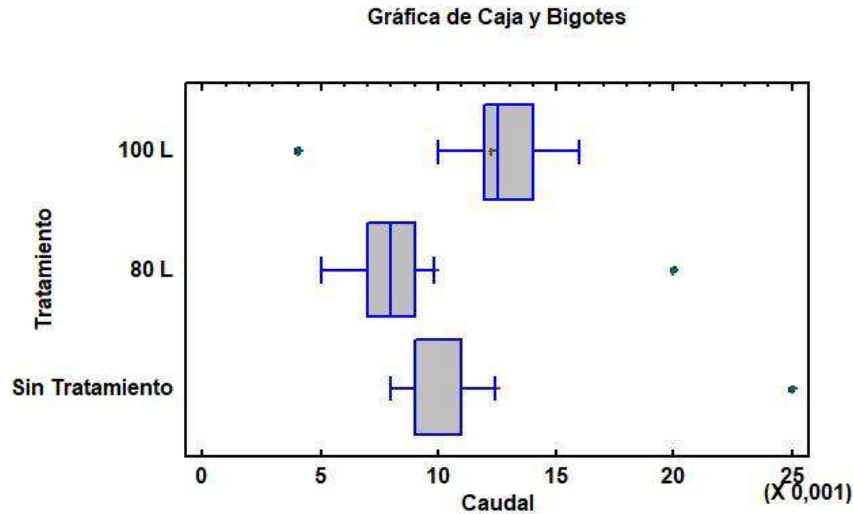


Figura 16. *Distribución de datos mediante gráfico de caja y bigotes para el caudal del sistema*

Fuente: Statgraphics, paquete estadístico

Los resultados presentados en esta sección corresponden a un análisis descriptivo y exploratorio del comportamiento del caudal bajo las condiciones evaluadas. Debido a que los datos no provienen de réplicas experimentales independientes, las diferencias observadas entre tratamientos no deben interpretarse como evidencia concluyente de superioridad, estabilidad o control operacional, sino como tendencias descriptivas registradas durante el desarrollo experimental.

En este sentido, las variaciones identificadas pueden estar asociadas tanto a condiciones operativas propias del sistema como a posibles efectos del tratamiento con biocarbón, sin que sea posible establecer relaciones causales robustas a partir del diseño experimental utilizado.

12.2.2. Temperatura

Durante la ejecución del experimento de tratamiento de aguas residuales con biocarbón, se registraron las condiciones ambientales predominantes en el sitio, específicamente la humedad relativa (%) y la temperatura ambiente (°C). Estas variables no fueron manipuladas como parte del diseño experimental exploratorio, sino que corresponden al entorno natural durante la realización de cada tratamiento.

La temperatura del agua influye directamente en las propiedades fisicoquímicas del biocarbón y en la dinámica de los contaminantes. A mayor temperatura, aumenta la energía cinética de las moléculas, lo que puede favorecer la desorción y reducir la eficiencia de adsorción. Además, puede acelerar las reacciones químicas y afectar la viscosidad del agua, modificando el flujo en el sistema.

La tabla 17 resume las estadísticas descriptivas (promedio, variabilidad y asimetría) para la variable medida, bajo diferentes condiciones de Tratamiento.

Tabla 17

Estadísticas descriptivas para temperatura

	Desviación		Coefficiente	Sesgo	
Tratamiento	Promedio	Estándar	de Variación	Rango	Estandarizado
100 L	24,72	1,11435	4,50789%	3,3	0,166812
80 L	22,14	0,0894427	0,403987%	0,2	2,04124
Entrada sistema	22,82	0,676018	2,96239%	1,4	0,0212749

Total	23,6	1,43783	6,09252%	4,3	1,09759
--------------	------	---------	----------	-----	---------

Fuente: fuente propia análisis estadístico (2024).

La temperatura registrada durante la ejecución del experimento presentó variaciones entre los tratamientos, pese a no haber sido una variable manipulada. El tratamiento con 100 litros de biocarbón se desarrolló bajo condiciones ambientales más cálidas, con una temperatura promedio de 24,72 °C, mientras que los tratamientos 80 litros y la referencia (entrada del sistema) se llevaron a cabo en ambientes más frescos, con promedios de 22,14 °C y 22,82 °C, respectivamente.

Además de estas diferencias en los promedios, se observaron variaciones importantes en la dispersión de los datos térmicos. En la aplicación del tratamiento a 100 litros de biocarbón la temperatura presentaba la mayor variabilidad, con una desviación estándar de 1,11 °C y un rango de 3,3 °C, mientras que al aplicar el tratamiento 80 litros, había una estabilidad térmica notable, con una desviación estándar de apenas 0,089 °C y un rango de solo 0,2 °C. Cuando no se aplica biocarbón la temperatura ambiente presentaba una dispersión intermedia.

Estas observaciones se confirman con el coeficiente de variación (CV%), que fue de 4,51 % cuando se utilizó el tratamiento de 100 litros, 2,96 % a la entrada del sistema, y apenas 0,40 % en cuando se aplicó el tratamiento 80 litros, indicando una alta consistencia térmica en este último.

En cuanto al sesgo estandarizado, el tratamiento a 100 litros de biocarbón y a la entrada del sistema mostraron distribuciones térmicas relativamente simétricas, con sesgos cercanos a cero (0,167 y 0,021, respectivamente). Por el contrario, el tratamiento a 80 litros con biocarbón

presentó un sesgo positivo elevado (2,04), lo que indica una acumulación de temperaturas en el extremo inferior del rango, con algunos valores atípicos más altos.

Estas diferencias en las condiciones térmicas podrían haber influido en ciertos procesos fisicoquímicos o biológicos del tratamiento de aguas, tales como la adsorción de compuestos, la actividad microbiana o la velocidad de oxidación, y deben ser consideradas al interpretar los resultados atribuidos al biocarbón.

En particular, la mayor temperatura y variabilidad térmica durante el tratamiento a 100 litros de biocarbón podría haber favorecido ciertas dinámicas independientes de la acción del biocarbón. Por tanto, se recomienda interpretar los resultados comparativos con precaución, reconociendo la posible asociación potencial del contexto ambiental.

La Figura 17 muestra la dispersión y los valores de la temperatura

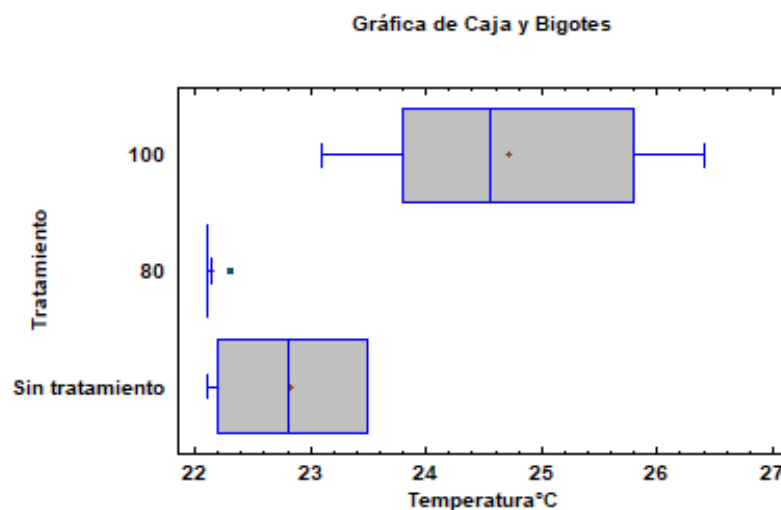


Figura 17. Distribución de datos mediante gráfico de caja y bigotes para la temperatura

Fuente: statgraphics, paquete estadístico

12.2.3. Humedad

Con respecto a la humedad, se observa que las condiciones ambientales fueron relativamente homogéneas cuando a la entrada del sistema o cuando se utiliza el tratamiento con 80 litros de biocarbón, en términos de humedad relativa. Sin embargo, el tratamiento con 100 litros de biocarbón se llevó a cabo en condiciones significativamente más secas y cálidas, con una humedad relativa promedio de 53,9 %, en contraste con los tratamientos 80 litros de biocarbón y entrada del sistema, que presentaron condiciones ambientales significativamente más húmedas, con promedios de 79,8 % y 80,0 %, respectivamente. Esta diferencia marca un contraste de más de 25 puntos porcentuales entre el tratamiento 100 litros de biocarbón y los otros dos.

La tabla 18 muestra una clara dicotomía en el desempeño de los tratamientos, que se reduce a una elección entre alto rendimiento con alta fiabilidad versus bajo rendimiento.

Tabla 18

Estadísticas descriptivas para humedad

		Desviación	Coefficiente		Sesgo
Tratamiento	Promedio	Estándar	de Variación	Rango	Estandarizado
100 L	53,9	4,01248	7,44431%	10,0	-0,0486281
80 L	79,8	0,83666	1,04845%	2,0	0,46761
Entrada sistema	80,0	3,08221	3,85276%	7,0	-0,233822
Total	66,9	13,6994	20,4774%	34,0	-0,169443

Fuente: elaboración propia datos estadísticos (2024).

En términos de variabilidad, el tratamiento con 100 litros de biocarbón también presentó la mayor dispersión en los valores de humedad (desviación estándar = 4,01 %, rango = 10 %), lo cual indica que las condiciones secas no solo fueron distintas, sino también más fluctuantes. En cambio, el tratamiento con 80 litros de biocarbón mostró una gran estabilidad en los valores de humedad, con una desviación estándar de 0,84 % y un rango de apenas 2 %, mientras que a la entrada del sistema registró una variabilidad intermedia.

El coeficiente de variación (CV%) refuerza esta observación: fue más bajo en el tratamiento con 80 litros de biocarbón (1,05 %), más alto en el tratamiento con 100 litros de biocarbón (7,44 %) y moderado en a la entrada del sistema (3,85 %), lo que refleja la mayor consistencia de las condiciones húmedas en los tratamientos sin biocarbón o con menor proporción.

Respecto al sesgo estandarizado, todos los tratamientos presentaron distribuciones relativamente simétricas, con valores cercanos a cero $-0,048$ en el tratamiento 100 litros de biocarbón, $0,467$ en el tratamiento 80 litros de biocarbón, y $-0,234$ a la entrada del sistema. Esto indica que, a pesar de las diferencias en el nivel y variabilidad de la humedad, no hubo distorsiones importantes en la simetría de los datos registrados.

La diferencia en las condiciones ambientales podría haber influido en la dinámica del tratamiento de aguas residuales, especialmente en procesos sensibles como la evaporación, la adsorción de contaminantes o la actividad microbiana. Por tanto, es importante considerar esta variabilidad ambiental como un posible factor de confusión al interpretar los efectos del biocarbón, en especial para el tratamiento al aplicar 100 litros de biocarbón.

Al igual que la temperatura, la humedad relativa fue registrada como condición ambiental en el momento de ejecución del experimento y no se controló directamente. Sin embargo, los datos muestran diferencias claras entre los tratamientos que deben considerarse al interpretar los resultados.

La Figura 18 muestra la dispersión y los valores atípicos de la humedad.

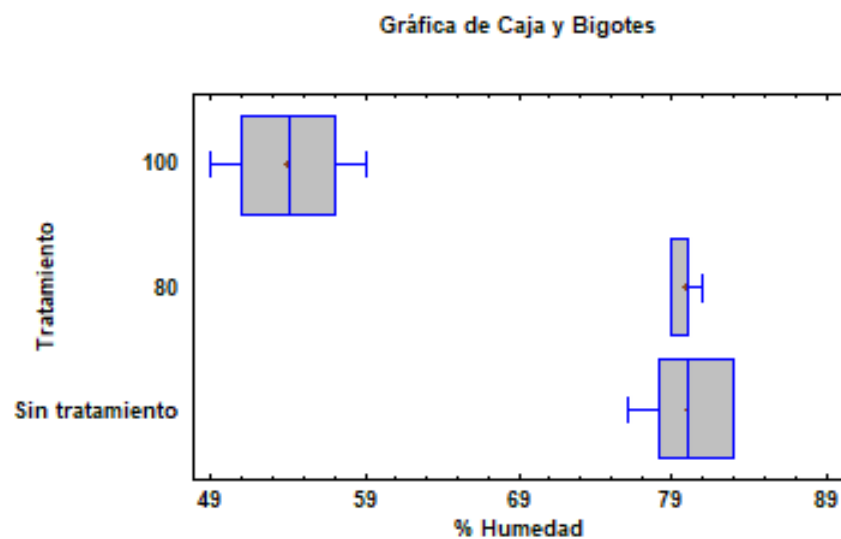


Figura 18. Distribución de datos mediante gráfico de caja y bigotes para la humedad

Fuente: stratgraphics, paquete estadístico (2024).

12.2.4. Alícuotas

Durante el muestreo, las alícuotas utilizadas se mantuvieron, en promedio, constantes entre tratamientos, con valores cercanos a 800 unidades de mililitros. Sin embargo, a pesar de esta aparente homogeneidad en el valor medio, los parámetros de dispersión y sesgo revelan diferencias sustanciales en la consistencia y distribución de los datos entre tratamientos.

La tabla 19 resume las estadísticas descriptivas para una variable medida bajo dos condiciones de tratamiento y a la entrada del sistema, y destaca dos aspectos principales: una media prácticamente idéntica en todos los grupos y una variabilidad radicalmente diferente.

Tabla 19

Estadísticas descriptivas para alícuotas

Tratamiento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo Estandari zado
100	800,0	200,469	25,0587%	333,0	1058,0	725,0	-1,7617
80	800,2	495,871	61,9683%	398,0	1655,0	1257,0	1,6788
Entrada del sistema	800,0	459,039	57,3798%	493,0	1607,0	1114,0	1,87333
Total	800,05	339,358	42,4171%	333,0	1655,0	1322,0	2,55614

Fuente: elaboración propia datos estadísticos (2024).

El tratamiento con 100 litros de biocarbón fue el más consistente, con un coeficiente de variación (CV) del 25 %, el más bajo de los tres, y un rango más estrecho (de 333 a 1058). Además, el sesgo estandarizado negativo (−1,76) indica una asimetría hacia valores más bajos, es decir, una concentración mayor de datos por debajo de la media.

Por el contrario, los tratamientos con 80 litros de biocarbón y a la entrada del sistema mostraron alta variabilidad en las alícuotas (CV de 62 % y 57 %, respectivamente), lo que indica falta de uniformidad en las cantidades aplicadas o recolectadas. Ambos tratamientos también

presentaron un sesgo positivo (1,68 y 1,87), lo que sugiere una tendencia hacia valores altos, con posible presencia valores extremos.

El tratamiento con 80 litros de biocarbón fue el que registró la mayor dispersión absoluta (rango de 1257 unidades), lo que puede reflejar problemas de control o una mayor sensibilidad del sistema a pequeñas variaciones operativas.

A pesar de que el valor promedio de las alícuotas fue similar en todos los tratamientos, la alta variabilidad observada en los tratamientos 80 litros de biocarbón y la referencia (entrada del sistema) puede influir en la interpretación de los resultados. Esta falta de uniformidad podría haber afectado la concentración de contaminantes, la eficacia del biocarbón o la lectura de los parámetros fisicoquímicos.

La figura 19 muestra la dispersión y los valores atípicos de las alícuotas

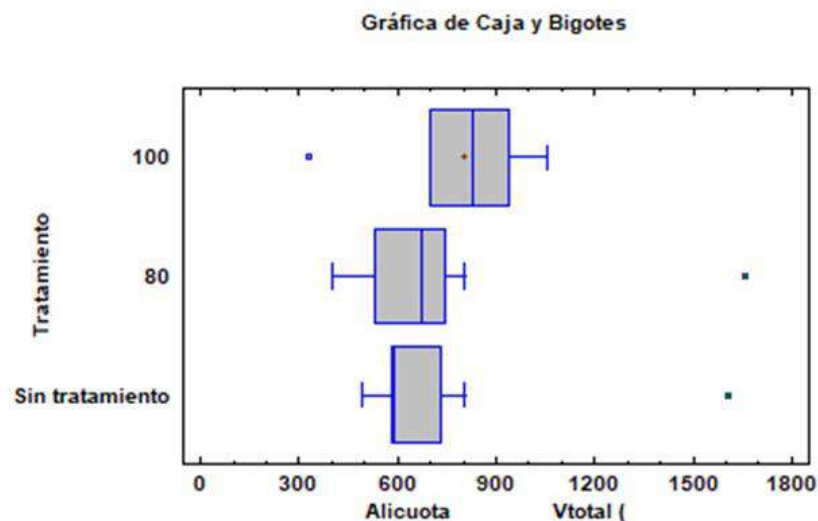


Figura 19. Distribución de datos mediante gráfico de caja y bigotes para las alícuotas

Fuente: stratgraphics, paquete estadístico (2024)

El rango total de las alícuotas fue amplio (de 333,0 a 1655,0 g/L), lo que refleja una alta variabilidad en los valores registrados. Sin embargo, la distribución de los datos sugiere un comportamiento comparable entre los tratamientos en términos de la dosis promedio aplicada.

Este comportamiento señala que, si bien la media de aplicación se mantuvo constante, el control más estricto de la dosis de biocarbón por volumen de agua es necesario para mejorar la consistencia del tratamiento. Ajustar el flujo del caudal del agua residual contribuiría a optimizar la adsorción de contaminantes y la eficiencia del proceso.

12.3. Análisis de parámetros fisicoquímicos

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar la eficiencia del biocarbón producido a partir de la zoca del café en el tratamiento de aguas residuales generadas por el proceso de beneficio ecológico del café. Para ello, se analizaron diferentes parámetros fisicoquímicos de calidad del agua antes y después de ser sometida a tratamientos con diferentes volúmenes de biocarbón. Los resultados se contrastaron con los límites establecidos por el artículo 9 de la Resolución 631 de 2015, que regula los vertimientos a cuerpos de agua superficial en Colombia.

12.3.1. Potencial de Hidrogeno

El pH es un parámetro clave para determinar la acidez o alcalinidad del agua. Según la normativa vigente, el rango permisible para vertimientos es de 5 a 9 unidades de pH. Todos los muestreos evaluados presentaron valores por debajo de este rango, lo que evidencia un carácter ácido persistente en las aguas residuales tratadas, incluso tras la aplicación de biocarbón. La acidez significativa detectada en todas las muestras impide el cumplimiento del requisito

normativo, lo que plantea la necesidad de implementar procesos complementarios de neutralización.

Los valores de DQO en la entrada del sistema (71.950 mg O₂/L) superan ampliamente el límite normativo de 3.000 mg O₂/L, y aunque los tratamientos con biocarbón lograron reducciones notables, especialmente el tratamiento con 100 litros de biocarbón, que registró 24.705, y 29.358 mg O₂/L para 100 litros (contramuestra); estos valores aún se mantienen muy por encima del máximo permitido, lo que indica que la capacidad del biocarbón para remover materia orgánica no es suficiente por sí sola. Un comportamiento similar se observa en los sólidos suspendidos totales (SST), el afluente mostró un valor extremadamente alto (41.050 mg/L), mientras que los tratamientos removieron notablemente esta carga, alcanzando mínimos entre 1.720 y 3.800 mg/L; sin embargo, estas concentraciones continúan superando el valor límite de 800 mg/L, lo que sugiere que, aunque el biocarbón contribuye a la remoción de sólidos, el proceso no garantiza el cumplimiento normativo. En cambio, los sólidos sedimentables mostraron remociones mayores, pasando de 20 ml/L en la entrada del sistema, a valores entre 1 y 1,2 ml/L a la salida del sistema con los tratamientos, todos por debajo del límite de 10 ml/L, lo que demuestra que el biocarbón actúa con mayor eficiencia en la aglomeración de partículas sedimentables, esto puede deberse a la alta área superficial y la propiedad de adsorción. Los valores de grasas y aceites siguieron una tendencia similar de un valor inicial de 1.801,6 mg/L, se redujeron hasta 241,6 mg/L en la contramuestra con 100 litros en la salida del sistema, aunque estos siguen estando muy por encima del límite establecido de 30 mg/L, lo que sugiere que la adsorción de compuestos lipídicos, si bien es apreciable, requiere procesos adicionales para lograr su abatimiento completo. En conjunto, estos resultados indican que el biocarbón contribuye de manera importante a la reducción de carga orgánica, sólidos y grasas, pero no

alcanza los niveles necesarios para asegurar el cumplimiento de la normativa, por lo que se hace indispensable integrar etapas complementarias de tratamiento, tales como coagulación-floculación, filtración avanzada o procesos de oxidación química, a fin de garantizar la depuración requerida para un vertimiento seguro.

La tabla 20 presenta el pH a la entrada del sistema sin tratamiento y salida del sistema con tratamiento, comparándolos con el límite máximo establecidos en la normatividad vigente.

Tabla 20

Comparación de pH a la entrada del sistema (referencia), salida del sistema con biocarbón contrastándola con el límite legal

Parámetros	Unidad	VR.	VR.	VR.	VR.	Artículo
	de	Parámetro	Parámetro	Parámetro	Parámetro	9 R-
	Medida	(mg/l)- E-	(mg/l)- S-80	(mg/l)-S-	(mg/l)-S-	631/2015-
		sistema	L de B	100 L B	100 L	Beneficio
					biocarbón	ecológico
					(C)	
		4,18 a	3.53 a	3,37 a	3.43 a	
pH	Unidades	22,30°C;	22,80°C;	25,80°C;	22,70°C;	5 a 9
		4,28 a	3,56 a	3,42 a	3,53 a	
		23,50°C	2260°C	24,50°C	22,50°C	

Fuente: adaptado de datos de laboratorio AMBILAB S.A.S. (2024) y Resolución 631 de 2015, artículo 9 (MINAMBIENTE, 2015b).

12.3.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO es un indicador fundamental para evaluar la carga orgánica en el agua. Un valor elevado implica una mayor presencia de materia orgánica susceptible de oxidarse, lo cual representa una amenaza significativa para los ecosistemas acuáticos.

En la tabla 21 se presentan los valores de DQO medidos en la entrada del sistema y en dos configuraciones de salida con biocarbón. La DQO inicial (71.950 mg O₂/L) supera ampliamente el límite establecido por el Artículo 9 de la Resolución 631 de 2015 (3.000 mg O₂/L). Aunque los tratamientos con biocarbón lograron reducciones apreciables especialmente el sistema con 100 litros de biocarbón, que alcanzó valores entre 24.705 y 29.358 mg O₂/L, las concentraciones obtenidas continúan muy por encima del valor permitido.

Tabla 21

Comparación de concentración Demanda Química de oxígeno (DQO) a la entrada del sistema y en dos diferentes configuraciones de salida, contrastándola con el límite legal

Parámetros	Unidad de Medida	VR. Parámetro (mg/L)- E-sistema	VR. Parámetro (mg/L)- S-80 L de B	VR. Parámetro (mg/L)-S-100 L de B	VR. Parámetro (mg/L)-S-100 L de B (C)	Artículo 9 R-631/2015-Beneficio ecológico
DQO	mg O ₂ /L	71950	34937	24705	29358	3000

Fuente: adaptado de datos de laboratorio AMBILAB S.A.S. (2024) y Resolución 631 de 2015, artículo 9 (MINAMBIENTE, 2015b).

12.3.3. Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Los SST son materiales en suspensión que pueden causar turbidez, obstrucción de luz solar y transporte de contaminantes adsorbidos, afectando de manera directa la calidad del cuerpo hídrico receptor.

En la tabla 22 se presentan los valores de SST medidos en la entrada del sistema y en dos tratamientos a la salida con biocarbón. La concentración inicial (41.050 mg/L) excede ampliamente el límite establecido por el Artículo 9 de la Resolución 631 de 2015 (800 mg/L). Si bien los tratamientos con biocarbón lograron reducciones importantes, particularmente en el sistema con 100 litros, donde se registraron valores entre 1.720 y 3.800 mg/L, los resultados obtenidos aún superan el valor máximo permitido.

Tabla 22

Compara la concentración de Sólidos suspendidos totales (SST) a la entrada del sistema y en dos diferentes tratamientos a la salida del sistema, contrastándola con el límite legal

Parámetros	Unidad	VR.	VR.	VR. Parámetro	VR. Parámetro	Artículo 9
	de	Parámetro	Parámetro	(mg/L) salida	(mg/L) salida	R-631/2015-
	Medida	(mg/L)	(mg/L) salida	sistema con 100	con 100 L de	Beneficio
		entrada	con 80 L	L biocarbón	biocarbón	ecológico
		sistema	biocarbón		(contramuestra)	
SST	mg/L	41050	2630	1720	3800	800

Fuente: adaptado de datos de laboratorio AMBILAB S.A.S. (2024) y Resolución 631 de 2015, artículo 9 (MINAMBIENTE, 2015b).

12.3.4. Sólidos sedimentables (SS)

El valor inicial (20 ml/L) de los SS excede el límite establecido por la normativa (10 ml/L). Sin embargo, en todas las configuraciones con biocarbón, 80 litros y 100 litros, los valores obtenidos (entre 1 y 1,2 ml/L) se encuentran por debajo del valor máximo permitido.

En la tabla 23 se presentan los valores de SS medidos en la entrada del sistema y en las configuraciones de salida con biocarbón.

Tabla 23

Sólidos sedimentables a la entrada del sistema y en las configuraciones de salida con biocarbón

Parámetros	Unidad	VR.	VR.	VR. Parámetro	VR. Parámetro	Artículo 9
de		Parámetro	Parámetro	(mg/L) salida	(mg/L) salida	R-631/2015-
Medida		(mg/L)	(mg/L) salida	sistema con 100	con 100 L de	Beneficio
		entrada	con 80 L	L biocarbón	biocarbón	ecológico
		sistema	biocarbón		(contramuestra)	
SS	mg/L	20	1	1,2	1	10 mg/L

Fuente: adaptado de datos de laboratorio AMBILAB S.A.S. (2024) y Resolución 631 de 2015, artículo 9 (MINAMBIENTE, 2015b).

12.3.5. Grasas y Aceites

Estos compuestos son difíciles de remover y causan impactos negativos severos si no se tratan adecuadamente. Las grasas y aceites corresponden a compuestos hidrofóbicos que, debido a su baja solubilidad y tendencia a formar películas superficiales, resultan difíciles de remover mediante procesos convencionales. Su presencia en altas concentraciones genera impactos

negativos severos, como obstrucción de sistemas de tratamiento, reducción del intercambio gaseoso y afectación de comunidades acuáticas sensibles.

En la tabla 24 se presentan las concentraciones de grasas y aceites en la entrada del sistema y en las diferentes configuraciones con biocarbón.

Tabla 24

Concentraciones de grasas y aceites en la entrada del sistema y las diferentes configuraciones con biocarbón

Parámetros	Unidad	VR.	VR.	VR. Parámetro	VR. Parámetro	Artículo 9
	de	Parámetro	Parámetro	(mg/L) salida	(mg/L) salida	R-631/2015-
	Medida	(mg/L)	(mg/L) salida	sistema con 100	con 100 L de	Beneficio
		entrada	con 80 L	L biocarbón	biocarbón	ecológico
		sistema	biocarbón		(contramuestra)	
Grasas y	mg/L	1801,6	826	514,8	241,6	30 mg/L
Aceites						

Fuente: adaptado de datos de laboratorio AMBILAB S.A.S. (2024) y Resolución 631 de 2015, artículo 9 (MINAMBIENTE, 2015b).

El tratamiento con biocarbón logra reducir progresivamente la concentración de grasas y aceites, aunque los tratamientos con biocarbón reducen de manera progresiva este parámetro, desde 826 mg/L hasta 241,6 mg/L, las concentraciones alcanzadas continúan muy por encima del valor permitido, incluso en la configuración más eficiente, de igual manera el valor inicial (1801,6 mg/L) supera ampliamente el límite regulatorio de 30 mg/L. Esto sugiere la necesidad de

complementar el proceso con etapas adicionales de separación o adsorción específicas para compuestos lipídicos, con el fin de asegurar un tratamiento adecuado y proteger la integridad del cuerpo hídrico receptor.

12.4. Análisis de porcentaje de reducción

Se evaluaron tres tratamientos de agua residual usando biocarbón en diferentes condiciones de caudal con (80 litros de biocarbón, 100 litros de biocarbón, y 100 litros de biocarbón-contramuestra), con el objetivo de determinar cuál ofrece mayor eficiencia en la remoción de contaminantes clave: DQO, Sólidos Suspendedos Totales (SST), Sólidos Sedimentables (SS), y Grasas y Aceites.

En la figura 20 se presentan los porcentajes de remoción obtenidos para cada tratamiento. El sistema operado con 80 litros de biocarbón alcanzó eficiencias del 51 % en DQO, 94 % en SST, 95 % en SS y 54 % en grasas y aceites. En el tratamiento con 100 litros de biocarbón tratamiento 1, la eficiencia aumentó en la mayoría de los parámetros: 66 % en DQO, 96 % en SST, 94 % en SS y 71 % en grasas y aceites. Por su parte, la configuración 100 litros de biocarbón tratamiento 2 (contramuestra), mostró una remoción ligeramente menor en algunos parámetros, pero destacó por su alta eficiencia en la eliminación de grasas y aceites (87 %). En conjunto, los resultados sugieren que ambas configuraciones de 100 litros de biocarbón mantienen un desempeño superior o comparable al tratamiento con 80 litros, especialmente en términos de estabilidad operativa y capacidad de remoción de contaminantes.

Aunque el comportamiento puede variar ligeramente entre 100 litros y 100 litros (contramuestra), ambas demostraron que el sistema de biocarbón puede sostener eficiencias

elevadas incluso al aumentar el volumen de agua tratado, lo que refleja la robustez del proceso y su potencial aplicación a mayores caudales.

A continuación, se presenta un gráfico de barras que muestra la eficiencia de remoción (%) de los distintos tratamientos para cada uno de los parámetros:

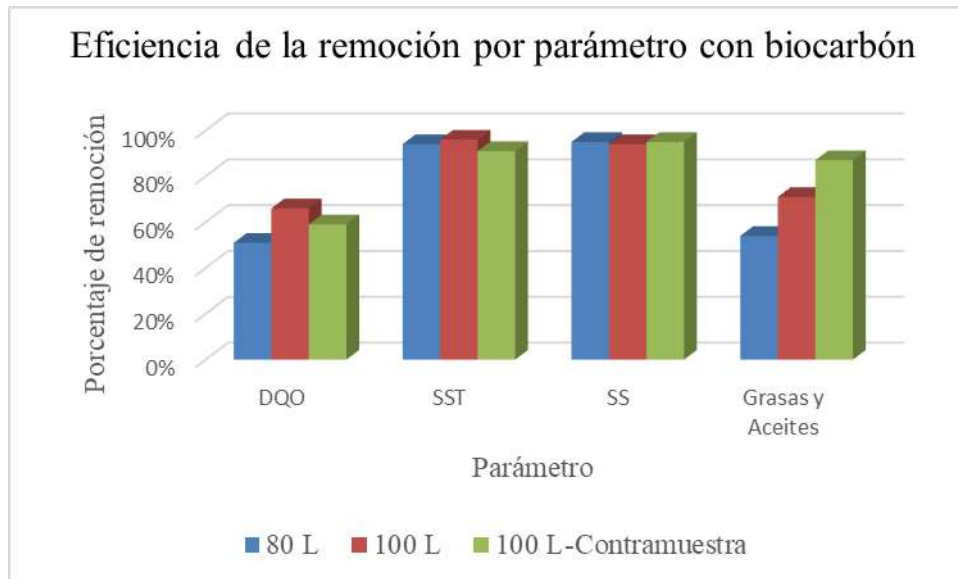


Figura 20. *Eficiencia de remoción por parámetro con biocarbón*

Fuente: adaptado de datos de laboratorio AMBILAB S.A.S (2024)

El uso de biocarbón obtenido a partir de zoca de café mostró una capacidad de remoción significativa en varios parámetros clave, especialmente en DQO, SST, SS y grasas y aceites. Los resultados sugieren que el tratamiento más eficiente fue el de 100 litros de biocarbón contramuestra. Ninguno de los niveles evaluados cumple con la totalidad de los requisitos establecidos por la Resolución 631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, p.8)

12.5. Análisis descriptivo de los parámetros fisicoquímicos

Adicionalmente a los valores promedio, se incorporaron medidas de dispersión con el fin de complementar la interpretación de los datos y evaluar la consistencia de los resultados obtenidos en cada tratamiento. La tabla 25, tabla 26, tabla 27 y tabla 28 presentan el análisis descriptivo de los parámetros DQO, SST, Grasas y Aceites y SS respectivamente, considerando media y variabilidad, y las figuras 21,22,23 y 24 muestran la comparación de DQO, SST, grasas y Aceites y SS con barras de error (desviación estándar), las cuales presentan la desviación estándar de los datos, permitiendo visualizar la variabilidad asociada a cada tratamiento. Debido al número limitado de observaciones, los resultados se interpretan con un enfoque descriptivo.

12.5.1. Análisis de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Los resultados obtenidos sugieren una reducción en la concentración de materia orgánica tras la aplicación de los tratamientos con biocarbón. El tratamiento con 100 litros presentó menores concentraciones residuales en comparación con 80 litros, lo que sugiere una mayor eficiencia en la remoción. No obstante, los datos corresponden a mediciones puntuales, por lo que deben interpretarse como tendencias descriptivas.

Desde el punto de vista de la variabilidad, el tratamiento con 80 litros presenta mayor consistencia ($CV=6,23\%$) frente a 100 litros ($CV=17,19\%$), lo que indica menor dispersión en los resultados. Como lo muestra la tabla 25.

Tabla 25

Análisis descriptivo del parámetro DQO considerando media y variedad

<i>Tratamiento</i>	<i>Número de observaciones</i>	<i>DQO promedio (mg/L)</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>CV (%)</i>
80 L	3	37495,30	2336,69	6,23
100 L	3	29650,00	5097,28	17,19

Fuente: elaboración propia, análisis estadístico (2024).

En términos de dispersión, el tratamiento con 80 litros presenta una desviación estándar de 2336,69 mg/L y un coeficiente de variación de 6,23 %, lo que indica una alta consistencia en los datos. En contraste, el tratamiento con 100 litros presenta una mayor variabilidad (desviación estándar de 5097,28 mg/L y coeficiente de variación de 17,19 %), lo que sugiere que, aunque alcanza menores concentraciones promedio, su comportamiento es menos uniforme.

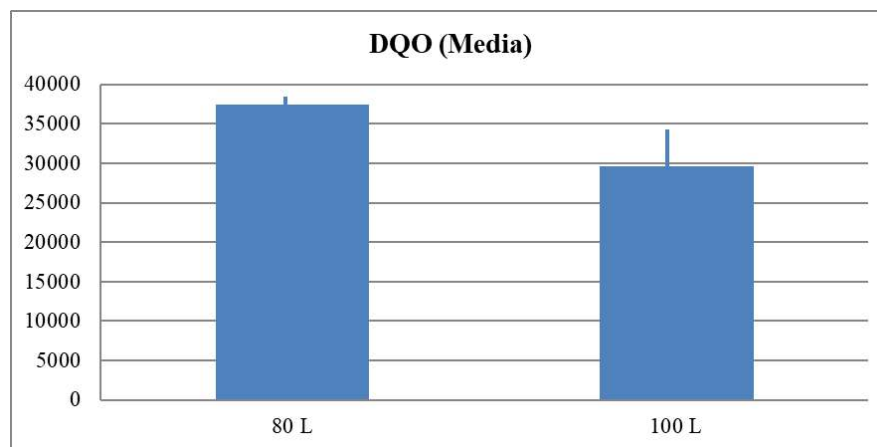


Figura 21. Comparación de DQO con barras de error (desviación estándar).

Fuente: elaboración propia a partir de datos de laboratorio (2024).

12.5.2. Análisis de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Los resultados muestran una disminución en la concentración del efluente. El tratamiento con 80 litros presentó menores valores promedio que el de 100 litros. En los datos observados el

incremento de volumen del biocarbón no se asoció con menores concentración promedio de SST.

Como lo evidencia la tabla 26

Tabla 26

Análisis descriptivo del parámetro SST considerando media y variedad

<i>Tratamiento</i>	<i>Número de observaciones</i>	<i>SST promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>CV (%)</i>
80 L	3	2359,00	313,93	13,31
100 L	3	2756,67	1040,02	37,73

Fuente: elaboración propia, análisis estadístico (2024).

Desde el punto de vista de la variabilidad, el tratamiento con 80 litros presenta una desviación estándar de 313,93 mg/L y un coeficiente de variación de 13,31 %, mientras que el tratamiento con 100 litros presenta una desviación estándar considerablemente mayor (1040,02 mg/L) y un coeficiente de variación de 37,73 %. Esto indica que el tratamiento con 80 litros no solo presenta menores concentraciones promedio, sino también un comportamiento más estable en la remoción de sólidos suspendidos.

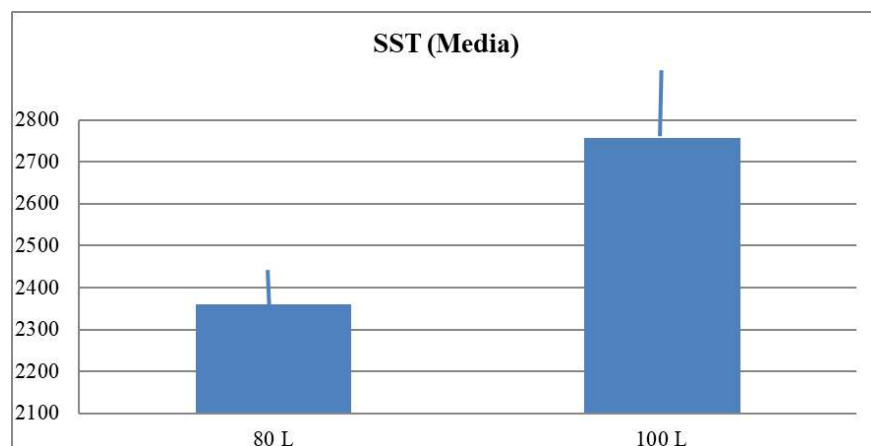


Figura 22. Comparación de SST con barras de error (desviación estándar).

Fuente: elaboración propia a partir de datos de laboratorio (2024).

12.5.3. Análisis de Grasas y Aceites

Se evidenció una reducción considerable en ambos tratamientos, presentando menores concentraciones residuales de compuestos lipídicos en las concentraciones con 100 litros de biocarbón.

El tratamiento con 100 litros mostró menor promedio pero mayor variabilidad; 80 litros fue más estable tabla 27

Tabla 27

Análisis descriptivo del parámetro Grasas y Aceites considerando media y variedad

<i>Tratamiento</i>	Número de observaciones	Grasas y aceites promedio	Desviación estándar	CV (%)
<i>80 L</i>	3	824,53	18,54	2,25
<i>100 L</i>	3	368,30	137,67	37,38

Fuente: elaboración propia, datos estadísticos (2024)

En términos de variabilidad, el tratamiento con 80 litros presenta una desviación estándar de 18,54 mg/L y un coeficiente de variación de 2,25 %, lo que indica un comportamiento altamente consistente. Por el contrario, el tratamiento con 100 litros presenta una desviación estándar considerablemente mayor (137,67 mg/L) y un coeficiente de variación de 37,38 %, evidenciando una mayor dispersión en los datos. Esto sugiere que, aunque el tratamiento con 100 litros logra una mayor reducción en promedio, su desempeño es menos uniforme en comparación con el tratamiento de 80 litros.

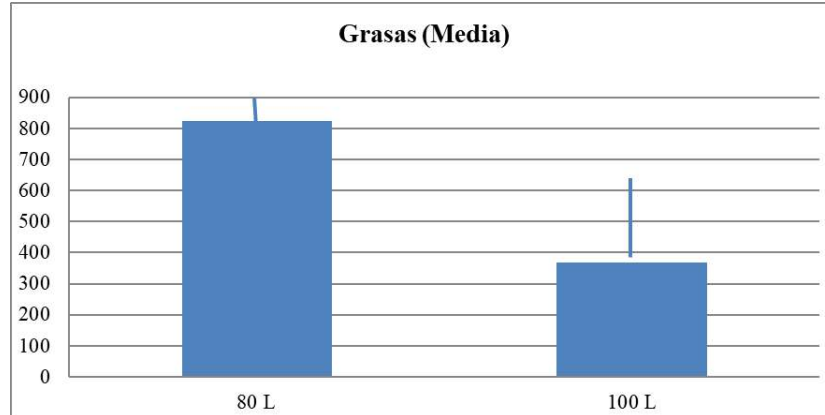


Figura 23. Comparación de Grasas y Aceites con barras de error (desviación estándar).

Fuente: elaboración propia a partir de datos de laboratorio (2024).

12.5.4. Sólidos suspendidos (SS)

Los resultados muestran valores similares entre tratamientos, indicando un comportamiento estable del sistema frente a este parámetro.

La variabilidad en los valores de sólidos sedimentables es baja en ambos tratamientos, con coeficientes de variación de 7,65 % para 80 litros y 9,14 % para 100 litros, lo que indica un comportamiento estable del sistema. Las diferencias entre tratamientos son mínimas, lo que refuerza la interpretación de un desempeño similar en la remoción de este parámetro, como se puede ver en la tabla 28

Tabla 28

Análisis descriptivo del parámetro SS considerando media y variedad

<i>Tratamiento</i>	<i>Número de observaciones</i>	<i>SS promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>CV (%)</i>
80 L	3	1,07	0,08	7,65
100 L	3	1,11	0,10	9,14

Fuente: elaboración propia, datos estadísticos (2024)

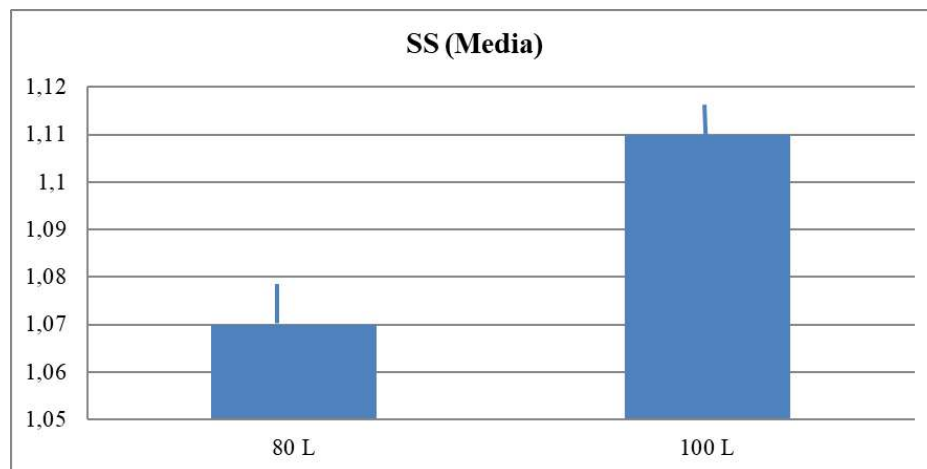


Figura 24. Comparación de SS con barras de error (desviación estándar)

Fuente: elaboración propia a partir de datos de laboratorio (2024).

12.6. Análisis complementario de los datos

Con el fin de explorar posibles diferencias entre los tratamientos evaluados, se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) únicamente como una herramienta exploratoria complementaria para comparar tendencias observadas entre tratamientos, sin fines inferenciales, para cada uno de los parámetros fisicoquímicos analizados. Aunque el estudio consideró únicamente dos niveles de tratamiento y no contó con réplicas experimentales independientes, esta herramienta estadística

fue empleada con un enfoque exploratorio para evaluar tendencias de variación entre tratamientos.

Previo a la aplicación del análisis, se evaluaron los supuestos estadísticos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. No obstante, debido al número limitado de observaciones disponibles y a que las muestras analizadas correspondieron a submuestras obtenidas del mismo sistema experimental, los resultados no deben interpretarse como evidencia inferencial concluyente, sino como aproximaciones descriptivas útiles para orientar futuras investigaciones.

La tabla 29 presenta la evaluación exploratoria de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas para los parámetros fisicoquímicos analizados, mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene. Estos análisis se realizaron con el propósito de verificar, de manera orientativa, la compatibilidad de los datos con los supuestos requeridos para la aplicación exploratoria del análisis de varianza (ANOVA).

Tabla 29

Evaluación exploratoria de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas

<i>Parámetro</i>	<i>Normalidad</i>	<i>Homogeneidad de varianzas</i>	<i>Alcance de la evaluación</i>
<i>DQO</i>	Revisión exploratoria	Revisión exploratoria	Interpretación descriptiva
<i>SST</i>	Revisión exploratoria	Revisión exploratoria	Interpretación descriptiva
<i>SS</i>	Revisión exploratoria	Revisión exploratoria	Interpretación cautelosa

<i>Grasas y aceites</i>	Revisión exploratoria	Revisión exploratoria	Interpretación descriptiva
-----------------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------------

Fuente: Diseño estadístico (2024)

Los resultados obtenidos sugieren que los parámetros DQO, SST y Grasas y Aceites presentan un comportamiento compatible con los supuestos evaluados, lo que permitió utilizar el análisis estadístico con fines descriptivos y exploratorios. En el caso de los sólidos sedimentables (SS), los resultados indican la necesidad de una interpretación más cautelosa, debido a posibles limitaciones asociadas a la distribución de los datos o a la variabilidad observada.

Con el propósito de complementar la descripción de los datos obtenidos, se realizó una evaluación estadística mediante el software Statgraphics. Debido a que el estudio no contó con réplicas experimentales independientes, los resultados presentados en esta sección deben interpretarse exclusivamente como una herramienta de apoyo para la identificación de tendencias observadas en los datos y no como evidencia concluyente de diferencias estadísticas entre tratamientos. En consecuencia, los valores obtenidos se emplean únicamente con fines descriptivos y exploratorios, en concordancia con las limitaciones metodológicas previamente expuestas.

12.6.1. Análisis complementario de los datos para DQO

La tabla 30 resume los resultados de la prueba ANOVA para DQO por tratamiento

Tabla 30

Resultados de la prueba ANOVA para DQO por Tratamiento

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	9,23239E7	1	9,23239E7	5,87	0,0725
Intra grupos	6,28847E7	4	1,57212E7	-	-
Total (Corr.)	1,55209E8	5	-	-	-

Fuente: datos estadísticos (2024)

El análisis de varianza aplicado a los valores de DQO presentó una razón F de 5,87 y un valor p de 0,0725. Estos resultados se presentan únicamente como una referencia numérica complementaria para describir el comportamiento observado en los datos. Debido a las limitaciones del diseño experimental y a la ausencia de réplicas independientes, cualquier diferencia observada debe interpretarse como una tendencia preliminar y no como evidencia estadísticamente concluyente.

Desde el punto de vista descriptivo, el tratamiento con menor concentración de DQO presentó menores valores observados de carga orgánica durante el periodo evaluado, aunque estos resultados deben ser confirmados con un mayor número de observaciones.

La prueba de comparación de medias permitió observar un comportamiento similar entre los tratamientos, sin evidenciar separaciones claras.

12.6.2. Análisis complementario de los datos para SST

La tabla 31 resume los resultados de una prueba ANOVA para SST por tratamiento

Tabla 31

ANOVA para SST por Tratamiento

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	237208,0	1	237208,	0,40	0,5605
Intra grupos	2,36037E6	4	590093,	-	-
Total (Corr.)	2,59758E6	5	-	-	-

Fuente: elaboración propia, análisis estadístico (2024).

El análisis de varianza para SST presentó una razón F de 0,40 y un valor p de 0,5605. Bajo las condiciones del estudio, los valores observados mostraron un comportamiento similar entre los tratamientos evaluados. No obstante, debido a las limitaciones del diseño experimental, esta observación debe interpretarse únicamente de manera descriptiva y exploratoria.

Estos resultados no evidenciaron tendencias claras de un comportamiento diferencial asociado al incremento del volumen de biocarbón, no se genera un comportamiento diferencial sobre la remoción de sólidos suspendidos bajo las condiciones del estudio.

La tabla 32 muestra las medias, el error estándar agrupado y los límites de un intervalo de confianza.

Tabla 32

Medias y variabilidad para SST por Tratamiento

Error Est.

Tratamiento	Casos	Media	(s agrupada)	Valor	Valor
				Inferior Observado	Superior Observado
80 L	3	2359,0	443,506	1488,29	3229,71
100 L	3	2756,67	443,506	1885,95	3627,38
Total	6	2557,83	-	-	-

Fuente: elaboración propia, análisis estadístico (2024).

Estos resultados sugieren que el incremento en el volumen de biocarbón no genera un comportamiento diferencial sobre la remoción de sólidos suspendidos bajo las condiciones del estudio.

La prueba de comparación de medias mostró agrupaciones similares entre tratamientos, lo que refuerza la interpretación de un comportamiento comparable

12.6.3. Análisis complementario de los datos para SS

La tabla 33 muestra los resultados de una prueba ANOVA que compara las medias de dos grupos (indicado por Gl=1 en "Entre grupos").

Tabla 33

Análisis de varianza (ANOVA) para SS

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón- F	Valor- P
--------	----------------------	----	-------------------	-------------	-------------

Entre grupos	0,0024	1	0,0024	0,28	0,6233
Intra grupos	0,034	4	0,0085	-	-
Total (Corr.)	0,0364	5	-	-	-

Fuente: Elaboración propia, análisis estadístico (2024).

El análisis de varianza aplicado a los valores de Sólidos Sedimentables (SS) presentó una razón F de 0,28 y un valor p de 0,6233. Estos resultados se presentan únicamente como una referencia numérica complementaria para describir el comportamiento observado en los datos. Bajo las condiciones evaluadas, la variabilidad registrada fue mayor dentro de los tratamientos que entre ellos. De manera consistente, la comparación de medias mostró valores similares entre los tratamientos evaluados. Debido a la ausencia de réplicas experimentales independientes, estas observaciones deben interpretarse únicamente desde una perspectiva descriptiva y exploratoria.

Este resultado sugiere que la variabilidad observada en los datos se explica principalmente por la dispersión interna y no por el comportamiento del tratamiento, lo que podría implicar un comportamiento similar entre los tratamientos evaluados.

La comparación de medias confirma esta tendencia, mostrando agrupaciones homogéneas entre los tratamientos.

12.6.4. Análisis complementario de los datos para Grasa y Aceites

La tabla 34 resume los resultados de una prueba ANOVA que compara las medias de dos grupos.

Tabla 34

Análisis de varianza (ANOVA) para Grasas y Aceites

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	312223,	1	312223,	32,36	0,0047
Intra grupos	38594,9	4	9648,73	-	-
Total (Corr.)	350818,0	5	-	-	-

Fuente: elaboración propia, análisis estadístico (2024).

El análisis de varianza aplicado a los datos de grasas y aceites presentó una razón F de 32,36 y un valor p de 0,0047. Estos resultados se presentan únicamente como una referencia numérica complementaria para describir el comportamiento observado en los datos. Bajo las condiciones evaluadas, se registraron menores concentraciones de grasas y aceites en el tratamiento con mayor volumen de biocarbón. Asimismo, la comparación de medias mostró diferencias en los valores observados entre los tratamientos. Debido a la ausencia de réplicas experimentales independientes y a las limitaciones del diseño experimental, estas observaciones deben interpretarse únicamente desde una perspectiva descriptiva y exploratoria, por lo que no constituyen evidencia estadística concluyente.

Se observa una tendencia hacia menores concentraciones de grasas y aceites en el tratamiento con mayor volumen de biocarbón, lo que sugiere un posible comportamiento del material en la remoción de compuestos lipídicos.

La comparación de medias permite identificar patrones diferenciados entre tratamientos.

12.7. Síntesis del análisis estadístico

En general, el análisis de varianza permitió identificar tendencias en el comportamiento de los parámetros evaluados frente a los tratamientos con biocarbón.

No obstante, debido a las limitaciones asociadas al número de observaciones y a la naturaleza del muestreo en condiciones reales de operación, los resultados deben interpretarse con cautela, priorizando un enfoque descriptivo sobre uno inferencial.

En este contexto, el uso de biocarbón muestra potencial en la remoción de contaminantes, especialmente en el caso de grasas y aceites, mientras que en otros parámetros el comportamiento entre tratamientos es similar.

13. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El estudio evaluó el comportamiento del uso de biocarbón, en dos concentraciones (80 litros y 100 litros), sobre parámetros clave del tratamiento de aguas residuales del beneficio ecológico del café. A continuación, se resumen los principales hallazgos:

13.1. Condiciones ambientales (temperatura y humedad):

Aunque no fueron variables controladas, la temperatura y la humedad relativa mostraron diferencias relevantes entre los tratamientos, lo que pudo estar asociado con las diferencias observadas durante el estudio. El tratamiento con 100 litros de biocarbón se realizó bajo condiciones más cálidas (24,7 °C) y más secas (53,9 %), mientras que los tratamientos con 80 litros con biocarbón y la referencia (entrada del sistema) se desarrollaron en ambientes más frescos y húmedos (22–23 °C y 80 % de humedad). Estas diferencias ambientales podrían haber afectado procesos fisicoquímicos como la adsorción de contaminantes, la actividad microbiana y la

evaporación, por lo que deben considerarse como posibles factores de confusión al interpretar los efectos del biocarbón.

13.2. Caudal

El análisis estadístico mostró medias similares entre la referencia (entrada del sistema) y los tratamientos con biocarbón (80 y 100 litros y 100 litros (contramuestra), sin evidenciar diferencias claras en las condiciones evaluadas. Esto sugiere que el uso de biocarbón no afectó significativamente el caudal del sistema entre tratamientos, manteniendo una dinámica estable en el flujo del agua tratada.

13.3. Potencial de hidrógeno (pH)

Los valores de pH en todas las muestras analizadas, incluyendo la referencia (entrada del sistema), se mantuvieron por debajo del rango permitido (5 a 9 unidades), Resolución 631 de 2015. El biocarbón mostró un comportamiento acidificante, siendo más notorio en el tratamiento con 100 litros de biocarbón, donde el pH descendió hasta 3,37. Este fenómeno puede deberse a la presencia de ácidos orgánicos remanentes y a la acción amortiguadora del biocarbón. Dado que los valores resultantes no cumplen con la normativa, se recomienda la implementación de una etapa de corrección de pH posterior al tratamiento.

13.4. Reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Con el tratamiento de biocarbón se evidencia una tendencia de reducción de la DQO de manera notable, de 71.950 mg/L en la referencia (entra del sistema) a valores entre 24.705 y 34.937 mg/L en los tratamientos de 100 litros y 80 litros con biocarbón respectivamente. Estas cifras reflejan remoción superior al 66%; sin embargo, los valores finales aún superan el límite permisible (3000 mg/l), lo cual indica que el uso de biocarbón como tratamiento único no es suficiente para

garantizar el cumplimiento legal, siendo necesario su acoplamiento con otras tecnologías de depuración, como sistemas biológicos o humedales construidos.

13.5. Remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Sedimentables (SS)

Los resultados muestran una notable remoción de sólidos. Los SST disminuyeron de 41.050 mg/L a la entrada del sistema (referencia) a 1.720 mg/L con 100 litros de biocarbón y 3.800 mg/L con 100 litros de biocarbón (contramuestra), pese a esta remoción, aún no cumple con la normatividad; en cuanto a los SS se redujeron de 20 mg/L entrada del sistema (referencia) a niveles entre 1 y 1,2 mg/L con 80 litros y 100 litros de biocarbón, respectivamente, para este parámetro se cumplen con los valores permitidos por la normativa ambiental. Estos datos sugieren un potencial del biocarbón como medio filtrante para la eliminación de partículas sedimentables, lo que favorece su inclusión en sistemas de tratamiento primario o intermedio.

13.6. Comportamiento de Grasas y Aceites

Aunque se observaron porcentajes de remoción de grasas y aceites entre 54% y 87%, las concentraciones finales registradas (241,6–826 mg/L) en los tratamientos con 100 litros y 80 litros de biocarbón permanecieron por encima del límite de 30 mg/L establecido por la normativa vigente. Bajo las condiciones evaluadas, los menores valores observados en la concentración de grasas y aceites se registraron en los tratamientos con biocarbón; sin embargo, estos resultados no fueron suficientes para alcanzar el cumplimiento normativo. En consecuencia, se recomienda evaluar la incorporación de unidades complementarias de separación física, como trampas de grasa, o tecnologías específicas de tratamiento que permitan mejorar la reducción de este parámetro.

A continuación, se presentan los porcentajes de remoción de los contaminantes DQO, SST, SS, y Grasas y Aceites, para los tres tratamientos con biocarbón (80 litros, 100 litros, y 100 litros (contramuestra)):

- Remoción de sólidos: La remoción de SST osciló entre 91% y 96%, y la de SS entre 94% y 95% en todos los tratamientos. Esto indica que el biocarbón es una solución viable para cumplir con la normativa colombiana en la reducción de sólidos sedimentables.
- Remoción de carga orgánica: La remoción de DQO (Demanda Química de Oxígeno) fue mucho menor, variando entre 51% y 66%. Esto sugiere que, si bien es útil, el biocarbón no es una solución completa por sí solo para remover carga orgánica.
- Remoción de Grasas y Aceites: El porcentaje de remoción de Grasas y Aceites mejoró notablemente con el aumento del volumen de biocarbón, pasando de 54% (80 litros) a 87% (100 litros contramuestra).

Bajo las condiciones específicas del estudio, el tratamiento con 100 litros de biocarbón mostró una tendencia hacia mayores porcentajes de remoción en parámetros los fisicoquímicos evaluados (DQO, SST, SS y Grasas y Aceites). Sin embargo, estos resultados deben interpretarse de manera exploratoria debido a las limitaciones del diseño experimental y la ausencia de réplicas independientes.

14. RECOMENDACIONES

14.1. Recomendaciones metodológicas

- ✓ Ampliar el número de réplicas y considerar diseños experimentales con mayor control ambiental, con el fin de obtener resultados más confiables y reducir la variabilidad experimental

- ✓ Controlar de manera más estricta factores ambientales y operativos que puedan influir en parámetros como la DQO y la eficiencia de remoción.
- ✓ Mantener el caudal dentro de rangos controlados y homogéneos para asegurar tiempos de contacto adecuados entre el agua residual y el biocarbón.
- ✓ Realizar estudios de cinética y equilibrio para comprender con mayor precisión las reacciones y mecanismos involucrados en el proceso de adsorción.

14.2. Recomendaciones operativas y fisicoquímicas

- ✓ Incorporar agentes alcalinizantes, como cal o hidróxido de sodio, para contribuir a la regulación del pH durante el tratamiento.
- ✓ Optimizar procesos físicos como sedimentación, filtración y coagulación-floculación, así como evaluar el uso de membranas de microfiltración como tratamiento terciario.
- ✓ Incorporar trampas de grasa o sistemas de flotación por aire disuelto (DAF) para mejorar la separación previa de grasas y aceites antes de la aplicación del biocarbón.
- ✓ Evaluar la integración de tecnologías complementarias, como procesos de oxidación avanzada (ozono o peróxidos) y sistemas biológicos adicionales, entre ellos biofiltros o lodos activados.

14.3. Recomendaciones para futuras líneas de investigación

- ✓ Profundizar en el análisis de los mecanismos de adsorción y retención del biocarbón, incluyendo estudios relacionados con la química superficial y la estructura porosa del material.
- ✓ Continuar evaluando distintos tipos de biocarbón, dosis de aplicación, tiempos de contacto y condiciones operativas que permitan optimizar su desempeño en el tratamiento de aguas residuales.

- ✓ Analizar la viabilidad de tratamientos combinados, integrando biocarbón con tecnologías biológicas o químicas, para incrementar la eficiencia de remoción de contaminantes.
- ✓ Ampliar la investigación en contextos rurales y agroindustriales con el propósito de validar la aplicabilidad del biocarbón en diferentes condiciones de operación.

15. CONCLUSIONES

El biocarbón obtenido a partir de la zoca de café mostró potencial como material adsorbente en el tratamiento de aguas residuales del beneficio ecológico del café, sugiriendo reducciones importantes en la concentración de contaminantes como Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Sedimentables (SS) y Grasas y Aceites, en comparación con las condiciones de entrada del sistema.

A pesar de las tendencias favorables de remoción observadas, los valores finales de los parámetros fisicoquímicos evaluados no cumplieron con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 9 de la Resolución 631 de 2015. Esto que indica que el sistema evaluado, bajo las condiciones de operación estudiadas, no es suficiente para garantizar el cumplimiento normativo. Además, los resultados deben interpretarse de manera exploratoria debido a las limitaciones metodológicas de diseño experimental, particularmente por la ausencia de réplicas independientes.

El incremento del volumen de biocarbón de 80 litros a 100 litros mostró tendencias variables en los parámetros evaluados y no evidenció una mejora consistente en todos los casos. Esto sugiere que el desempeño del biocarbón depende del tipo de contaminante y de las condiciones específicas del sistema. Los hallazgos constituyen evidencia preliminar útil para

futuras investigaciones destinadas a validar estadísticamente el comportamiento del biocarbón en sistemas SMTA.

El análisis de los resultados se abordó desde un enfoque descriptivo, debido al número limitado de observaciones disponibles, por lo cual las diferencias entre tratamientos deben interpretarse como tendencias y no como evidencia concluyente.

Las variables operativas del sistema, como el caudal, la temperatura y las condiciones ambientales, influyen en la eficiencia del tratamiento, lo que resalta la importancia de controlar estos factores en futuras investigaciones.

Se concluye que, aunque el biocarbón representa una alternativa sostenible y de bajo costo para la remoción de contaminantes, es necesario optimizar su aplicación dentro del sistema SMTA, así como implementar diseños experimentales con mayor número de réplicas, que permitan validar estadísticamente su desempeño.

16. BIBLIOGRAFÍA

- Al-Awadhi, Y. M., Pradhan, S., McKay, G., Al-Ansari, T., & Mackey, H. R. (2022). Coffee Waste Biochar: A Widely Available and Low-cost Biomass for Producing Carbonaceous Water Treatment Adsorbents. *Chemical Engineering Transactions*, 92, 319–324.
<https://doi.org/10.3303/CET2292054>
- Burbano, C., Gámez, C., & Panche, D. (2019). Descripción de la Problemática Ambiental del Sector.
- Dong, X., Chu, Y., Tong, Z., Sun, M., Meng, D., Yi, X., Gao, T., Wang, M., & Duan, J. (2024). Mechanisms of adsorption and functionalization of biochar for pesticides: A review. In *Ecotoxicology and Environmental Safety* (Vol. 272). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116019>
- Duran-Barragan, J. E., & Angulo-De-Castro, I. (2022). Alternativas para el tratamiento de aguas residuales para el pequeño caficultor en el municipio de Jericó. *EIA*, 19.
<https://doi.org/10.24050/reia>
- Guzmán Julier Patricia. (2021). Impactos ambientales causados por el beneficio húmedo de café sobre el recurso hídrico en unidades productivas de la vereda El Cascajal del municipio de Timaná, en el departamento del Huila. [Universidad de Manizales].
<https://ridum.umanizales.edu.co/server/api/core/bitstreams/49bfd829-c705-4b55-9e3b-43f771675157/content>
- Kazemi Shariat Panahi, H., Dehghani, M., Ok, Y. S., Nizami, A. S., Khoshnevisan, B., Mussatto, S. I., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., & Lam, S. S. (2020). A comprehensive review of engineered biochar: Production, characteristics, and environmental applications. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 270). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122462>

Muoghalu, C. C., Owusu, P. A., Lebu, S., Nakagiri, A., Semiyaga, S., Iorhemen, O. T., & Manga, M. (2023). Biochar as a novel technology for treatment of onsite domestic wastewater: A critical review. *Frontiers in Environmental Science*, 11(February), 1–22.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1095920>

Pérez-Osorio, G., Avelino-Flores, F., Hernández-Lorenzo, B., Gutiérrez-Arias, J. E. M., Mendoza-Hernández, J. C., & Chavarin-Pineda, Y. (2025). Evaluation of the wastewater impact of coffee wet mill in Xicotepec, Mexico. *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgacion Cientifica*, 28(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2717>

Ramirez Gómez, A., Oliveros Tascón, C. E., & Sanz Uribe, J. R. (2015). MANEJO DE LIXIVIADOS Y AGUAS DE LAVADO EN EL PROCESO DE BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ. *Revista Cenicafé*, 66(1), 47–60.

Ramos Mancheno, A. D. de J. (2024). Efectos del consumo de agua contaminada en la calidad de vida de las personas. *Polo Del Conocimiento*, 9(1), 614–632.
<https://doi.org/10.23857/pc.v9i1.6396>

Chávarro, Y. A. (24 de 12 de 2025). (E. V. Chávarro, & Y. O. Calderón, Entrevistadores) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (07 de marzo de 2015). Resolución 0631 de 2015. p.8.

Universidad Nacional de Colombia. (2025). Informe de resultados medición de porosidad. Informe de laboratorio, Laboratorio de ciencias de la energía de la facultad de minas, Medellín.

Adhikari, S., Mahmud, M. A. P., Duc, M., & Timms, W. (2023). Chemosphere Evaluating fundamental biochar properties in relation to water holding capacity. *Chemosphere*, 328(January), 138620. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138620>

Adhikari, S., Mahmud, M. A. P., Nguyen, M. D., & Timms, W. (2023). Evaluating fundamental biochar properties in relation to water holding capacity. *Chemosphere*, 328. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138620>

Ahmad, M., Upamali, A., Eun, J., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Soo, S., & Sik, Y. (2014). *Chemosphere Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water : A review*. *Chemosphere*, 99, 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>

Al-awadhi, Y. M., Pradhan, S., McKay, G., Al-ansari, T., & Mackey, H. R. (2022). Coffee Waste Biochar : A Widely Available and Low-cost Biomass for Producing Carbonaceous Water Treatment Adsorbents. 92(April), 319–324. <https://doi.org/10.3303/CET2292054>

Carvajal Flórez, E. (2019). Modelo de sorción para la remoción de cobre y plomo de lixiviados de rellenos sanitarios. Universidad Nacional de Colombia.

Comité de Cafeteros del Huila. (2023). INFORME-DE-GESTIÓN-2023-Comité-de-cafeteros-del-Huila. <https://huila.federaciondecafeteros.org/app/uploads/sites/4/2024/05/INFORME-DE-GESTIÓN-2023-Comité-de-cafeteros-del-Huila.pdf>

Federación Nacional de Cafeteros. (2023). EDITORIAL ESTRATEGIA ECONÓMICO Balance mundial cafetero Producción nacional Valor de la cosecha. <https://federaciondecafeteros.org/app/uploads/2023/11/IG-92-CNC-DIGITAL.pdf>

Flammini, A., Brundin, E., Grill, R., & Zellweger, H. (2020). Supply chain uncertainties of small-scale coffee husk-biochar production for activated carbon in Vietnam. *Sustainability (Switzerland)*, 12(19), 1–27. <https://doi.org/10.3390/su12198069>

Galindo, A. (2022). Guía para la implementación de sistemas de tratamiento de las aguas mieles generadas por pequeños productores del sector caficulator en el departamento del

Magdalena. [CORPAMAG]. <https://repositorio.unimagdalena.edu.co/server/api/core/bitstreams/77d2f907-2980-4d11-a40b-463ed25479a9/content>

Pérez Osorio, G., Avelino Flores, F., Hernández, L. B., Gutiérrez, A. J., Mendoza, H. J., & Chavarin, P. Y. (2025). Evaluación del impacto de las aguas residuales del beneficio húmedo del café en Xicotep, México. Volumen 28 No. 1:e2717. Xicotep, México. Obtenido de <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2717>

García Herrán, M., Vargas Martínez, N. O., Bernal Quiroga, F. A., Vega Viviescas, C., Duque Gardeazábal, N., Arboleda Obando, P. F., Roa Lozano, S., Ceballos Iévano, J. L., Montoya Monsalve, J. J., Contreras Trujillo, C. Y., Vesga Güiza, A. M., Peñalosa Díaz, M. del P., Onofre Encinales, C. E., Arévalo Uribe, D., Guzmán Cabrera, A., Rodríguez Ortiz, C., Parada Pui, G., González Valencia, J. E., Tetay Botía, C. N., ... Castañeda Orjuela, C. A. (2019). Estudio Nacional del Agua 2018 (M. Garcia Herrán, N. O. Vargas Martínez, O. Jaramillo Rodríguez, & J. P. Marín Salazar (eds.); 2019th ed.). Panamericana Formas e Impresos S.A 2019.

Garzón Martínez, R. Y. (2020). Análisis de ciclo de vida del proceso de beneficio ecológico del café (BECOLSUB) en el departamento de Santander [Industrial de Santander]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2207.3689>

Hosney, H., ElShourbagy, M., Abdelrady, A., Wagner, T., Borén, E., Ahmed, M., & Lens, P. N. (2025). Micropollutant removal from domestic wastewater effluent by softwood-biochar and sludge-biochar for safe reuse applications. *Water Reuse*, 15(1), 90–108. <https://doi.org/10.2166/wrd.2025.095>

Inyang, U. E. (2016). Physico-Chemical and Sensory Qualities of Functional Bread

Produced from Wholemeal Wheat and Unripe Plantain Composite Flours. *MOJ Food Processing & Technology*, 2(2), 48–53. <https://doi.org/10.15406/mojfpt.2016.02.00031>

Jahromi, N. B., Fulcher, A., & Walker, F. (2021). What Is Biochar and How Different Biochars Can Improve Your Crops. *Natural Resources and Environmental Quality*, September, 1–6. <https://extension.tennessee.edu/publications/Documents/W829.pdf>

Khater, E. S., Bahnasawy, A., Hamouda, R., Sabahy, A., Abbas, W., & Morsy, O. M. (2024). Biochar production under different pyrolysis temperatures with different types of agricultural wastes. *Scientific Reports*, 14(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52336-5>

López Ibarra, J. G. (2023). EVALUACIÓN DEL SISTEMA MODULAR ANAEROBIO COMO ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL LAVADO DEL CAFÉ CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA POPAYÁN 2023. Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.

López Zawada, S., & Moreno Ospina, Y. (2020). Potencialidades agroindustriales y ambientales del biocarbón a partir de la pulpa de café como alternativa sostenible de la economía circular. Trabajo de grado para optar el título de administradora ambiental.

Mondragón-Sánchez, A., Medina-Orozco, L. E., Sánchez-Duque, A., & Núñez-Oregel, V. (2021). Efecto de la aplicación de biocarbón en el rendimiento de maíz en Michoacán, México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.896>

Mukherjee, A., & Lal, R. (2013). Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy*, 3(2), 313–339. <https://doi.org/10.3390/agronomy3020313>

Muoghalu, C. C., Owusu, P. A., Lebu, S., Nakagiri, A., Semiyaga, S., Iorhemen, O. T., &

Manga, M. (2023). Biochar as a novel technology for treatment of onsite domestic wastewater: A critical review. *Frontiers in Environmental Science*, 11(February), 1–22.

<https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1095920>

Nanoscale, C., & Weidenthaler, C. (2011). Nanoscale Pitfalls in the characterization of nanoporous and nanosized materials. 792–810. <https://doi.org/10.1039/c0nr00561d>

Pérez-Cabrera, C. A., Juárez-Lopez, P., Anzaldo-Hernández, J., Alia-Tejacal, I., Salcedo-Pérez, E., & Balois-Morales, R. (2021). Beneficios potenciales del biocarbón en la productividad de cultivos agrícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(4).

<https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2542>

Presidencia de la República de Colombia. (1984). Decreto 1594 de 1984. Departamento Administrativo de La Función Pública.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18617>

Présiga-lópez, D., Rubio-clemente, A., & Pérez, J. F. (2021). Uso del biocarbón como material alternativo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas Use of biochar as an alternative material for the treatment of polluted wastewater. 20(1), 121–134.

<https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021011>

Ramírez Gómez, A., Oliveros Tascón, C. E., & Sanz Uribe, J. R. (2015). MANEJO DE LIXIVIADOS Y AGUAS DE LAVADO EN EL PROCESO DE BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ. 66(1), 46–60.

Rendón, J. R. (2019). Recomendaciones para la renovación de café por medio de zocas. *Avances Técnicos Cenicafé*, 500. <https://doi.org/10.38141/10779/0500>

Rendón, J. R., Grajales, A. M., & Salazar, H. M. (2023). Efecto de la renovación por zoca y podas en la biomasa de raíces de café. *Revista Cenicafé*, 74(1).

<https://doi.org/10.38141/10778/74105>

Stylianou, M., Christou, A., Dalias, P., & Polycarpou, P. (2020). Physicochemical and structural characterization of biochar derived from the pyrolysis of biosolids , cattle manure and spent coffee grounds. *Journal of the Energy Institute*, 93(5), 2063–2073.

<https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.05.002>

Sun, X., Fu, H., Bao, M., Liu, W., Luo, C., Li, Y., Li, Y., & Lu, J. (2022). Development of a new hydrophobic magnetic biochar for removing oil spills on the water surface. *Biochar*.

<https://doi.org/10.1007/s42773-022-00184-9>

Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., & Gu, Y. (2015). Chemosphere Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*, 125, 70–85.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058>

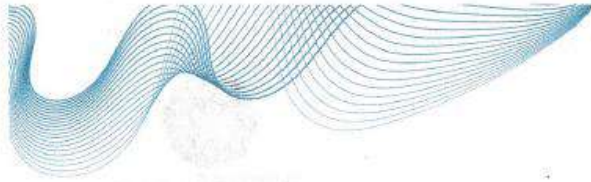
Yan, L., Kang, W., & Ling, F. (2020). The Effects of Activation Conditions on Physical Properties of Activated Carbon (pp. 7640–7647). <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/the-effects-of-activation-conditions-on-physical-properties-of-activated-carbon/>

Zambrano Franco, D. A., Rodriguez Valencia, N., Posada López, U., Orozco R, P. A., & Zambrano Giraldo, A. (2006). *Federación Nacional de Cafeteros de Colombia* (p. 6).

Zungu, V., Hadebe, L., Mpungose, P., Hamza, I., Amaku, J., & Gumbi, B. (2022). Fabrication of Biochar Materials from Biowaste Coffee Grounds and Assessment of Its Adsorbent Efficiency for Remediation of Water-Soluble Pharmaceuticals.

17. ANEXOS

Anexo A. Carta de autorización



Pitalito Huila, 20 octubre de 2024

Señor(a)
Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas
Facultad de ciencias ambientales
Universidad Santo Tomás
Bogotá D.C

Asunto: Autorización para la realización del proyecto de investigación “Evaluación de la Eficiencia del Biocarbón en el Tratamiento de Aguas Residuales del Beneficio Ecológico de Café en Pitalito, Huila”.

Cordial saludo,

En mi calidad de propietario de la Finca El Abismo, ubicada en la vereda Monte Bonito del municipio de Pitalito (Huila, Colombia), concedo de manera expresa el permiso para que los estudiantes de la Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas de la Universidad Santo Tomás, **Efrén Vélez Chavarro**, identificado con cédula de ciudadanía número 12.240.189, y **Yamileth Ortega Calderón**, identificada con cédula de ciudadanía número 36.294.930, utilicen la infraestructura del beneficiadero ecológico y el sistema SMTA 400.

Esta autorización se otorga con el fin de que adelanten las actividades prácticas y la recolección de datos necesarias para el desarrollo de su investigación, de acuerdo con los requerimientos académicos del programa.

Para constancia de lo anterior, se firma en el municipio de Pitalito, Huila, a los veinte (20) días del mes de octubre de 2024.

Olivar Anaconda B.
Olivar Anaconda Benavidez
CC. 76.224.033 expedida en Bolivar Cauca
Propietario Finca el Abismo



VIOLADA INMEDIATAMENTE - SINIES 1704

Anexo B. Análisis fisicoquímico del biocarbón, laboratorio EUROFINS – UMWELT de Alemania



Prüfberichtsnummer: AR-24-FR-035834-01

Seite 1 von 4

Eurofins Umwelt Ost GmbH – Lindenstraße 11 – Gewerbegebiet Freiburg Ost –
D-09627 Bobritzsch-Hilbersdorf

Cotierra AG
Hallwylstrasse 72
8004 Zürich
SCHWEIZ

Titel: Prüfbericht zu Auftrag 12425323
Prüfberichtsnummer: AR-24-FR-035834-01
Auftragsbezeichnung: Untersuchung von Pflanzenkohle
Anzahl Proben: 2
Probenart: Pflanzenkohle
Probenehmer: keine Angabe, Probe(n) wurde(n) an das Labor ausgehändigt
Probeneingangsdatum: 12.06.2024
Prüfzeitraum: 12.06.2024 - 05.07.2024

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfgegenstände. Sofern die Probenahme nicht durch unser Labor oder in unserem Auftrag erfolgte, wird hierfür keine Gewähr übernommen. Dieser Prüfbericht enthält eine qualifizierte elektronische Signatur und darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen in jedem Einzelfall der Genehmigung der EUROFINS UMWELT.

Es gelten die Allgemeinen Verkaufsbedingungen (AVB), sofern nicht andere Regelungen vereinbart sind. Die aktuellen AVB können Sie unter <http://www.eurofins.de/umwelt/avb.aspx> einsehen.

Das beauftragte Prüflaboratorium ist durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 DAkkS akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage (D-PL-14081-01-00) aufgeführten Umfang.

Anhänge:
[XML_Export_AR-24-FR-035834-01.xml](#)

Stefan Seifert
Prüfleitung

+49 3731 2076 615

Digital signiert, 08.07.2024
Katja Schulze
Prüfleitung



Eurofins Umwelt Ost GmbH
Lobstedter Strasse 75
D-07749 Jena

Tel. +49 3641 4649 0
Fax +49 3641 4649 19
info_jena@eurofins.de
www.eurofins.de/umwelt

GF: Marc Hitzke, Axel Ulbricht
Amtsgericht Jena HRB 202596
USt-ID Nr. DE 151 26 1997

Bankverbindung: UniCredit Bank AG
BLZ 207 305 17
Kto 7000000550
IBAN DE37 2073 0017 7000 0055 50
BIC/SWIFT HYVEDEN33

Parameter	Lab.	Akk.	Methode	Probenbezeichnung		biochar sample 1		biochar sample 2	
				Probennummer		124090679		124090686	
				BG	Einheit	anl	wt	anl	wt
Eigenschaften der Pflanzenkohle									
Schüttdichte < 3 mm	FR		im Anlehnung an VOLUFA-Methode A 13.2.1		kg/m³	-	272	-	273
Schüttdichte	FR	FS	DIN EN ISO 17828: 2016-08		kg/m³	222	-	198	-
Wasserhaltekapazität (WHC) < 2 mm	FR		DIN EN ISO 14238, A: 2014-03		%	-	154,4	-	147,3
Gesamtwassergehalt	FR	FS	DIN 51718: 2002-08	0.1	Ma.-%	7.2	-	2.5	-
Aschegehalt (550°C)	FR	FS	DIN 51718: 1997-07	0.1	Ma.-%	4.8	5.2	1.9	2.0
Kohlenstoff gesamt	FR	FS	DIN 51732: 2014-07	0.2	Ma.-%	81.9	88.3	87.2	89.4
Kohlenstoff, organisch	FR		Berechnung		Ma.-%	81.6	88.0	86.6	88.7
Wasserstoff	FR	FS	DIN 51732: 2014-07	0.1	Ma.-%	1.6	1.7	2.7	2.8
Stickstoff, gesamt	FR	FS	DIN 51732: 2014-07	0.05	Ma.-%	1.05	1.13	0.32	0.33
Schwefel (S)	FR	FS	DIN 51724-3: 2012-07	0.03	Ma.-%	0.05	0.06	< 0.03	< 0.03
TIC	FR	FS	DIN 51726: 2004-06	0.1	Ma.-%	0.3	0.3	0.6	0.7
Carbonate-CO2	FR	FS	DIN 51726: 2004-06	0.4	Ma.-%	1.1	1.2	2.3	2.4
pH in CaCl2	FR		DIN ISO 10390: 2005-12			8.8	-	8.6	-
Leitfähigkeit bei 1.2 t Druck	FR		SAA-HLT-Pflanzenkohle (04)	0.01	mS/cm	-	9.2	-	< 0.01
Leitfähigkeit bei 2 t Druck	FR		SAA-HLT-Pflanzenkohle (04)	0.01	mS/cm	-	13	-	0.01
Leitfähigkeit bei 3 t Druck	FR		SAA-HLT-Pflanzenkohle (04)	0.01	mS/cm	-	16	-	0.03
Leitfähigkeit bei 4 t Druck	FR		SAA-HLT-Pflanzenkohle (04)	0.01	mS/cm	-	21	-	0.04
Leitfähigkeit bei 5 t Druck	FR		SAA-HLT-Pflanzenkohle (04)	0.01	mS/cm	-	21	-	0.05

Parameter	Lab.	Akkr.	Methode	Probenbezeichnung		biochar sample 1		biochar sample 2	
				Probennummer		124090679		124090686	
				BG	Einheit	anl	wf	anl	wf
Organ. Schadstoffe a. d. Toluolextrakt n. DIN EN 17503 (Extrakt.-verf. 10.2.3)									
Naphthalin	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	6.6	-	11
Acenaphthylen	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	-	< 0.1
Acenaphthen	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	-	< 0.1
Fluoren	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	0.2	-	0.3
Phenanthren	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	0.9	-	1.5
Anthracen	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	0.3	-	0.5
Fluoranthren	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	0.4	-	0.4
Pyren	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	0.4	-	0.4
Benzo[a]anthracen	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	-	0.2
Chrysen	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	-	0.2
Benzo[b]fluoranthren	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	-	0.1
Benzo[k]fluoranthren	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	-	< 0.1
Benzo[a]pyren	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	-	< 0.1
Indeno[1,2,3-cd]pyren	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	-	< 0.1
Dibenzo[a,h]anthracen	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	-	< 0.1
Benzo[ghi]perylen	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	-	< 0.1
Summe 8 EFSA-PAK exkl. BG	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08		mg/kg	-	(n. b.) ¹⁾	-	0.5
Summe 16 EPA-PAK exkl. BG	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08		mg/kg	-	6.6	-	14.6
Benzo(e)pyren	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	-	< 0.1
Benzo[j]fluoranthren	FR	FS	DIN EN 17503, Verfahren 10.2.3: 2022-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	-	n.b.

				Probenbezeichnung		biochar sample 1		biochar sample 2	
				Probennummer		124090679		124090686	
Parameter	Lab.	Akk.	Methode	BG	Einheit	anl	wf	anl	wf
Elemente aus der Originalsubstanz									
Sauerstoff	FR	F5	DIN 51733: 2016-04		Ma.-%	3.4	3.6	5.4	5.5

Erläuterungen

BG - Bestimmungsgrenze

anl - Anlieferungszustand

wf - wasserfreier Zustand

Lab. - Kürzel des durchführenden Labors

Akk. - Akkreditierungskürzel des Prüflabors

Kommentare zu Ergebnissen

¹⁾ nicht berechenbar

Benzo(j)fluoranthren - n.b.

n.b. - nicht bestimmbar, chromatographische Auflösung $R < 0,8$ (unvollständig aufgelöste Signale durch Peaküberlappung von Benzo(b)fluoranthren und Benzo(j)fluoranthren)

Die mit FR gekennzeichneten Parameter wurden von der Eurofins Umwelt Ost GmbH (Lindenstraße 11, Gewerbegebiet Freiberg Ost, Bobritzsch-Hilbersdorf) analysiert. Die Bestimmung der mit F5 gekennzeichneten Parameter ist nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 DAkkS D-PL-14081-01-00 akkreditiert.

Análisis fisicoquímico del biocarbón, laboratorio EUROFIS – UWELT de Alemania-español

Machine Translated by Google



Umwelt

Número de informe de prueba: AR-24-FR-035534-01

Página 1 de 4

Eurofis Umwelt Ost GmbH – Lindenstraße 11 – Zone comercial Freiburg East –
D-09627 Borna-Zschernitz

Colterra AG
Haltwylstraße 72
8004 Zürich
SUIZA

Título: Informe de prueba para el pedido 12425323
Número de informe de prueba: AR-24-FR-035534-01

Título del pedido: Investigación del biocarbón

Número de muestras: 2
Tipo de ejemplo: biocarbón
Dechado: sin información, la(s) muestra(s) fueron entregadas al laboratorio

Fecha de recepción de la muestra: 12 de junio de 2024
Período de prueba: 12 de junio de 2024 - 5 de julio de 2024

Los resultados de la prueba se refieren exclusivamente a los elementos de prueba examinados. Si el muestreo no fue realizado por nuestro laboratorio o por cuenta nuestra, no se asume ninguna responsabilidad por ello. Este informe de prueba contiene una firma electrónica cualificada y sólo puede distribuirse íntegramente y sin modificaciones. Los extractos o modificaciones requieren en cada caso la aprobación de EUROFIS UWELT.

Se aplican las Condiciones Generales de Venta (AVB) a menos que se hayan acordado otras normas. Puede consultar los Términos y condiciones generales actuales en <http://www.eurofis.de/umwelt/avb.aspx>

El laboratorio de pruebas encargado está acreditado por DAkkS según DIN EN ISO/IEC 17025:2018 DAkkS. La acreditación sólo aplica para el alcance listado en el documento adjunto (D-PL-14081-01-00).

Archivos adjuntos:
IML_Engl_AR-24-FR-035534-01.pdf

S Stefan Seifert
Cabe de prueba
+49 3731 2076 615

Firmado digitalmente el 05/07/2024
Kajja Schulze
pideide



Eurofis Medientechnik Euro GmbH
Lilienthalstraße 75
D-01740 Jena

Tel: +49 3641 4540 0
fax: +49 3641 4540 10
info_jena@eurofis.de
www.eurofis.de/umwelt

Director General: Marc Hübner, Axel Ullrich
Tribunal de distrito de Jena HRG 202596
Número de identificación de VIES: DE 243 121 38 1001

Datos bancarios: UniCredit Bank AG
Código bancario 251201 11
Cuenta 7003000000
IBAN DE07 2512 0117 7003 0005 96
BIC: SWFT 3333DE33

Machine Translated by Google



Umwelt

Número de Informe de prueba: AR-24-FR-035034-01

página 2 de 4

				Nombre de la muestra		muestra de bicarbón 1		muestra de bicarbón 2	
				Número de muestra		124080679		124080686	
parámetro	Laboratorio	Acq. método		kg	Unidad	ar1	ar2	ar1	ar2
Propiedades del bicarbón									
Densidad aparente < 3 mm	FR		Resistencia en Módulo VOLUFA A 12.1		kg/m³	-	272	-	273
Densidad a Gravel	FR	Q5	DIN EN ISO 17026 2010-05		kg/m³	222	-	198	-
Capacidad de retención de agua (WHC) <2mm	FR		DIN EN ISO 14288, A 2014-03		%	-	154,4	-	147,3
Contenido total de agua	FR	Q5	DIN 51718: 2002-08	0,1	Masa%	7,2	-	2,5	-
Contenido de cenizas (550 °C)	FR	Q5	DIN 51719: 1987-07	0,1	Masa%	4,8	5,2	1,9	2,0
Carbono total	FR	Q5	DIN 51732: 2014-07	0,2	Masa%	81,9	86,3	87,2	86,4
carbono, orgánico	FR		cálculo		Masa%	81,6	86,0	86,6	85,7
hidrógeno	FR	Q5	DIN 51732: 2014-07	0,1	Masa%	1,6	1,7	2,7	2,8
Nitrógeno, total	FR	Q5	DIN 51732: 2014-07	0,05	Masa%	1,05	1,13	0,32	0,33
Ázulfre (S)	FR	Q5	DIN 51724-2: 2012-07	0,03	Masa%	0,05	0,06	< 0,03	< 0,03
TIC	FR	Q5	DIN 51726: 2004-08	0,1	Masa%	0,3	0,3	0,6	0,7
Carbonato CO2	FR	Q5	DIN 51726: 2004-08	0,4	Masa%	1,1	1,2	2,3	2,4
pH en CaCl2	FR		DIN ISO 10390: 2005-12			8,5	-	8,6	-
Conductividad a 1,2 l de presión FR			SAA-RU-carbón vegetal (H4)	0,01	ma/cm	-	9,2	-	< 0,01
Conductividad a 2 l de presión	FR		SAA-RU-carbón vegetal (H4)	0,01	ma/cm	-	13	-	0,01
Conductividad a 3 l de presión	FR		SAA-RU-carbón vegetal (H4)	0,01	ma/cm	-	—	-	0,03
Conductividad a 4 l de presión	FR		SAA-RU-carbón vegetal (H4)	0,01	ma/cm	-	21	-	0,04
Conductividad a 5 l de presión	FR		Planta SAA-RU/ carbón (H4)	0,01	ma/cm	-	21	-	0,05

Machine Translated by Google



Umwelt

Número de Informe de prueba: AR-24-FR-035634-01

página 3 de 4

				Nombre de la muestra		muestra de bicarbono 1		muestra de bicarbono 2	
				Número de muestra		124090679		124090686	
parámetro	Laboratorio	Act.	método	kg	Unidad	ar1	ar1	ar1	ar1
Órgano. Sustancias nocivas del extracto de tolueno según DIN EN 17903 (extracto-verf. 10.2.3)									
naftalina	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	8.6	-	11
acenaftileno	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	< 0,1	-	< 0,1
acenafteno	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	< 0,1	-	< 0,1
fluoreno	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	0.2	-	0.3
benzofluoreno	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	0.8	-	1.5
antraceno	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	0.3	-	0.5
fluoranteno	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	0.4	-	0.4
pireno	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	0.4	-	0.4
Benzop[antraceno]	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	< 0,1	-	0.2
Crótin	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	< 0,1	-	0.2
Benzop[fluoranteno]	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	< 0,1	-	0.1
Benzop[fluoranteno]	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	< 0,1	-	< 0,1
Benzop[pireno]	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	< 0,1	-	< 0,1
Indeno[1,2,3-cd]pireno	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	< 0,1	-	< 0,1
Diacezo[ah]antraceno	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	< 0,1	-	< 0,1
Benzop[ghi]perileno	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	< 0,1	-	< 0,1
Total 8 EPA-PAH excl. kg	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08		ng/kg	-	Indenol ¹⁾	-	0.5
Total 16 EPA-PAH excl. kg	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08		ng/kg	-	8.6	-	14.6
Benzop[pireno]	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	< 0,1	-	< 0,1
Benzop[fluoranteno]	FR	Q1	DIN EN 17903, procedimiento 10.2.3. 2022-08	0.1	ng/kg	-	< 0,1	-	—

Machine Translated by Google



Número de Informe de prueba: AR-24-FR-035634-01

Página 4 de 4

Nombre de la muestra				muestra de bicarbon 1				muestra de bicarbon 2			
Número de muestra				124000679				124000680			
parámetro	Laboratorio	Acc:	método	bg	Unidad	anl	ef	anl	ef		
Elementos de la sustancia original:											
oxígeno	FR	Q5	DIN 51712 2016-04		Masa%	3.4	3.6	3.4	3.5		

Explicaciones

BG - Límite de determinación y

- Condiciones de entrega

ef - estado anhidro

Laboratorio - Abreviatura del laboratorio conductor

Acc - Abreviatura de acreditación del laboratorio de ensayos

Comentarios sobre los resultados 1)

no calculable

Benzon[[Buzonileno - nB

nb: no se puede determinar, resolución cromatográfica R<0.8 (señales resueltas de forma incompleta debido a la superposición de picos de benzon[[Buzonileno y benzon[[Buzonileno)

Los parámetros marcados como FR fueron analizados por Eurofins Umwelt Oel GmbH (Unterstrasse 11, área comercial Preiberg Oel, Boletztach-Hilbersdorf). La determinación de los parámetros marcados P5 está acreditada según DIN EN ISO/IEC 17025:2018 DAAS D-PL-14081-01-00.

Anexo C. Análisis fisicoquímico del biocarbón, laboratorio Universidad Nacional de Colombia, Facultad Ciencias de la Energía

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	Laboratorio de Ciencias de la Energía	Fecha: 09/07/2025
		Versión: 01
	INFORME DE RESULTADOS	Solicitante: COTIERRA
		Páginas: 1

Solicitud: Extensión

Fecha de reporte: 09/06/2025

Cliente: Luz Daniela Trujillo

Muestra: Una muestra de biochar

RESULTADOS:

Equipo donde se realiza el ensayo

Analizador de porosidad TriStar II Plus de Micromeritics®

Metodología

Previo a las mediciones de adsorción, las muestras fueron desgasificadas a una temperatura de 250°C por un periodo de 24 horas, con el fin de liberar la humedad contenida en los poros. El área superficial y volumen de microporos fueron calculadas a partir de las isotermas de adsorción de CO₂ a 237 K, mediante el modelo de adsorción de Dubinin Raduskevich..

RESULTADOS

Los resultados de la medición de porosidad se presentan en un archivo Excel (muestra terminada en -c). A continuación, se presentan los datos más relevantes:

Tabla 1. Resultados principales obtenidos realizando la medición con CO₂, modelo de adsorción Single Point y Dubinin-Raduskevich.

Muestra	Área superficial equivalente (m ² /g)	Capacidad Límite de microporos (cm ³ /g)	Volumen Límite de microporo (cm ³ /g)	Área superficial Single point (m ² /g)
M1_CO2_COTIERRA-c	307.306281	62.667207	0.114719 ± 0.000015	190,9811

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	Laboratorio de Ciencias de la Energía	Fecha: 09/07/2025
		Versión: 01
	INFORME DE RESULTADOS	Solicitante: COTIERRA
		Páginas: 1

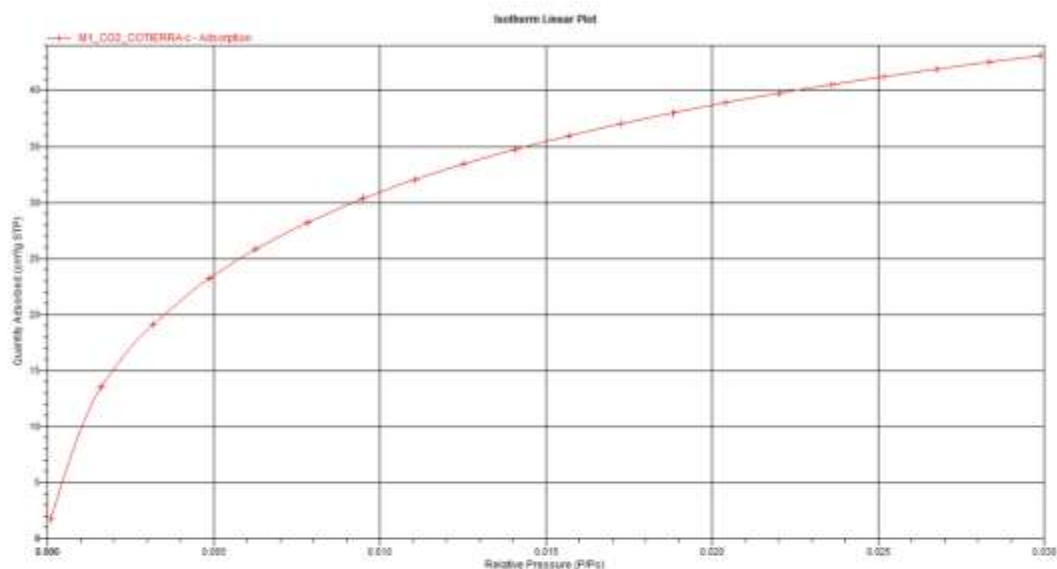


Figura 1. Curva de adsorción de CO₂ de la muestra de Biochar

Observaciones

Este informe no se puede reproducir ni parcial ni totalmente
Los resultados son aplicables solo a la muestra de ensayo

Revisado:

I.Q Carlos A. Londoño Giraldo
Coordinador de Laboratorio
Laboratorio Ciencias de la Energía

INFORME DE ANÁLISIS No: 47
FECHA DE EXPEDICIÓN: Junio 02 de 2025
ANÁLISIS REPORTADOS: 8

INFORMACIÓN DEL USUARIO
NOMBRE: Colanta Colombia S.A.S.
TELÉFONO: 3001190367
e-Mail: nutricion@uasntotomas.edu.co

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA
TIPO: Biocarbón a base de paja de café
IDENTIFICACIÓN: 25060055
FECHA DE RECEPCIÓN: Junio 12 de 2025
FECHA DE EJECUCIÓN: Junio 01 de 2025

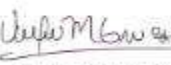
ANÁLISIS	REPORTE	REPORTE	ANÁLISIS	REPORTE	REPORTE
	(Base húmeda)	(Base seca)		(Base húmeda)	(Base seca)
MATERIA SECA (%)	87.5		DIGESTIBILIDAD IN VITRO DE LA MS (%)		
NITRÓGENO (%)			DIGESTIBILIDAD IN VITRO DE LA MS (%)		
PROTEÍNA CRUDA (MS 25) (%)			DIGESTIBILIDAD IN VITRO DE LA MS (%)		
NITRÓGENO NO PROTEÍCO (NPKC)			CALCIO (%)		
NITRÓGENO SOLUBLE (NPKC)			FÓSFORO (%)		
NITRÓGENO LIGADO A FENOL (%)			POTASIO (%)		
NITRÓGENO LIGADO A FENOL (%)			MAGNESIO (%)		
NITRÓGENO LIGADO A FENOL (%)			SODIO (mg/kg)		
FIBRA CRUDA (%)			MANGANESO (mg/kg)		
FIBRA EN DETERGENTE NEUTRO (%)	48.1	48.4	CRÓMIO (%)		
FIBRA EN DETERGENTE ÁCIDO (%)	39.7	40.8	ZINC (mg/kg)		
LIGNINA (%)	9.1	15.1	COPPER (mg/kg) (1000)		
HEMCELULOSA (%)	9.8	9.8	COPPER (mg/kg) (1000)		
CELULOSA (%)	39.7	40.5	COBALTO (mg/kg) (1000)		
CENIZAS (%)			COBALTO (mg/kg) (1000)		
PH			ENERGÍA ABSOLUTA (kcal/kg)		
			ADUFES (%)		

REFERENCIAS
1 A.O.A.C., 2019. Official Methods of analysis of the Association of Analytical Chemists, (21th ed.)
2 Animal Feed Science and Technology (1996) 57:347-348.
3 Journal of Dairy Science (1991) 74:2583-2587
4 Mediciones indirectas, solubilidad en soluciones detergentes.
Hemicelulosa: Fibra en detergente neutro - Fibra en detergente ácido.
Celulosa: Fibra en detergente ácido - Lignina.

Tiempo de retención de la muestra: 6 meses a partir de la emisión del presente reporte.
Consideración: Los datos reportados por este laboratorio solo podrán ser usados con fines de investigación.

APROBADO POR

JUAN CARLOS FORNAGUERA
Director de Laboratorio

ELABORADO POR

JENIFER ALETH MÚRCILLO GARZÓN
Coordinadora de Laboratorio

Este informe expresa fielmente el resultado de los análisis realizados sobre la muestra recibida. No podrá ser reproducido pero sí totalmente, suceso cuando se haya obtenido previamente permiso escrito por parte del laboratorio que lo emite. Los resultados contenidos en el presente informe, se refieren al momento y condiciones en que se realizaron los análisis y son emitidos exclusivamente con fines de investigación. El laboratorio, que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de los resultados entregados.

Anexo D. Análisis de agua residual laboratorio AMBILAB SAS



Fecha	Resultados Laboratorio No.
2024-11-15	R3961
Formato Informe de Resultado de ensayo AS-TRE-F01 - V 03	
Fecha última revisión y aprobación: 2018-01-31	

Información del Cliente						
Cliente/Empresa				NIT/D.I		
Efrén Velez Chávarro				12340189		
Contacto		Celular		Email		
Efrén Velez Chávarro		3203017546		efrenvelezch@yahoo.es		
Dirección				Ciudad/Departamento		
Centro Pitallito				PITALITO, HUILA		
Referencia de la Muestra						
Procedimiento No.	Plan de muestreo	Muestra No.	Tipo de Agua	Tipo de muestreo	Fecha Toma	Fecha Entrega
AS-TMM-003	2753-1	M3961	Residual	COMPUESTO	2024-10-23	2024-10-23
Muestra tomada por		Lat.	Long.	Alt.	Lugar	
Juan Felipe Ramos		1°34'0.56"	76°5'10.75"	1579 m.s.n.m.	Finca El Abismo, Vereda Monte Bonito	
Punto de muestreo				Fuente		
Entrada SMTA				Entrada al Sistema		

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE VERTIMIENTO AJUSTADO A ACTIVIDADES PRODUCTIVAS DE AGROINDUSTRIA Y GANADERÍA							Resolución 0631/2015 - Art. 9	
Fecha de Análisis	Variable	Unidad	Resultado	Límite de Cuantificación	Técnica	Método	Valores Permisibles	Artículo
2024-10-26	Color Real***	m-t	a(436nm)34,0 a(525nm)12,0 a(620nm)6,0	(436nm)0,28 - (525nm) 0,14 - (620nm)0,06	Espectrofotómetro - Longitud de Onda Simple	UNE-EN-ISO 7887, MÉTODO B	Análisis y Reporte	9
2024-10-25	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)***	mg O2 /L	44440,0	10	Incubación 5 días y Electrodo de Luminiscencia	SM 5210 B, ASTM D888 Método C	N.R.	9
2024-10-31	Demanda Química de Oxígeno (DQO)***	mg O2 /L	71950,0	10	Reflujo Cerrado Colormetría	SM 5220 D	3000 mg/L	9
2024-10-31	Fósforo Total***	mg P/L	100,0	0,5	Espectrofotómetro	SM 4500 P.B., D	Análisis y Reporte	9
2024-10-31	Grasas y Aceites***	mg /L	1801,6	10	Extracción Soxhlet	SM 5520 D Modificado	30 mg /L	9
2024-10-31	Nitrógeno Total Kjeldahl***	mg N/L	1295,5	3	Semi-micro-Kjeldahl	SM 4500-Norg, SM 4500-NH3 B.C	Análisis y Reporte	9
2024-10-31	Sólidos Suspendedos Totales***	mg /L	41050,0	15	Gravimétrico (Secado de 103°C a 105°C)	SM 2540 D	800 mg /L	9
2024-10-23	pH*	Unidades de pH	4,18 a 22,30°C - 4,26 a 23,50°C	N.A.	Electrométrica	SM 4500-H+ B	5,00 - 9,00 Unidades de pH	9
2024-10-23	Sólidos Sedimentables In situ*	mL/L	20	0,1	Volumétrica	SM 2540 F	10,0 mL/L	9

APRECIADO CLIENTE: A partir de la fecha de emisión de los resultados, usted cuenta con treinta (30) días hábiles para hacer alguna observación al respecto, si durante este tiempo no se recibe ninguna información de su parte, **Ambilab S.A.S.** asume la conformidad de los resultados del análisis.

- ANOTACIÓN 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a las muestras analizadas.
- ANOTACIÓN 2: La reproducción parcial de este informe será autorizada por el Laboratorio Ambilab S.A.S.
- ANOTACIÓN 3: Las muestras analizadas en el Laboratorio Ambilab S.A.S, serán desechadas veinte (20) días después de haber sido emitido el informe, a excepción de las variables que tienen menor tiempo de conservación según el Standard Methods.



Fecha	Resultados Laboratorio No.
2024-11-15	R3961

Formato Informe de Resultado de ensayo AS-TRE-F01 - V 03
Fecha última revisión y aprobación 2016-01-31

* Variable Acreditada por Ambilab SAS

** Variable subcontratada no Acreditada

*** Variable subcontratada Acreditada

N.E: No establecido N.A: No aplica N.P: No Presenta N.R: No Reporta + Toma de muestra simple. El valor aquí reportado, esta relacionado en el Informe de campo anexo.



Carolina Pérez B.

CAROLINA PÉREZ BETANCOURT
DIRECTOR LABORATORIO PQ - 1993

Rdo. :

OSCAR EDUARDO VALBUENA CALDERON
DIRECTOR TÉCNICO

Fin Del Reporte.....



Información del Cliente							
Cliente/Empresa						NIT/D.I	
Ehren Velez Chávarro						12340189	
Contacto		Celular		Email			
Ehren Velez Chávarro		3203017540		ehrenvelezch@yahoo.es			
Dirección				Ciudad/Departamento			
Centro Pitalito				PITALITO, HUILA			
Referencia de la Muestra							
Procedimiento No.	Plan de muestreo	Muestra No.	Tipo de Agua	Tipo de muestreo	Fecha Toma	Fecha Entrada	Hora Muestreo
AS-TMM-003	2753-2	M3962	Residual	COMPUESTO	2024-10-23	2024-10-23	15:20
Muestra tomada por		Lat.	Long.	Alt.	Lugar		
Juan Felipe Ramos		1°54'0.20"	76°5'11.05"	1568 m.s.n.m.	Finca El Ablimo, Vereda Monte Bonito		
Punto de muestreo				Fuente			
Salida SMTA				Sistema SMTA 400			

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE VERTIMIENTO AJUSTADO A ACTIVIDADES PRODUCTIVAS DE AGROINDUSTRIA Y GANADERÍA							Resolución 0631/2019 - Art. 9	
Fecha de Análisis	Variable	Unidad	Resultado	Límite de Cuantificación	Técnica	Método	Valores Permisibles	Artículo
2024-10-26	Color Real***	m-1	a(436nm)32 a(525nm)13,5 a(620nm)8,5	(436nm)0,28 - (525nm) 0,14 - (620nm)0,06	Espectrofotómetro - Longitud de Onda Simple	UNE-EN-ISO 7887, MÉTODO B	Análisis y Reporte	9
2024-10-25	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)***	mg O2 /L	29957,5	10	Incubación 5 días y Electrodo de Luminiscencia	SM 5210 B, ASTM D888 Método C	N.R.	9
2024-10-31	Demanda Química de Oxígeno (DQO)***	mg O2 /L	34937,0	10	Refujo Cerrado Colorimetría	SM 5220 D	3000 mg/L	9
2024-10-31	Fósforo Total***	mg P/L	140,0	0,5	Espectrofotómetro -étnico	SM 4500 P B, D	Análisis y Reporte	9
2024-10-31	Grasas y Aceites***	mg /L	826,0	10	Extracción Soxhlet	SM 5520 D Modificado	30 mg /L	9
2024-10-31	Nitrógeno Total Kjeldahl***	mg N/L	534,45	3	Semi-titrado Kjeldahl	SM 4500-Norg, SM 4500-NH3 B.C	Análisis y Reporte	9
2024-10-31	Sólidos Suspendedos Totales***	mg /L	2630,0	15	Gravimétrico (Secado de 103 °C a 105oC)	SM 2540 D	800 mg /L	9
2024-10-23	pH*	Unidades de pH	3,53 a 22,80 °C - 3,56 a 22,60 °C	N.A.	Electrométrica	SM 4500-H+ B	5,00 - 9,00 Unidades de pH	9
2024-10-23	Sólidos Sedimentables in situ*	mL/L	1,0	0,1	Volumétrica	SM 2540 F	10,0 mL/L	9

APRECIADO CLIENTE: A partir de la fecha de emisión de los resultados, usted cuenta con treinta (30) días hábiles para hacer alguna observación al respecto, si durante este tiempo no se recibe ninguna información de su parte; **Ambilab S.A.S.** asume la conformidad de los resultados del análisis.

- ANOTACIÓN 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a las muestras analizadas.
- ANOTACIÓN 2: La reproducción parcial de este informe será autorizada por el Laboratorio Ambilab S.A.S.
- ANOTACIÓN 3: Las muestras analizadas en el Laboratorio Ambilab S.A.S, serán desechadas veinte (20) días después de haber sido emitido el informe, a excepción de las variables que tienen menor tiempo de conservación según el Standard Methods.



Fecha	Resultados Laboratorio No.
2024-11-15	R3962

Formato Informe de Resultado de ensayo AS-TRE-F01 - V 03
Fecha última revisión y aprobación: 2016-01-31

* Variable Acreditada por Ambilab SAS

** Variable subcontratada no Acreditada

*** Variable subcontratada Acreditada

N.E: No establecido N.A: No aplica N.P: No Presenta N.R: No Reporta + Toma de muestra simple. El valor aquí reportado, esta relacionado en el Informe de campo anexo.



Carolina Pérez B.

CAROLINA PÉREZ BETANCOURT
DIRECTOR LABORATORIO PQ - 1993

Rdo. :

OSCAR EDUARDO VALBUENA CALDERON
DIRECTOR TECNICO

Fin Del Reporte.....





Fecha	Resultados Laboratorio No.
2024-11-15	R3964

Formato Informe de Resultado de ensayo AS-TRE-F01 - V 03
Fecha última revisión y aprobación: 2016-01-31

Información del Cliente							
Cliente/Empresa:						NIT/D.I	
Ehren Velez Chávarro						12340189	
Contacto:		Celular		Email			
Ehren Velez Chávarro		3203017546		ehrenvelezch@yahoo.es			
Dirección:				Ciudad/Departamento			
Centro Pitalito				PITALITO, HUILA			
Referencia de la Muestra							
Procedimiento No.	Plan de muestreo	Muestra No.	Tipo de Agua	Tipo de muestreo	Fecha Toma	Fecha Entrada	Hora Muestreo
AS-TMM-003	2753-4	M3964	Residual	COMPUESTO	2024-10-25	2024-10-25	14:50
Muestra tomada por		Lat.	Long.	Alt.	Lugar		
Juan Felipe Ramos		1°32'0"	76°34'7"	1568 m.s.n.m.	Finca El Ablamo, Vereda Monte Bonito		
Punto de muestreo				Fuente			
Salida SMTA-2				Sistema SMTA 400			

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE VERTIMIENTO AJUSTADO A ACTIVIDADES PRODUCTIVAS DE AGROINDUSTRIA Y GANADERÍA							Resolución 0631/2019 - Art. 9	
Fecha de Análisis	Variable	Unidad	Resultado	Límite de Cuantificación	Técnica	Método	Valores Permisibles	Artículo
2024-10-26	Color Real***	m-1	a(436nm)21,5 a(525nm)8,0 a(620nm)4,0	(436nm)0,28 - (525nm) 0,14 - (620nm)0,06	Espectrofotómetro - Longitud de Onda Simple	UNE-EN-ISO 7887, MÉTODO B	Análisis y Reporte	9
2024-10-28	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)***	mg O ₂ /L	20107,5	10	Incubación 5 días y Electrodo de Luminiscencia	SM 5210 B, ASTM D888 Método C	N.R.	9
2024-10-31	Demanda Química de Oxígeno (DQO)***	mg O ₂ /L	24705,0	10	Refujo Cerrado Colorimetría	SM 5220 D	3000 mg/L	9
2024-10-31	Fósforo Total***	mg P/L	56,25	0,5	Espectrofotómetro	SM 4500 P B, D	Análisis y Reporte	9
2024-10-31	Grasas y Aceites***	mg /L	514,8	10	Extracción Soxhlet	SM 5520 D Modificado	30 mg /L	9
2024-10-31	Nitrógeno Total Kjeldahl***	mg N/L	448,25	3	Semi-titrado Kjeldahl	SM 4500-Norg, SM 4500-NH3 B.C	Análisis y Reporte	9
2024-10-31	Sólidos Suspendedos Totales***	mg /L	1720,0	15	Gravimétrico (Secado de 103°C a 1050°C)	SM 2540 D	800 mg /L	9
2024-10-25	pH*	Unidades de pH	3,37 a 25,80°C - 3,42 a 24,50°C	N.A.	Electrométrica	SM 4500-H+ B	5,00 - 9,00 Unidades de pH	9
2024-10-25	Sólidos Sedimentables in situ*	mL/L	1,2	0,1	Volumétrica	SM 2540 F	10,0 mL/L	9

APRECIADO CLIENTE: A partir de la fecha de emisión de los resultados, usted cuenta con treinta (30) días hábiles para hacer alguna observación al respecto, si durante este tiempo no se recibe ninguna información de su parte; **Ambilab S.A.S.** asume la conformidad de los resultados del análisis.

- ANOTACIÓN 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a las muestras analizadas.
- ANOTACIÓN 2: La reproducción parcial de este informe será autorizada por el Laboratorio Ambilab S.A.S.
- ANOTACIÓN 3: Las muestras analizadas en el Laboratorio Ambilab S.A.S, serán desechadas veinte (20) días después de haber sido emitido el informe, a excepción de las variables que tienen menor tiempo de conservación según el Standard Methods.



Fecha	Resultados Laboratorio No.
2024-11-15	R3964

Formato Informe de Resultado de ensayo AS-TRE-F01 - V 03
Fecha última revisión y aprobación: 2019-01-31

* Variable Acreditada por Ambilab SAS
 ** Variable subcontratada no Acreditada
 *** Variable subcontratada Acreditada

N.E: No establecido N.A: No aplica N.P: No Presenta N.R: No Reporta + Toma de muestra simple. El valor aquí reportado, esta relacionado en el Informe de campo anexo.



Carolina Pérez B.

CAROLINA PÉREZ BETANCOURT
DIRECTOR LABORATORIO PQ - 1993

Rdo. :

OSCAR EDUARDO VALBUENA CALDERON
DIRECTOR TECNICO

Fin Del Reporte.....





UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
—SEDE PRINCIPAL BOGOTÁ—



Fecha	Resultados Laboratorio No.
2024-11-21	R3970

Formato Informe de Resultado de ensayo AS-TRE-F01 - V 03
Fecha última revisión y aprobación: 2016-01-31

Información del Cliente							
Cliente/Empresa					NIT/D.I		
Efren Velez Chávarro					12340189		
Contacto		Celular		Email			
Efren Velez Chávarro		3203017546		efrenvelezch@yahoo.es			
Dirección				Ciudad/Departamento			
Centro Pitalito				PITALITO, HUILA			
Referencia de la Muestra							
Procedimiento No.	Plan de muestreo	Muestra No.	Tipo de Agua	Tipo de muestreo	Fecha Toma	Fecha Entrada	Hora Muestreo
AS-TMM-003	2753-3	M3970	Residual	COMPUESTO	2024-10-29	2024-10-29	15:10
Muestra tomada por		Lat.	Long.	Alt.	Lugar		
Aldemar Calvache		1°32'0"	76°34'7"	1568 m.s.n.m.	Vereda Monte Bonito, Finca El Abismo		
Punto de muestreo				Fuente			
Salida SMTA-3				Sistema SMTA 400			

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE VERTIMIENTO AJUSTADO A ACTIVIDADES PRODUCTIVAS DE AGROINDUSTRIA Y GANADERÍA							Resolución 0631/2015 - Art. 9	
Fecha de Análisis	Variable	Unidad	Resultado	Límite de Cuantificación	Técnica	Método	Valores Permisibles	Artículo
2024-11-01	Color Real***	m-1	a(436nm)112,0 a(525nm)59,0 a(620nm)37,0	(436nm)0,28 (525nm)0,14 (620nm)0,06	Espectrofotómetro - Longitud de Onda Simple	UNE-EN-ISO 7887, MÉTODO B	Análisis y Reporte	9
2024-11-01	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)***	mg O2 /L	25090,0	10	Incubación 5 días y Electrodo de Luminiscencia	SM 5210 B, ASTM D888 Método C	N.R.	9
2024-11-09	Demanda Química de Oxígeno (DQO)***	mg O2 /L	29385,0	10	Reflujo Cerrado Colorimétrico	SM 5220 D	3000 mg/L	9
2024-11-09	Fósforo Total***	mg P/L	55,0	0,5	Espectrofotómetro - étrico	SM 4500 P B, D	Análisis y Reporte	9
2024-11-10	Grasas y Aceites***+	mg /L	241,6	10	Extracción Soxhlet	SM 5520 D Modificado	30 mg /L	9
2024-11-09	Nitrógeno Total Kjeldahl***	mg N/L	2315,12	3	Semi-micro-Kjeldahl	SM 4500-Norg, SM 4500-NH3 B C	Análisis y Reporte	9
2024-10-29	pH+	Unidades de pH	3,43 a 22,70°C - 3,53 a 22,50°C	N.A.	Electrométrica	SM 4500-H+ B	5,00 - 9,00 Unidades de pH	9
2024-10-29	Sólidos Sedimentables in situ*	mL/L	1,0	0,1	Volumétrica	SM 2540 F	10,0 mL/L	9
2024-11-09	Sólidos Suspendedos Totales***	mg /L	3800,0	15	Gravimétrico (Secado de 103°C a 105°C)	SM 2540 D	800 mg /L	9

APRECIADO CLIENTE: A partir de la fecha de emisión de los resultados, usted cuenta con treinta (30) días hábiles para hacer alguna observación al respecto, si durante este tiempo no se recibe ninguna información de su parte; **Ambilab S.A.S.** asume la conformidad de los resultados del análisis.

- ANOTACIÓN 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a las muestras analizadas.
- ANOTACIÓN 2: La reproducción parcial de este informe será autorizada por el Laboratorio Ambilab S.A.S.
- ANOTACIÓN 3: Las muestras analizadas en el Laboratorio Ambilab S.A.S, serán desechadas veinte (20) días después de haber sido emitido el informe, a excepción de las variables que tienen menor tiempo de conservación según el Standar Methods.



Fecha	Resultados Laboratorio No.
2024-11-21	R3970

Formato Informe de Resultado de ensayo AS-TRE-F01 - V 03
Fecha última revisión y aprobación: 2016-01-31

* Variable Acreditada por Ambilab SAS
** Variable subcontratada no Acreditada
*** Variable subcontratada Acreditada

N.E: No establecido N.A: No aplica N.P: No Presenta N.R: No Reporta + Toma de muestra simple. El valor aquí reportado, esta relacionado en el Informe de campo anexo.



Carolina Pérez B.

CAROLINA PÉREZ BETANCOURT
DIRECTOR LABORATORIO PQ - 1993

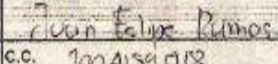
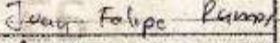
Rdo. :

OSCAR EDUARDO VALBUENA CALDERON
DIRECTOR TECNICO

Fin Del Reporte.....



Anexo E. Formatos de captura de datos de campo y cadena de custodia

Muestreo AS-TMM-F02 Versión: 10		 AMBILAB LABORATORIO AMBIENTAL BOGOTÁ - COLOMBIA		Fecha Última Revisión y Aprobación: 2024-07-25 Página 1 de 1	
CADENA DE CUSTODIA AGUAS					
IDENTIFICACIÓN DEL SITIO DE MUESTREO					
PROCEDIMIENTO No:	AS-TMM-003	PLAN DE MUESTREO:	2753-871	TIPO DE MUESTREO:	Compuesto
DEPARTAMENTO:	Boyacá	MUNICIPIO:	Pácora	DESTINO O USO:	Caracterización de Vertimientos
FUENTE:	Entrada al sistema	DIRECCIÓN:	Vda Monte Pácora	TIPO DE AGUA:	Residual
LUGAR DE MUESTREO:	Fuente el Abismo	FECHA DE TOMA:	2024/10/23	CONTROL DE TEMPERATURA (°C):	41-662-1-31-26
HORA DE TOMA:	14:15	COORDENADAS (N):	1°54'08" (W): 76°5'10" ALTURA (m.s.n.m.):	1529	
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA					
PUNTO DE MUESTREO:	OBSERVACIONES			CÓDIGO DE MUESTRA	
Entrada 277A	ADICIÓN			CANCELACIÓN	
Rdo. 	OBSERVACIONES DE MUESTREO:				
RESPONSABLE DE TOMA DE MUESTRA			CLIENTE O ENCARGADO		
NOMBRE:	FIRMA:	NOMBRE:	FIRMA:		
Juan Felipe Ramos		erren vele2			
CARGO	C.C.	TEL:	C.C.		
Técnico de Campo	1004134018	3203017546	12440189 pto		
RESPONSABLES TRANSPORTE Y RECEPCIÓN					
	NOMBRE Y APELLIDO	FECHA	HORA	FIRMA	
ENTREGA	Juan Felipe Ramos	2024/10/23	18:00		
RECIBE	Carolina Pérez B.	2024/10/23	18:00		
PRESERVACIÓN	OBSERVACIONES DE RECEPCIÓN:				
SI	La muestra cumple con la preservación indicada en la orden de campo.				
NO					
☒					
Elaboró: Técnico de Campo		Revisó: Directora de Calidad		Aprobó: Director Técnico	



Muestreo
AS-TMM-F05
Versión: 02



Fecha Última Revisión y Aprobación: 2024-07-25
Página 1 de 2

# MUESTRAS	HORA	TIEMPO (s)	VOLUMEN (mL)	CONDICIONES AMBIENTALES		CAUDAL (Volumen (mL) / Tiempo (s))	ALICUOTA Volumen Total (mL) / 20	OBSERVACIONES
				% HUMEDAD	TEMPERATURA (°C)			
1	14:15	122,91	1540	78	23,5	8,912	582	
2	14:30	139,00	1500	80	23,2	11,194	730	
3	14:45	32,13	1300	76	22,8	24,631	1607	
4	15:00	170,84	1290	83	22,2	7,551	493	
5	15:15	144,31	1300	70	21,1	9,003	583	
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								

Corrección Termómetro: Tabla: Corrección a la indicación del certificado (Certificado Temperatura 15°C: 0,53 - Certificado Temperatura 24°C: 0,27 - Certificado Temperatura 30°C: 0,41)

Corrección Termohigrómetro: Corrección a la indicación del certificado (Certificado HR 60: 1,9 - Certificado HR 60: 0,5 - Certificado HR 60: 1,3)

Caudal Promedio - Qp (L/s):	0,012	Constante:	66,258	Jornada:	14:15 - 15:15	No de Orden:	2753 - 1
Sumatoria de Caudal m/Ls:	61,295	Volumen Total (mL):	4000	Fecha:	2024/10/23	TEMPLADO:	✓
Sólidos Sedimentables Hora:	15:40	Compuesto m/L:	20	Simples m/L:	—	SOLEADO:	
Duplicado SSSED Hora:	15:41	Compuesto m/L:	20	Simples m/L:	—	PRECIPITACIÓN:	
Cliente:	Efren Velez Chavarro	Técnico de campo:	Juan Felipe Ramos	Hora Muestras Puntuales:	14:15	Rtd:	CP
Elaboró:	Técnico de Campo	Revisó:	Directora de Calidad	Aprobó:	Director Técnico		



Muestreo AS-TMM-F05 Versión: 09				Fecha Última Revisión y Aprobación: 2024-07-25 Página 1 de 2											
EVENTO	CÓDIGO EQUIPO	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN/INCERTIDUMBRE DEL EQUIPO										OBSERVACIONES			
		VERIFICACIÓN DE pH		CUMPLE	VERIFICACIÓN DE CONDUCTIVIDAD		CUMPLE	CALIBRACIÓN DE OXÍGENO		CUMPLE					
		PATRÓN 4.01 - 7.01	TEMPERATURA (°C)		SI	NO		PATRÓN	TEMPERATURA (°C)		SI		NO	% DE CALIBRACIÓN	TEMPERATURA (°C)
ANTES DE SALIR	E-92	3.99-7.01	22.3	✓											
PREVIO AL INICIO	E-92	3.99-7.01	23.0	✓											
MITAD DE JORNADA															

Calibrado: Conducto pH a la indicación del certificado (Calibrado pH 4.02: 0.01 - Calibrado pH 7.00: 0.01 - Calibrado pH 10.00: 0.01)

Calibrado: Conducto Conductividad a la indicación del certificado (Certificado Conductividad 100: 0.8 Calibrado 1413: 1.0)

LECTURAS VARIABLES in situ												
N. MUESTRA	HORA	pH (Grados)	TEMPERATURA (°C)	CONDUCTIVIDAD (µmhos)	OXÍGENO (mg/L)	NÚMERO	HORA	pH (Grados)	TEMPERATURA (°C)	CONDUCTIVIDAD (µmhos)	OXÍGENO (mg/L)	OBSERVACIONES
1	10:15	4.28	23.5			16						
2	10:30	4.19	23.4			17						
3	10:45	4.24	23.2			18						
4	15:00	4.23	22.7			19						
5	15:15	4.18	22.3			20						
6	15:30	4.21	22.3			21						
7						22						
8						23						
9						24						
10						25						
11						26						
12						27						
13						28						
14						29						
15						30						

Elaboró: Técnico de Campo

Revisó: Directora de Calidad

Aprobó: Director Técnico



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
—SEDE PRINCIPAL BOGOTÁ—

Muestreo
A.S. TMM-F02
Version: 10



Fecha Última Revisión y Aprobación: 2024-07-25
Página 1 de 1

CADENA DE CUSTODIA AGUAS

IDENTIFICACIÓN DEL SITIO DE MUESTREO

PROCEDIMIENTO No:	AS-TMM-003	PLAN DE MUESTREO:	2353-2	TIPO DE MUESTREO:	Compuesto
DEPARTAMENTO:	Huila	MUNICIPIO:	Pitalito	DESTINO O USO:	Caracterización de Vertimientos
FUENTE:	Sistema SMTD 400	DIRECCIÓN:	Vda. María Rentería	TIPO DE AGUA:	Residual
LUGAR DE MUESTREO:	Fuente el Alamo	FECHA DE TOMA:	2024/10/23	CONTROL DE TEMPERATURA (°C):	1) 26 2) 26 3) 26
HORA DE TOMA:	15:20	ALTURA(m.s.n.m.):	1568		
COORDENADAS (N):	1° 54' 0.20" (W): 76° 5' 17.05"				

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

PUNTO DE MUESTREO	OBSERVACIONES	CANCELACIÓN	CÓDIGO DE MUESTRA
Salida SMTD	ADICIÓN		M3962

OBSERVACIONES DE MUESTREO:

Rdo CP

RESPONSABLE DE TOMA DE MUESTRA

NOMBRE:	FIRMA:
Juan Felipe Rentería	Juan Felipe Rentería
CARGO: Técnico de campo	C.C. 1000154018

CLIENTE O ENCARGADO

NOMBRE:	FIRMA:
Gerente Velez CH	Gerente Velez CH
TEL: 3203017546	ce. 12/240189 pto.

RESPONSABLES TRANSPORTE Y RECEPCIÓN

	NOMBRE Y APELLIDO	FECHA	HORA	FIRMA
ENTREGA	Juan Felipe Rentería	2024/10/23	18:03	Juan Felipe Rentería
RECIBE	Carolina Pérez B	2024/10/23	18:03	Carolina Pérez B
PRESERVACIÓN	OBSERVACIONES DE RECEPCIÓN:			
SI	La muestra cumple con la preservación indicada en la orden de campo.			
NO				

Elaboró: Técnico de Campo

Revisó: Directora de Calidad

Aprobó: Director Técnico



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
—SEDE PRINCIPAL BOGOTÁ—

Muestreo AS-TMM-F05 Versión: 09		Fecha Última Revisión y Aprobación: 2024-07-25 Página 1 de 2						
# MUESTRAS	HORA	TIEMPO (s)	VOLUMEN (mL)	CONDICIONES AMBIENTALES		CAUDAL Volumen (mL) Tiempo (s)	ALICUOTA Volumen Total (mL) 10	OBSERVACIONES
				% HUMEDAD	TEMPERATURA (°C)			
1	15:20	141,16	1290	81	22,1	9,139	743	
2	15:35	163,23	1300	80	22,1	8,263	672	
3	15:50	68,28	1370	80	22,3	20,357	1655	• 15:30 ^{ms}
4	16:05	242,15	1210	79	22,1	4,896	391	
5	16:20	145,28	1280	79	22,1	6,555	533	
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								

Calibrado Termómetro Truista: Concesión a la indicación del certificado (Certificado Temperatura 18°C: 0,13 - Certificado Temperatura 24°C: 0,27 - Certificado Temperatura 30°C: 0,41)
Calibrado Termohigrómetro: Concesión a la indicación del certificado (Certificado HR 60: 1,8 - Certificado HR 60: 3,6 - Certificado HR 60: 1,8)

Caudal Promedio - Qp (L/s): 0,010	Constante: 81,277	Jornada: 15:20 - 16:20	No de Orden: 2753-2
Sumatoria de Caudal mL/s: 49,214	Volumen Total (mL): 4000	Fecha: 2024/10/23	EMPLADO: ✓
Sólidos Sedimentables Hora: 16:50	Compuesto mL/L: 1	Simple mL/L:	SOLEADO:
Duplicado SSBD Hora: 16:50	Compuesto mL/L: 1	Simple mL/L:	PRECIPITACIÓN:
Cliente: Efran Velez Chavarro	Técnico de campo: Jean Felipe Rames	Hora Muestras Parciales: 15:20	Rda: OP
Elaboró: Técnica de Campo	Revisó: Directora de Calidad	Aprobó: Director Técnico	



Muestreo
AS-TMM-F05
Versión: 09



Fecha Última Revisión y Aprobación: 2024-07-25
Página 1 de 2

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN/INCERTIDUMBRE DEL EQUIPO												
EVENTO	CÓDIGO EQUIPO	VERIFICACIÓN DE pH		CUMPLE		VERIFICACIÓN DE CONDUCTIVIDAD		CUMPLE		CALIBRACIÓN DE OXÍGENO		OBSERVACIONES
		PATRÓN 4,01 ± 0,01	TEMPERATURA (°C)	SI	NO	PATRÓN	TEMPERATURA (°C)	SI	NO	% DE CALIBRACIÓN	TEMPERATURA (°C)	
ANTES DE SALIR	E-42	5,94-7,01	22,8	✓								
PREVIO AL INICIO	E-42	5,99-7,01	23,0	✓								
MITAD DE JORNADA												

Conflicto: Calibración pH a la indicación del certificado (Certificado pH 4,00 ± 0,01 - Certificado pH 7,00 ± 0,01 - Certificado pH 10,00 ± 0,01)

Conflicto: Calibración Conductividad a la indicación del certificado (Certificado Conductividad 100 ± 0,6 Certificado 1113 ± 1,6)

LECTURAS VARIABLES in situ												
# MUESTRA	HORA	pH (0-14)	TEMPERATURA (°C)	CONDUCTIVIDAD (µmhos)	OXÍGENO (mg/L)	# MUESTRA	HORA	pH (0-14)	TEMPERATURA (°C)	CONDUCTIVIDAD (µmhos)	OXÍGENO (mg/L)	OBSERVACIONES
1	15:10	3,56	22,6			16						
2	15:25	3,56	22,9			17						
3	15:30	3,54	22,9			18						
4	16:05	3,63	22,8			19						
5	16:30	3,53	23,4			20						
6	16:30	3,56	23,1			21						
7						22						
8						23						
9						24						
10						25						
11						26						
12						27						
13						28						
14						29						
15						30						

Elaboró: Técnico de Campo

Revisó: Directora de Calidad

Aprobó: Director Técnico



Muestreo
AS-TMM-F02
Versión: 10



Fecha Última Revisión y Aprobación: 2024-07-25
Página 1 de 1

CADENA DE CUSTODIA AGUAS

IDENTIFICACIÓN DEL SITIO DE MUESTREO

PROCEDIMIENTO No:	AS-TMM-003	PLAN DE MUESTREO:	2-53-3	TIPO DE MUESTREO:	Composto
DEPARTAMENTO:	Huila	MUNICIPIO:	Patate		
FUENTE:	Sistema SMTA 400	DESTINO O USO:	Reservación de Vestimiento		
LUGAR DE MUESTREO:	Fuente El Alamo	DIRECCION:	Via Honda Buitrago		
HORA DE TOMA:	15:10	FECHA DE TOMA:	2024/10/29	TIPO DE AGUA:	Residual
COORDENADAS (N):	1°52'0"	(W):	76°3'47"	ALTURA (m.s.n.m):	1563
				CONTROL DE TEMPERATURA (°C):	1) 26 2) 26 3) 26

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

PUNTO DE MUESTREO	OBSERVACIONES		CÓDIGO DE MUESTRA
	ADICIÓN	CANCELACIÓN	
Sol de SMTA 3			M3970

OBSERVACIONES DE MUESTREO:

Rdo CP

RESPONSABLE DE TOMA DE MUESTRA

NOMBRE:	FIRMA:
Alfonso Ceballos S	Alfonso Ceballos S
CARGO: Director Campo	C.C. 1013911601

CLIENTE O ENCARGADO

NOMBRE: Samirith Ortega S	FIRMA: [Firma]
TEL: 3105720158	C.C. 36.294.930

RESPONSABLES TRANSPORTE Y RECEPCIÓN

	NOMBRE Y APELLIDO	FECHA	HORA	FIRMA
ENTREGA	Alfonso Ceballos S	2024/10/29	15:08	[Firma]
RECIBE	Carolina Pavez B	2024/10/29	19:08	Carolina Pavez B

PRESERVACIÓN		OBSERVACIONES DE RECEPCIÓN:
SI	NO	La muestra cumple con la preservación indicada en la orden de campo.
☒	☐	

Elaboró: Técnico de Campo

Revisó: Directora de Calidad

Aprobó: Director Técnico



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
—SEDE PRINCIPAL BOGOTÁ—

Muestreo AS-TMM-F05 Versión: 09		Fecha Última Revisión y Aprobación: 2024-07-25 Página 1 de 2						
# MUESTRAS	HORA	TIEMPO (s)	VOLUMEN (mL)	CONDICIONES AMBIENTALES		CAUDAL Volumen (mL) Tiempo (s)	ALICUOTA Volumen Total (mL) Q _T	OBSERVACIONES
				% HUMEDAD	TEMPERATURA (°C)			
1	15:10	118,69	1640	57	24,6	13,818	1058	
2	15:25	215,72	980	57	24,5	4,342	333	
3	15:40	110,62	1100	59	23,9	9,944	762	
4	15:55	113,10	1310	58	23,8	11,583	887	
5	16:10	115,69	1450	59	23,7	12,533	960	
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								

Compensación Termómetro: Corregido a la indicación del certificado (Certificado Temperatura 15°C: 0,13 - Certificado Temperatura 24°C: 0,27 - Certificado Temperatura 30°C: 0,41)
Certificado Termómetro: Corregido a la indicación del certificado (Certificado HR 60: 1,3 - Certificado HR 62: 0,8 - Certificado HR 80: 1,3)

Caudal Promedio - Q _p (L/s): 9,010	Constante: 70600	Jornada: 15:10 - 16:10	Nº de Orden: 2153-B
Sumatoria de Caudal mL/s: 52,219	Volumen Total (mL): 4000	Fecha: 2024/10/29	TEMPLADO: ✓
Sólidos Sedimentables Hora: 16:30	Compuesto mL/L: 1,0	Simple mL/L: —	PRECIPITACIÓN:
Duplicado SSED Hora: 16:30	Compuesto mL/L: 1,0	Simple mL/L: —	Hora Muestras Puntuales: 15:55
Cliente: Egen Velez Chaviano	Técnico de campo: Aldemar Caliche	Rdo: OP	
Elaboró: Técnico de Campo	Revisó: Director de Calidad	Aprobó: Director Técnico	



Muestreo
AS-TNM-F05
Versión: 03



Fecha Última Revisión y Aprobación: 2024-07-25
Página 1 de 2

EVENTO	CÓDIGO EQUIPO	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN/INCERTIDUMBRE DEL EQUIPO								OBSERVACIONES				
		VERIFICACIÓN DE pH		CUMPLE		VERIFICACIÓN DE CONDUCTIVIDAD		CUMPLE			CALIBRACIÓN DE OXÍGENO		CUMPLE	
		PATRÓN	TEMPERATURA (°C)	SI	NO	PATRÓN	TEMPERATURA (°C)	SI	NO		% DE CALIBRACIÓN	TEMPERATURA (°C)	SI	NO
ANTES DE SALIR	E-47	4.01-7.01	24.3	✓										
PREVIO AL INICIO	E-47	4.01-7.01	25.2	✓										
MITAD DE JORNADA														

Certificado: Corrección pH a la indicación del certificado (Certificado pH 4.00: 0.01 - Certificado pH 7.00: 0.01 - Certificado pH 10.00: 0.01).
Certificado: Corrección Conductividad a la indicación del certificado (Certificado Conductividad 100.00: 0.01 Certificado 1011.10).

LECTURAS VARIABLES in situ												
N.º MUESTRA	HORA	pH (muestra)	TEMPERATURA (°C)	CONDUCTIVIDAD (µS/cm)	OXÍGENO (mg/L)	N.º MUESTRA	HORA	pH (muestra)	TEMPERATURA (°C)	CONDUCTIVIDAD (µS/cm)	OXÍGENO (mg/L)	OBSERVACIONES
1	15:10	3.43	22.7			16						
2	15:25	3.48	22.7			17						
3	15:40	3.53	22.6			18						
4	15:55	3.51	22.6			19						
5	16:10	3.52	22.5			20						
6	16:10	3.52	22.6			21						
7						22						
8						23						
9						24						
10						25						
11						26						
12						27						
13						28						
14						29						
15						30						

Elaboró: Técnico de Campo
Revisó: Directora de Calidad
Aprobó: Director Técnico



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
—SEDE PRINCIPAL BOGOTÁ—

Muestreo
AS-TMM-F02
Versión: 10

Fecha Última Revisión y Aprobación: 2024-07-25
Página 1 de 1

AM-LAB
ANÁLISIS DE AGUAS
NORMA 001

CADENA DE CUSTODIA AGUAS

IDENTIFICACIÓN DEL SITIO DE MUESTREO			
PROCEDIMIENTO No:	AS-TMM-003	PLAN DE MUESTREO:	2953-4
DEPARTAMENTO:	HUILA	MUNICIPIO:	Pitalito
FUENTE:	Sistema SIMTA 400	DESTINO O USO:	Caracterización de punto de muestreo
LUGAR DE MUESTREO:	Fuente de Abastecimiento	DIRECCIÓN:	W. Fuente Pitalito
HORA DE TOMA:	14:50	FECHA DE TOMA:	2024/10/25
COORDENADAS (N):	8°52'01"	(W):	76°33'21"
ALTURA(m.s.n.m):	1362	CONTROL DE TEMPERATURA (°C)	1) 26 2) — 3) 26

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA		
PUNTO DE MUESTREO	OBSERVACIONES	CÓDIGO DE MUESTRA
Sistema SIMTA-2		M3964

OBSERVACIONES DE MUESTREO:	
Rdo. CP	

RESPONSABLE DE TOMA DE MUESTRA		CLIENTE O ENCARGADO	
NOMBRE:	FIRMA:	NOMBRE:	FIRMA:
Juan Felipe Ramos	Juan Felipe Ramos	Chien Velez	
CARGO:	C.C.	TEL:	C.C.
Técnico de Campo	1004139018	3203017546	1004139018

RESPONSABLES TRANSPORTE Y RECEPCIÓN				
	NOMBRE Y APELLIDO	FECHA	HORA	FIRMA
ENTREGA	Juan Felipe Ramos	2024/10/25	12:08	Juan Felipe Ramos
RECIBE	Carolina Perez B	2024/10/25	12:08	Carolina Perez B
PRESERVACIÓN	OBSERVACIONES DE RECEPCIÓN:			
SI	la muestra cumple con la preservación indicada en la orden de campo			
NO				

Elaboró: Técnico de Campo

Revisó: Director de Calidad

Aprobó: Director Técnico



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
—SEDE PRINCIPAL BOGOTÁ—

Muestreo AS-TMM-F05 Versión: 09		Fecha Última Revisión y Aprobación: 2024-07-25 Página 1 de 2						
# MUESTRAS	HORA	TIEMPO (s)	VOLUMEN (mL)	CONDICIONES AMBIENTALES		CAUDAL Temperatura (mL/s) Temperatura (°C)	ALICUOTA Volumen Total (mL) 50	OBSERVACIONES
				% HUMEDAD	TEMPERATURA (°C)			
1	14:50	152,88	1850	49	23,1	12,101	702	
2	15:05	130,03	1960	49	26,4	41,993	616	
3	15:20	101,94	1440	51	25,8	14,126	819	
4	15:35	110,96	1610	51	25,8	14,510	892	
5	15:50	109,22	1780	51	25,6	16,223	901	
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								

Controlado Termómetro Traslado: Corrección a la indicación del certificado (Certificado Temperatura 10°C: 0,13 - Certificado Temperatura 20°C: 0,27 - Certificado Temperatura 30°C: 0,41)
Controlado Termómetro: Corrección a la indicación del certificado (Certificado HR 60-1-9 - Certificado HR 60-0-E - Certificado HR 60-1-3)

Caudal Promedio - Qp (L/s): 0014	Constante: 58,007	Jornada: 14:50 - 15:50	No de Orden: 2753-4
Sumatoria de Caudal mL/s: 68,937	Volumen Total (mL): 4000	Fecha: 2024/10/25	TEMPLADO: ☒
Sólidos Sedimentables Hora: 16:20	Compuesto mL/L: 1,2	Simple mL/L: -	SOLEADO: ☒
Duplicado SSED Hora: 16:20	Compuesto mL/L: 1,2	Simple mL/L: -	PRECIPITACIÓN: ☐
Cliente: Juan F. Espin Velaz Chaves	Técnico de campo: Juan Felipe Ramos	Hora Muestras Puntuales: Rdo: CP	
Elaboró: Técnico de Campo	Revisó: Directora de Calidad	Aprobó: Director Técnico	



Muestreo
AS-TMM-F05
Versión: 09



Fecha Última Revisión y Aprobación: 2024-07-30
Página 1 de 2

EVENTO	CÓDIGO EQUIPO	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN/INCERTIDUMBRE DEL EQUIPO								OBSERVACIONES				
		VERIFICACIÓN DE pH		CUMPLE		VERIFICACIÓN DE CONDUCTIVIDAD		CUMPLE			CALIBRACIÓN DE OXÍGENO		CUMPLE	
		PATRÓN	TEMPERATURA (°C)	SI	NO	PATRÓN	TEMPERATURA (°C)	SI	NO		FECHA CALIBRACIÓN	TEMPERATURA (°C)	SI	NO
ANTES DE SALIR	6-47	3,01 - 7,01	25,5	✓										5,98 - 7,02 ^{ff}
PREVIO AL INICIO	6-47	4,01 - 7,01	26,3	✓										3,48 - 7,02 ^{ff}
MITAD DE JORNADA														

Certificado: Corriente pH a la indicación del certificado (Certificado pH 4.00 - 0.01 - Certificado pH 7.00 0.01 - Certificado pH 10.00 0.01)
Certificado: Corriente conductividad a la indicación del certificado (Certificado Conductividad 100 - 0.5 Certificado 1412 - 1.2)

LECTURAS VARIABLES in situ												
N.º MUESTRA	HORA	pH (Celdas)	TEMPERATURA (°C)	CONDUCTIVIDAD (µm/cm)	OXÍGENO (mg/L)	N.º MUESTRA	HORA	pH (Unidades)	TEMPERATURA (°C)	CONDUCTIVIDAD (µm/cm)	OXÍGENO (mg/L)	OBSERVACIONES
1	08:00	3,38	25,6			16						
2	13:05	3,39	25,7			17						
3	15:20	3,34	25,8			18						
4	16:35	3,38	25,2			19						
5	18:50	3,42	24,5			20						
6	19:00	3,42	24,5			21						
7						22						
8						23						
9						24						
10						25						
11						26						
12						27						
13						28						
14						29						
15						30						

Elaboró: Técnico de Campo
Revisó: Director de Calidad
Aprobó: Director Técnico

Anexo F. Oficio laboratorio AMBILAB SAS



Pitalito, 28 de abril de 2026

Doctor
EFREN VELEZ
Cliente
La Ciudad

Asunto: Respuesta a solicitud de procedimientos de laboratorio

Cordial saludo.

En atención a su comunicación mediante la cual solicita compartir los procedimientos de laboratorio aplicados a las muestras entregadas por usted para análisis en nuestras instalaciones, nos permitimos manifestar de manera respetuosa lo siguiente:

Los métodos utilizados para cada uno de los ensayos ejecutados se encuentran debidamente relacionados e identificados en los respectivos reportes de resultados entregados, en concordancia con los requisitos de trazabilidad técnica, transparencia documental y control de la información aplicables al laboratorio.

AMBILAB S.A.S. opera bajo lineamientos de competencia técnica y aseguramiento de la calidad acordes con la NTC ISO/IEC 17025, norma internacional aplicable a laboratorios de ensayo y calibración, la cual establece criterios para la gestión documental, validación metodológica, competencia del personal, control de registros, imparcialidad y confidencialidad de la información.

En ese sentido, los procedimientos internos normalizados de operación, instructivos técnicos, formatos, secuencias analíticas, controles internos y demás documentación asociada al sistema de gestión del laboratorio constituyen información propia de la organización, controlada dentro del marco documental del sistema de calidad, por lo cual no es procedente su divulgación a terceros, en cumplimiento de los principios de reserva, integridad documental y protección de información interna.

Se precisa igualmente que las metodologías reportadas corresponden a métodos estandarizados y reconocidos oficialmente, emitidos por organismos nacionales e internacionales competentes. Dichas metodologías pueden ser consultadas directamente en sus fuentes oficiales y, cuando aplique, adquiridas a través de los mecanismos autorizados por las entidades propietarias de los estándares técnicos.

Reiteramos que nuestra empresa mantiene el compromiso permanente con la calidad analítica, la confiabilidad de los resultados emitidos y el cumplimiento de los requisitos normativos aplicables.

Agradecemos su atención y quedamos atentos a cualquier requerimiento adicional relacionado con el alcance técnico de los resultados entregados.

Cordialmente,



OSCAR EDUARDO VALBUENA CALDERÓN
Representante Legal
CC. No. 83.043.147 de Pitalito-Huila

Calle 1ª No. 4 - 50
Cel: (57) + 320 488 7263
Pitalito, Huila, Colombia
www.ambilab.co