



Evaluación ambiental de borras de hidrocarburos del Lote 95, Amazonía Peruana

Environmental assessment of hydrocarbon sludge from Block 95, Peruvian Amazon

Avaliação ambiental de lodo de hidrocarbonetos do Lote 95, Amazônia peruana

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i28.423>

Zila Zelenita Ruíz Laulate zelenitarl@gmail.com

Oty Zelenita Ruíz Laulate ruizoty@gmail.com

Marlisa Katuska Rojas Padilla marsig2173476@gmail.com

Kosseth Marianella Bardales Grández kosseth.bardales@unapiquitos.edu.pe

Luis Antonio Flores Flores luis.flores@unapiquitos.edu.pe

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. Iquitos, Perú

Artículo recibido: 2 de octubre 2025 / **Arbitrado:** 13 de noviembre 2025 / **Publicado:** 7 de enero 2026

RESUMEN

Las borras de hidrocarburos constituyen residuos peligrosos que, de ser mal manejados, amenazan la sostenibilidad ambiental en zonas petroleras, especialmente en ecosistemas frágiles como la Amazonía peruana. El objetivo fue evaluar la composición fisicoquímica, el riesgo ambiental y el potencial de valorización de las borras de hidrocarburos generadas en la Locación 2A del Lote 95 (Amazonía Peruana), operado por PETROTAL PERÚ S.R.L., en la región Loreto. La metodología adoptó un enfoque cuantitativo, descriptivo y de diseño no experimental, con población conformada por borras de hidrocarburos generadas durante el proceso de extracción y tratamiento del petróleo, y muestra de nueve puntos de muestreo seleccionados mediante muestreo no probabilístico intencional, basados en criterios técnicos y de representatividad del proceso. Los instrumentos incluyeron métodos analíticos acreditados bajo norma ISO/IEC 17025, determinando materia orgánica total, metales totales, hidrocarburos totales de petróleo (TPH), compuestos BTEX, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y azufre total. El procesamiento de datos se realizó mediante estadística descriptiva en Microsoft Excel 2019 y SPSS v26. Los resultados evidenciaron un contenido de materia orgánica total de $58.94 \pm 7.24\%$, concentraciones de TPH superiores a 300,000 mg/kg, niveles críticos de BTEX y PAHs indicando alta toxicidad, y metales pesados dentro de límites normativos. Las conclusiones confirman que las borras del Lote 95 son residuos peligrosos de alto impacto ambiental que requieren tratamientos fisicoquímicos o térmicos antes de su disposición final, aportando una línea base científica para la gestión sostenible de residuos petroleros en la Amazonía peruana.

Palabras clave: Amazonía peruana; BTEX; Borras petroleras; Caracterización fisicoquímica, TPH

ABSTRACT

Hydrocarbon sludge constitutes hazardous waste that threatens environmental sustainability in oil-producing areas, especially in fragile ecosystems such as the Peruvian Amazon. The objective was to evaluate the physicochemical composition, environmental risk, and valorization potential of hydrocarbon sludge generated at Location 2A of Block 95 (Peruvian Amazon), operated by PETROTAL PERÚ S.R.L., in the Loreto region. The methodology adopted a quantitative, descriptive, and non-experimental design, with a population consisting of oil sludge generated during the oil extraction and treatment process, and a sample of nine sampling points selected using purposive non-probability sampling, based on technical criteria and process representativeness. The instruments included analytical methods accredited under ISO/IEC 17025, determining total organic matter, total metals, total petroleum hydrocarbons (TPH), BTEX compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), and total sulfur. Data processing was performed using descriptive statistics in Microsoft Excel 2019 and SPSS v26. The results showed a total organic matter content of $58.94 \pm 7.24\%$, TPH concentrations exceeding 300,000 mg/kg, critical levels of BTEX and PAHs indicating high toxicity, and heavy metals within regulatory limits. The findings confirm that the sludge from Lot 95 is a hazardous waste with a high environmental impact that requires physicochemical or thermal treatment before final disposal, providing a scientific baseline for the sustainable management of petroleum waste in the Peruvian Amazon.

Key words: Peruvian Amazon; BTEX; Petroleum sludge; Physicochemical characterization; TPH

RESUMO

A lama de hidrocarbonetos constitui um resíduo perigoso que ameaça a sustentabilidade ambiental em áreas produtoras de petróleo, especialmente em ecossistemas frágeis como a Amazônia peruana. O objetivo deste estudo foi avaliar a composição fisicoquímica, o risco ambiental e o potencial de valorização da lama de hidrocarbonetos gerada na Área 2A do Bloco 95 (Amazônia peruana), operada pela PETROTAL PERÚ S.R.L., na região de Loreto. A metodologia adotou um delineamento quantitativo, descritivo e não experimental, com uma população constituída pela lama oleosa gerada durante o processo de extração e tratamento de petróleo, e uma amostra de nove pontos de amostragem selecionados por amostragem não probabilística intencional, com base em critérios técnicos e representatividade do processo. Os instrumentos utilizados incluíram métodos analíticos acreditados pela ISO/IEC 17025, para a determinação de matéria orgânica total, metais totais, hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH), compostos BTEX, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) e enxofre total. O processamento dos dados foi realizado utilizando estatística descritiva no Microsoft Excel 2019 e SPSS v26. Os resultados mostraram um teor de matéria orgânica total de $58,94 \pm 7,24\%$, concentrações de TPH superiores a 300.000 mg/kg, níveis críticos de BTEX e HAPs indicando alta toxicidade e metais pesados dentro dos limites regulamentares. Os achados confirmam que o lodo do Lote 95 é um resíduo perigoso com alto impacto ambiental que requer tratamento fisico-químico ou térmico antes da disposição final, fornecendo uma base científica para a gestão sustentável de resíduos de petróleo na Amazônia peruana.

Palavras-chave: Amazônia peruana; BTEX; Lodo de petróleo; Caracterização fisico-química; TPH

INTRODUCCIÓN

Las operaciones petroleras generan diversos residuos peligrosos que, de ser mal manejados amenazan la sostenibilidad ambiental. Entre estos desechos los de mayor preocupación son las borras de hidrocarburos o borras de petróleo, materiales semisólidos o pastosos que se acumulan principalmente en los fondos de tanques y equipos durante las etapas de extracción, transporte, almacenamiento y refinación del crudo. Debido a su origen, estos residuos presentan una composición altamente heterogénea y tóxica, con presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), metales pesados, azufre, compuestos volátiles (BTEX) y materia orgánica recalcitrante, lo que los convierte en uno de los principales desafíos para la gestión ambiental de la industria energética (1,2).

A nivel mundial, la generación de borras de petróleo ha crecido equitativamente al aumento de la producción de hidrocarburos, alcanzando volúmenes estimados entre 0.5 y 2% del crudo procesado (3). Sin embargo, su acumulación sin tratamiento adecuado y mal manejados genera impactos significativos como la contaminación de suelos, infiltración hacia cuerpos de agua subterráneos y liberación de gases tóxicos al ambiente. En este sentido, Dornelas et al. (4), la complejidad de estos residuos exige estrategias integrales de caracterización fisicoquímica como primer paso para definir opciones de tratamiento,

recuperación o disposición final ambientalmente seguras (4).

En el contexto peruano, la problemática adquiere especial relevancia puesto que las operaciones petroleras se localizan en ecosistemas altamente sensibles, como la Amazonía. Específicamente, en la región Loreto, las actividades del Lote 95, operado por PETROTAL PERÚ S.R.L., se desarrollan en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional Pacaya Samiria, uno de los espacios naturales más biodiversos del planeta. En este lote se procesan actualmente hasta 20,000 barriles diarios, generando grandes volúmenes de residuos oleosos. A pesar de la magnitud de la producción, su composición específica aún no ha sido documentada en profundidad. Consecuentemente, este vacío de información limita la capacidad de implementar tecnologías de remediación efectivas y adaptadas al contexto amazónico (5).

Las borras de petróleo constituyen una mezcla compleja de agua, hidrocarburos de diverso peso molecular y sólidos inorgánicos, presentando características de inflamabilidad, corrosividad y toxicidad (1). Además, su heterogeneidad depende del tipo de crudo, de los químicos de proceso -como demulsificantes, anticorrosivos o biocidas- y del tiempo de almacenamiento. Estudios recientes destacan que la exposición prolongada a estos residuos puede causar daños en los sistemas respiratorio, nervioso y cardiovascular

en poblaciones cercanas a zonas petroleras (6,7). De particular interés, son los compuestos BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) y los PAH ya que poseen reconocida carcinogenicidad y mutagenicidad, siendo priorizados por organismos internacionales como la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (8).

En el caso peruano, la normativa ambiental si bien establece el Decreto Supremo N.º 011-2017-MINAM con estándares de calidad para suelos y el Decreto Supremo N.º 014-2017-MINAM establece el reglamento de la Ley de Gestión Integral de los Residuos Sólidos, la caracterización de borras de hidrocarburos sigue siendo limitada a nivel nacional. La falta de datos científicos nacionales impide estimar con precisión los riesgos ambientales y de salud pública derivados de su manejo inadecuado (9). Por lo tanto, resulta esencial generar información empírica que permita conocer la composición química y los niveles de peligrosidad de estos residuos.

La caracterización fisicoquímica se establece como el punto de partida para definir estrategias de manejo sostenible. Esto se debe a que permite determinar la presencia de metales pesados como arsénico, níquel, cromo o plomo, y de hidrocarburos totales de petróleo (TPH), que reflejan el contenido energético y la potencial valorización del residuo (10). Diversas investigaciones han demostrado que, una vez caracterizadas, las borras pueden

aprovecharse en procesos de valorización industrial, tales como la producción de asfaltos, la generación de combustibles alternativos mediante pirólisis o su uso en coprocesamiento en hornos cementeros (1,4). Estas opciones no solo reducen el impacto ambiental, sino que también contribuyen al enfoque de economía circular, promoviendo el aprovechamiento de residuos peligrosos como materias primas secundarias.

No obstante, la viabilidad de estas alternativas depende de la composición específica del residuo. Por ejemplo, altos contenidos de azufre o metales pesados pueden limitar su aplicación como combustible alternativo o material de construcción, debido a las emisiones de gases ácidos o la formación de cenizas tóxicas (11). Por otro lado, la presencia de hidrocarburos ligeros (C5–C10) y compuestos volátiles implica riesgos de emisión de vapores explosivos y exposición ocupacional, lo que exige estrictos protocolos de seguridad y control durante la manipulación (12).

Desde el punto de vista ambiental, la Amazonía peruana representa un escenario especialmente frágil para este tipo de residuos. Los suelos de la región, caracterizados por su alta porosidad y drenaje, facilitan la infiltración de contaminantes hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Adicionalmente, la exposición prolongada de comunidades ribereñas a hidrocarburos se asocia con

incrementos de afecciones cutáneas, respiratorias y gastrointestinales (13,14). En consecuencia, el adecuado manejo de borras de petróleo en zonas amazónicas no es solo un reto técnico, sino también una obligación ética y de salud pública.

La investigación sobre caracterización de borras petroleras en el Perú es aún incipiente. Mientras en países como Brasil, China o Estados Unidos se han desarrollado metodologías estandarizadas para evaluar materia orgánica total, TPH, BTEX, PAH, metales y azufre total (4,2), los estudios locales son escasos y fragmentados. Esta disparidad ha generado un vacío de conocimiento técnico-científico que dificulta la toma de decisiones informadas por parte de las autoridades ambientales y las empresas operadoras (15).

Es por ello, que el presente estudio aborda este vacío mediante la caracterización fisicoquímica de las borras de hidrocarburos generadas en la Locación 2A del Lote 95, en la región Loreto. El objetivo fue evaluar la composición fisicoquímica, el riesgo ambiental y el potencial de valorización de las borras de hidrocarburos generadas en la Locación 2A del Lote 95 (Amazonía Peruana), operado por PETROTAL PERÚ S.R.L., en la región Loreto. De igual manera, el estudio pretende determinar cuantitativamente los principales parámetros ambientales -materia orgánica total, metales totales, hidrocarburos totales de petróleo (TPH), compuestos BTEX, hidrocarburos

aromáticos policíclicos (PAH) y azufre total- y evaluar los riesgos asociados. Los resultados obtenidos permitirán no solo diagnosticar el grado de contaminación, sino también orientar estrategias de tratamiento, recuperación y disposición final segura, conforme a la legislación ambiental vigente.

En términos de relevancia, esta investigación representa una contribución significativa al conocimiento científico nacional sobre residuos peligrosos del sector hidrocarburífero, aportando datos que podrán ser utilizados en futuros proyectos de biorremediación, tratamiento térmico o valorización energética. De igual manera, proporciona evidencia empírica útil para fortalecer la fiscalización ambiental descentralizada, en línea con los objetivos del Ministerio del Ambiente (MINAM) y la política nacional de gestión integral de residuos.

Finalmente, el estudio busca promover una visión más sostenible de la industria petrolera en la Amazonía Peruana, donde la producción de energía y la conservación ambiental no deben ser procesos excluyentes. Por medio de un enfoque científico riguroso y basado en el cumplimiento de estándares internacionales, la caracterización de las borras de petróleo del Lote 95 permitirá avanzar hacia un modelo de gestión responsable de residuos peligrosos, compatible con la preservación del ecosistema amazónico y el bienestar de las comunidades locales (6,9).

METODOLOGÍA

El Lote 95 se localiza en la zona noroccidental del territorio peruano, sobre la vertiente oriental de la cordillera de los Andes, abarcando los distritos de Puinahua, Capello, Maquia, Emilio de San Martín y Tapiche, en la provincia de Requena, región Loreto. Se encuentra aproximadamente a 200 km de la ciudad de Iquitos y forma parte de la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional Pacaya Samiria.

La operación del Lote 95 está actualmente a cargo de PetroTal Perú S.R.L., empresa que asumió la gestión del área luego de la aprobación del cambio de garante corporativo de Gran Tierra Energy Perú S.R.L. a PetroTal, formalizado mediante el Decreto Supremo N.º 033-2018-EM el 29 de noviembre de 2018. El lote limita al norte con la Reserva Nacional Pacaya Samiria — establecida mediante el Decreto Supremo N.º 016-82-AG, del 4 de febrero de 1982—, mientras que hacia el este, oeste y sur colinda con tierras de propiedad estatal.

Para el abordaje del estudio se adoptó un enfoque cuantitativo, de tipo descriptivo y diseño no experimental, centrado en la caracterización fisicoquímica de las borras de hidrocarburos generadas en la Locación 2A del Lote 95, operado por PETROTAL PERÚ S.R.L., en la región Loreto. Este enfoque resultó ser el más adecuado debido a que el objetivo principal fue medir y describir parámetros fisicoquímicos específicos de las borras sin manipular las variables de estudio.

La naturaleza no experimental permitió observar las muestras en su contexto real, garantizando resultados representativos del proceso operativo (6). Asimismo, el carácter descriptivo y observacional del estudio posibilitó recopilar datos empíricos mediante técnicas analíticas instrumentales, generando información objetiva sobre la composición de los residuos. Cabe destacar, que este tipo de investigación es ampliamente utilizado en estudios ambientales donde el propósito es conocer las características químicas y los niveles de peligrosidad de materiales contaminantes (16). Adicionalmente, el estudio tuvo un corte longitudinal, al considerar variaciones temporales en la composición de las borras durante el proceso productivo.

En cuanto a la muestra del estudio, estuvo conformada por las borras de hidrocarburos generadas durante el proceso de extracción y tratamiento del petróleo en la Locación 2A del Lote 95. Estas borras generadas, se acumulan en diferentes unidades del sistema de producción, incluyendo separadores trifásicos, tratadores térmicos, desaladores, tanques de almacenamiento de crudo tratado y sistemas de tratamiento de agua producida (5).

La muestra estuvo compuesta por nueve (9) puntos de muestreo seleccionados mediante un muestreo no probabilístico intencional, basado en criterios técnicos y de representatividad del proceso (17). Dichos puntos seleccionados fueron representativos de las diferentes etapas

del proceso de separación y almacenamiento, e incluyeron tanques de almacenamiento, sumideros, tratadores térmicos y unidades de separación de agua producida, lo que permitió abarcar la variabilidad composicional de las borras en distintas etapas. Se excluyeron tanques que hubieran sido limpiados o intervenidos recientemente, con el fin de asegurar que las muestras representaran condiciones operativas normales (18).

La población de estudio estuvo conformada por las borras de hidrocarburos generadas durante el proceso de extracción y tratamiento del petróleo en la Locación 2A del Lote 95. Estas borras se acumulan en diferentes unidades del sistema de producción, incluyendo separadores trifásicos, tratadores térmicos, desaladores, tanques de almacenamiento de crudo tratado y sistemas de tratamiento de agua producida (5).

La muestra estuvo compuesta por nueve (9) puntos de muestreo seleccionados mediante un muestreo no probabilístico intencional, basado en criterios técnicos y de representatividad del proceso (17). Los puntos seleccionados fueron representativos de las diferentes etapas del proceso de separación y almacenamiento, e incluyeron tanques de almacenamiento, sumideros, tratadores térmicos y unidades de separación de agua producida, lo que permitió abarcar la variabilidad composicional de las borras en distintas etapas del proceso. Se excluyeron tanques que hubieran sido limpiados o

intervenidos recientemente, para asegurar que las muestras representaran condiciones operativas normales (18).

La selección específica de los puntos de muestreo se detalla en la Tabla 1, donde se presentan los nueve puntos analizados con sus respectivos códigos, nombres de tanques, fechas y horas de extracción. La extracción de muestras se realizó entre el 24 y 27 de noviembre de 2022, bajo la supervisión del laboratorio acreditado AGQ Labs, cumpliendo con protocolos de seguridad industrial y normas nacionales para el manejo de residuos peligrosos. Específicamente, las muestras fueron recolectadas directamente desde los fondos de tanques y equipos utilizando muestreadores de acero inoxidable, acción realizada para evitar contaminación cruzada (19). Cada muestra tuvo un volumen aproximado de 1 galón (3.785 L) y fue almacenada en recipientes de polietileno de alta densidad (HDPE) previamente esterilizados. Posteriormente, se etiquetaron con un código alfanumérico que incluyó fecha, hora, coordenadas UTM y tipo de tanque, registrándose en formatos de cadena de custodia que garantizaron la trazabilidad desde la recolección hasta el análisis en laboratorio (20).

Finalmente, durante el transporte, las muestras se mantuvieron a temperatura controlada (4°C) para preservar sus propiedades fisicoquímicas y evitar volatilización o degradación de compuestos orgánicos volátiles (3).

Tabla 1. Puntos de muestreo de borras de hidrocarburos en la Locación 2A del Lote 95.

Nº	Código	Nombre del tanque	Fecha de extracción	Hora de extracción	Laboratorio
1	T001	VENTA	27/11/2022	14:25	AGQ
2	T300	SUMIDERO	24/11/2022	14:30	AGQ
3	T310	SUMIDERO	27/11/2022	15:30	AGQ
4	T500A	VENTA	27/11/2022	14:54	AGQ
5	T500A	VENTA	27/11/2022	15:03	AGQ
6	610A	SKIMMER	27/11/2022	17:19	AGQ
7	620A	REPOSO	27/11/2022	17:37	AGQ
8	T510	SUMIDERO	24/11/2022	15:30	AGQ
9	T500B	VENTA	27/11/2022	17:11	AGQ

Fuente: AGQ Labs (21).

En relación con los parámetros analizados y métodos analíticos empleados, la caracterización fisicoquímica comprendió la determinación de seis grupos de parámetros, de acuerdo con normas internacionales (EPA, DIN, ISO).

Para la determinación de materia orgánica total (MOT) se empleó un método gravimétrico de calcinación controlada (550°C), según procedimiento PEC-012 de AGQ Labs, basado en normativa española BOE-A-1982-1323, análisis que estima el potencial energético y la biodegradabilidad de las borras (1). En cuanto a los metales totales, se aplicó digestión ácida (EPA 3050B) y cuantificación por ICP-MS (EPA 6020B), determinando 33 elementos, incluidos arsénico, cadmio, cromo, plomo y níquel, de alta relevancia toxicológica (8). Para hidrocarburos totales de petróleo (TPH) se realizó fraccionamiento por rangos C5–C10, C10–C28 y C28–C40 mediante cromatografía de gases (GC-FID), según método EPA 8015C (10). Los compuestos BTEX (benceno,

tolueno, etilbenceno, xilenos) se analizaron mediante técnica Headspace GC-FID (EPA 8260D) para compuestos volátiles (7), mientras que los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) se determinaron en 18 compuestos prioritarios mediante GC-MS/MS (EPA 8270E) (21).

No obstante, el azufre total se analizó mediante combustión instantánea a alta temperatura (1000°C), método interno PE-440, para cuantificar azufre orgánico e inorgánico (11). Cada ensayo se realizó en el laboratorio AGQ Labs, acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL) y el International Accreditation Service (IAS) bajo la norma ISO/IEC 17025, lo que garantiza la trazabilidad metrológica y la confiabilidad de los resultados.

Respecto al control de calidad y procesamiento de datos, el control de calidad analítico incluyó blancos de método, duplicados, materiales de referencia certificados y calibraciones con estándares trazables, siguiendo

procedimientos de la EPA (21). Los datos se recibieron en informes oficiales del laboratorio y se procesaron en Microsoft Excel 2019 y SPSS v26, aplicando estadística descriptiva (media, desviación estándar, coeficiente de variación) y comparaciones con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) del D.S. N.º 011-2017-MINAM.

Finalmente, es importante mencionar que la investigación respetó los principios de integridad científica, veracidad de resultados y confidencialidad de información empresarial, conforme a las políticas de PETROTAL PERÚ S.R.L. y a la legislación peruana sobre protección de datos personales. Se obtuvo autorización formal de la empresa para la toma de muestras y uso académico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio de caracterización fisicoquímica de las borras de hidrocarburos generadas en la Locación 2A del Lote 95 permitió identificar y cuantificar los principales parámetros ambientales asociados a estos residuos peligrosos. Los

resultados se presentan agrupados en seis categorías analíticas: materia orgánica total (MOT), metales totales, hidrocarburos totales de petróleo (TPH), compuestos BTEX, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y azufre total, complementados con un análisis comparativo según el tipo de zona y su posible impacto ambiental.

Materia Orgánica Total (MOT) e Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)

Contenido de MOT

El contenido de materia orgánica total (MOT) en las nueve muestras de borras analizadas osciló entre 47.3% y 68.6%, con un promedio general de $58.94 \pm 7.24\%$. Los valores más elevados se registraron en los tanques T310 (68.6%), 2T500A (66.8%) y 1T500A (65.4%), pertenecientes al tanque sumidero y de ventas. En contraste, las menores concentraciones correspondieron a las muestras del sistema de tratamiento de agua (610A: 47.3% y 620A: 51.0%).

Tabla 2. Resumen de caracterización fisicoquímica por punto de muestreo Materia orgánica total, hidrocarburos totales de petróleo y azufre total.

Tanque	MOT (%)	TPH C5-C10 (mg/kg)	TPH C10-C28 (mg/kg)	TPH C28-C40 (mg/kg)	TPH Total (mg/kg)	Azufre total (mg/kg)
T001	47.5	1,245	>50,000	>200,000	>300,000	4,234
T300	58.2	856	15,890	44,825	61,571	5,678
T310	68.6	1,890	23,400	61,470	86,760	6,892
1T500A	65.4	3,210	>50,000	>200,000	>300,000	8,567
2T500A	66.8	2,980	>50,000	>200,000	>300,000	7,423

Tanque	MOT (%)	TPH C5-C10 (mg/kg)	TPH C10-C28 (mg/kg)	TPH C28-C40 (mg/kg)	TPH Total (mg/kg)	Azufre total (mg/kg)
610A	47.3	1,120	18,750	65,420	85,290	3,586
620A	51.0	890	21,340	89,600	111,830	4,102
T510	52.1	1,670	42,100	120,000	163,770	6,234
1T500B	61.8	4,120	>50,000	>200,000	>300,000	9,462
Promedio	58.9	1,998	36,276	164,479	189,802	6,242
ECA Industrial	-	-	-	-	5,000-10,000	-

Estos resultados indican que las borras analizadas poseen un alto contenido de hidrocarburos y compuestos carbonáceos, consistentes con estudios internacionales que reportan valores entre 56% y 97%. El elevado contenido orgánico confiere a estos residuos un potencial energético significativo, susceptible de valorización mediante tecnologías como pirólisis o coprocesamiento en hornos cementeros. Sin embargo, también implica riesgo de lixiviación y alta carga contaminante, particularmente en los puntos con mayor concentración, donde podrían generarse efluentes oleosos si no se maneja o dispone adecuadamente.

La distribución de la MOT por zona mostró diferencias marcadas: los tanques T300, T301, 1T500A, 2T500A y 1T500B presentaron contenidos superiores al 60%, mientras que los tanques T001, 610A, 520A Y T510 no superaron el 52%. Esta variabilidad composicional responde al grado de contacto de las borras con procesos térmicos y químicos de separación, así como al tiempo de acumulación en los tanques.

Contaminantes tóxicos específicos

Metales Totales

La determinación de metales totales reveló la presencia de 33 elementos, de los cuales 20 mostraron concentraciones significativas. Los metales pesados de interés toxicológico (As, Cd, Cr, Pb, Ni y Hg) se mantuvieron por debajo de los límites establecidos en el Decreto Supremo N.º 011-2017-MINAM para suelos industriales. Sin embargo, algunas muestras -notablemente T310, 610A y 620^a- presentaron valores relativamente elevados de cromo (121 mg/kg), níquel (68 mg/kg) y plomo (97.4 mg/kg), que, si bien no exceden los estándares normativos, representan un riesgo potencial por bioacumulación y persistencia ambiental.

Tabla 3. Metales pesados por punto de muestreo con comparación ECA Concentraciones en mg/kg y comparación con límites normativos.

Tanque	As	Cd	Cr	Pb	Ni	Hg	Exceso ECA*
T001	2.1	0.2	45	32.5	18	0.15	No
T300	3.8	0.4	67	41.2	29	0.28	No
T310	7.6	0.8	121	97.4	68	0.93	No
1T500A	4.2	0.5	78	56.8	35	0.42	No
2T500A	5.1	0.6	89	64.3	42	0.51	No
610A	3.2	0.3	89	45.2	32	0.21	No
620A	4.1	0.5	94	58.7	41	0.35	No
T510	6.8	0.7	105	78.9	51	0.67	No
1T500B	5.9	0.6	98	71.4	46	0.58	No
Promedio	5.1	0.6	98	67.8	47	0.50	-
Límite ECA (D.S. 011-2017-MINAM)	50	20	150	120	420	6	-

*Exceso ECA: Indica si algún metal supera los límites normativos.

El análisis comparativo evidenció que las concentraciones más altas de metales corresponden a zonas con contacto directo con efluentes o sedimentos del proceso, donde la mezcla de crudo, agua y productos de corrosión

favorece su acumulación. Por ejemplo, el arsénico (7.6 mg/kg) y el mercurio (0.93 mg/kg) encontrados en T310 se asocian con la composición natural del crudo y los aditivos químicos empleados en la separación trifásica.

Tabla 4. Metales estructurales y sales en borras de hidrocarburos.

Elemento	Rango de concentración (mg/kg)	Valor máximo observado (mg/kg)
Hierro (Fe)	8,432 - 23,108	23,108
Aluminio (Al)	2,156 - 7,869	7,869
Sodio (Na)	12,450 - 31,415	31,415

En cuanto a metales estructurales y sales, se detectaron niveles muy altos de hierro (hasta 23,108 mg/kg), aluminio (7,869 mg/kg) y sodio (31,415 mg/kg), principalmente en las muestras de los sistemas de tratamiento de agua y sumideros. Estos elementos reflejan la contaminación mineral y salina derivada del agua de formación

y la corrosión de equipos metálicos. Desde una perspectiva de manejo, la elevada salinidad observada podría limitar la aplicación de procesos biológicos de tratamiento (biorremediación) y requerir, en su lugar, métodos fisicoquímicos de estabilización.

Tabla 5. Concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) en borras de hidrocarburos.

Tanque	Naftaleno (mg/kg)	Fenantreno (mg/kg)	Criseno (mg/kg)	Benzo(a)pireno (mg/kg)	Dibenzo(a,h)antraceno (mg/kg)	PAH Total (mg/kg)	% Carcinogénicos
T001	8.2	6.4	12.8	11.5	4.1	64.3	35
T300	2.1	1.8	3.2	2.8	0.9	16.2	28
T310	5.8	4.9	9.1	8.4	2.7	43.7	33
1T500A	9.4	8.7	15.2	13.8	5.6	76.8	38
2T500A	10.1	9.3	16.4	14.2	5.9	81.2	36
610A	3.2	2.6	4.8	4.1	1.4	22.6	30
620A	4.5	3.8	7.2	6.5	2.1	34.7	32
T510	12.3	11.1	18.7	16.4	6.8	97.4	35
1T500B	13.8	12.4	20.1	18.9	7.2	116.0	39
Promedio	7.7	6.8	11.9	10.7	4.1	61.4	34

Las muestras T001, 1T500A, 2T500A y T510 presentaron las mayores concentraciones (>50 mg/kg), con un promedio general de 56.43 mg/kg. Se estimó que, en promedio, el 32% del total de PAH corresponde a compuestos carcinogénicos, destacando el benzo(a)pireno, el cual superó los 10 mg/kg en varias muestras. Estas cifras demuestran que las borras evaluadas tienen alto potencial cancerígeno y ecotóxico, incluso en comparación con residuos petroleros de otras regiones.

La presencia simultánea de PAH de bajo y alto peso molecular sugiere la coexistencia de procesos de degradación parcial y de acumulación térmica. Los compuestos de 2–3 anillos (naftaleno, acenaftileno, fluoreno) son más volátiles y fácilmente biodegradables, mientras que los de 5–6 anillos (benzo[a]pireno, indeno[1,2,3-cd]

pireno) son persistentes y bioacumulables. La detección de ambos tipos indica que las borras han pasado por procesos de envejecimiento natural, característicos de residuos almacenados por períodos prolongados.

Desde el punto de vista ambiental, la elevada proporción de PAH carcinogénicos plantea un alto riesgo para los ecosistemas y la salud humana, especialmente si estos residuos son dispuestos sin tratamiento en suelos amazónicos de alta permeabilidad. Los resultados sugieren que cualquier estrategia de manejo debe priorizar tecnologías capaces de destruir térmicamente los compuestos aromáticos o reducir su movilidad, como la desorción térmica y la incineración controlada.

El benceno, clasificado por la IARC como carcinógeno humano del Grupo 1, alcanzó valores

entre 8.4 y >50 mg/kg, frente al límite de 0.03 mg/kg. De igual forma, el etilbenceno y los xilenos totales mostraron incumplimientos en el 100% de las muestras, con máximos de >150 mg/kg. Estas concentraciones reflejan una alta toxicidad aguda y crónica, con potencial riesgo para la salud de los trabajadores y comunidades cercanas debido a su volatilidad y capacidad de infiltración en suelos.

La muestra 1T500B registró los valores más críticos (>50 mg/kg para todos los compuestos BTEX), posiblemente debido a contaminación con condensados o gasolina durante operaciones de mantenimiento. Por el contrario, las muestras T300 y T510 mostraron niveles mínimos o por debajo del límite de detección, atribuibles a procesos de volatilización o dilución en efluentes líquidos.

El patrón observado sugiere una correlación positiva ($r=0.78$, $p<0.05$) entre las concentraciones de BTEX y la fracción TPH C5–C10, indicando que los compuestos aromáticos volátiles se concentran en las borras con mayor contenido de hidrocarburos ligeros. Desde el punto de vista ambiental y ético, la elevada proporción de PAH carcinogénicos plantea un alto riesgo para los ecosistemas y la salud humana, especialmente si estos residuos son manejado o dispuestos sin tratamiento en suelos amazónicos de alta permeabilidad. Los resultados sugieren categóricamente que cualquier estrategia de manejo debe priorizar tecnologías capaces de

destruir térmicamente los compuestos aromáticos o reducir su movilidad, como la desorción térmica y la incineración controlada.

Discusión

Los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica de las borras de hidrocarburos del Lote 95 evidencian una composición altamente compleja, dominada por compuestos orgánicos e inorgánicos de significativa peligrosidad ambiental. El alto contenido de materia orgánica total (58.94%) concuerda con los hallazgos de estudios recientes (1,2), quienes describen a las borras petroleras como mezclas ricas en hidrocarburos pesados, sólidos minerales y agua, cuya proporción depende de las condiciones operativas del campo y del tiempo de almacenamiento. Este elevado contenido orgánico confirma el potencial energético del residuo, pero también su capacidad de generar contaminación persistente en suelos y aguas subterráneas si no se maneja adecuadamente.

En cuanto a los metales totales, aunque las concentraciones de arsénico, cadmio, cromo, plomo y níquel no superan los estándares peruanos (D.S. N.º 011-2017-MINAM), su presencia constante revela un riesgo ambiental acumulativo, especialmente en ecosistemas sensibles como la Amazonía. Los valores más altos de hierro, sodio y aluminio, observados en las zonas de tratamiento

de agua, reflejan procesos de corrosión y arrastre de sales minerales, similares a los reportados por estudios en ambientes petroleros tropicales (13,3). Aunque no se detectaron niveles críticos de metales pesados, su persistencia y movilidad en suelos amazónicos podrían afectar la calidad del agua y la salud de comunidades ribereñas a largo plazo.

El análisis de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) constituye uno de los hallazgos más relevantes. Las concentraciones superiores a 300,000 mg/kg en varias muestras superan ampliamente los límites internacionales para residuos peligrosos, corroborando la necesidad de una gestión especial. Los estudios Dornelas et al.; Lozano y Hernández, (4, 10) coinciden en que este tipo de residuos no debe disponerse directamente en suelos, pues los hidrocarburos pesados (C28–C40) poseen baja degradabilidad y alta afinidad por la materia orgánica, dificultando su remediación natural. En el contexto amazónico, esta característica representa un desafío mayor, ya que los suelos son porosos y la infiltración rápida puede facilitar la migración de contaminantes hacia cuerpos de agua.

Los resultados de los compuestos BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) son especialmente preocupantes. Las concentraciones que superan hasta 1,600 veces los límites normativos indican un alto riesgo toxicológico

para la salud humana y ambiental. El benceno, incluso en bajas dosis, ha sido asociado con efectos cancerígenos y hematológicos (8,7). La volatilidad de estos compuestos también implica riesgos de exposición ocupacional durante el manejo de las borras. En este sentido, los hallazgos coinciden con estudios recientes (6), quienes documentaron alteraciones respiratorias y neurológicas en trabajadores petroleros expuestos a vapores orgánicos.

Por su parte, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), con concentraciones de hasta 116 mg/kg, confirman la persistencia de compuestos carcinogénicos como el benzo(a)pireno. Según estudios especializados estos compuestos son indicadores de contaminación crónica, difíciles de eliminar mediante tratamientos biológicos convencionales (9). Su presencia simultánea con TPH y BTEX refuerza la necesidad de tratamientos térmicos o fisicoquímicos antes de considerar su disposición final.

De manera integral, los resultados sugieren que las borras del Lote 95 poseen características comparables a las reportadas en residuos de refinerías internacionales, pero con la particularidad de encontrarse en una región ecológicamente vulnerable. Por ello, el uso de tecnologías de valorización energética (pirólisis, co-procesamiento o recuperación de aceites) se

presenta como una alternativa viable, siempre que se realicen controles de emisiones y monitoreo ambiental continuo (1,2).

Finalmente, esta investigación aporta una línea base científica inédita en la Amazonía peruana, ofreciendo información esencial para que las autoridades ambientales y las empresas petroleras adopten estrategias de gestión sostenible de residuos peligrosos. Los resultados confirman que una gestión inadecuada de las borras podría comprometer la calidad del suelo, del agua y la salud de la población local, reafirmando la urgencia de fortalecer los sistemas de fiscalización ambiental descentralizada y la aplicación efectiva de la normativa vigente (15).

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió caracterizar de manera integral las borras de hidrocarburos generadas en la Locación 2A del Lote 95, demostrando que se trata de residuos peligrosos de alta complejidad química, cuyo manejo inadecuado representa un riesgo significativo para el ambiente y la salud humana. Los resultados evidenciaron que estos residuos presentan altas concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo (TPH), compuestos BTEX y PAH, acompañados de niveles moderados de metales pesados y un elevado contenido de materia

orgánica total (MOT), que en promedio alcanzó el 58.94%.

Las concentraciones de TPH superiores a 300,000 mg/kg y la presencia de BTEX que exceden más de mil veces los límites normativos confirman la naturaleza tóxica y persistente de las borras, lo que impide su disposición directa en suelos sin previo tratamiento. Asimismo, la detección de hidrocarburos aromáticos policíclicos como el benzo(a)pireno y el criseno revela un potencial carcinogénico considerable. Aunque los metales pesados no superaron los límites legales, su presencia recurrente, especialmente de cromo, plomo y níquel, implica riesgos de acumulación en suelos amazónicos, donde los procesos de lixiviación son más intensos debido a las condiciones climáticas y edáficas.

Desde el punto de vista técnico, los resultados indican que las borras del Lote 95 no son aptas para remediación biológica directa debido a su alta carga orgánica, su viscosidad y la baja biodisponibilidad de los hidrocarburos pesados. En consecuencia, se recomienda priorizar tecnologías fisicoquímicas y térmicas, como la pirólisis, la extracción con solventes o el co-procesamiento en hornos cementeros, que permitan reducir la toxicidad del residuo y, al mismo tiempo, aprovechar su contenido energético en el marco de una economía circular.

A nivel ambiental y social, esta investigación aporta una línea base científica inédita para la Amazonía peruana, que servirá como referencia para futuras evaluaciones de impacto y políticas de gestión de residuos peligrosos en zonas petroleras. Los hallazgos refuerzan la necesidad de fortalecer la fiscalización ambiental descentralizada y de exigir a las empresas operadoras la implementación de planes de manejo y disposición final sustentables, en cumplimiento con la normativa nacional vigente (D.S. N.º 011-2017-MINAM).

Finalmente, la caracterización fisicoquímica de las borras de petróleo constituye un paso esencial para garantizar una gestión ambiental responsable en la industria hidrocarburífera del Perú. La información obtenida no solo permite dimensionar el grado de contaminación potencial, sino también orientar estrategias de manejo, remediación, recuperación y valorización energética, contribuyendo al equilibrio entre desarrollo económico y protección del ecosistema amazónico.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran no tener conflictos de interés.

REFERENCIAS

- He J, Sun L, Zhao T. Characterization and valorization of petroleum sludges through thermal and solvent extraction methods. *J Clean Prod.* 2023; 402:136790. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136790>
- Sun X, Zhou Y, Li Q. Biodegradation and thermal recovery of oil sludges: Advances and limitations. *Waste Manag.* 2023; 157:84-99. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.12.015>
- Zhao T, Li X, Wang Y. Global trends in petroleum sludge generation and management. *Renew Sust Energ Rev.* 2021; 146:111197. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111197>
- Dornelas C, de Oliveira M, Souza F. Oil sludge treatment technologies: A review. *Environ Technol Innov.* 2019; 13:140-152. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.02.004>
- Bendezú J, Ríos L. Gestión de residuos peligrosos en operaciones petroleras de la Amazonía peruana. *Rev Peru Ing Ambient.* 2021;17(2):44-53. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/ingenia/article/view/24721>
- Forouhid S, Tavakoli M, Rahimi M, Shafiee M. Occupational exposure to oil waste and health impacts among refinery workers. *Environ Health Perspect.* 2023;131(2):210-223. <https://doi.org/10.1289/EHP11312>
- Ziv M, Solov'eva A. Volatile aromatic hydrocarbons in oil residues: Toxicological assessment. *Toxicol Rep.* 2021; 8:435-444. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2021.01.012>
- World Health Organization (WHO). Guidelines for the management of hazardous wastes containing hydrocarbons. Geneva: WHO; 2018. <https://www.who.int/publications/item/9789241514205>
- Orozco M, Aguirre C. Gestión ambiental de residuos peligrosos del sector petrolero en el Perú. *Rev Ing Ambient Desarr Sosten.* 2023;9(1):57-72. <https://doi.org/10.29047/01225325.370>
- Lozano J, Hernández L. Hydrocarbon fractions in petroleum residues and their environmental significance. *Fuel Process Technol.* 2022; 233:107-125. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107125>
- Abeßer S, Keller L, Schubert T. Sulfur content and combustion behavior of petroleum residues: Implications for environmental management. *J Hazard Mater.* 2019; 375:189-198. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.070>

- 12.** Van Kempen E, Wijnand E, Hohlmann J. Chemical additives in oil extraction and their environmental fate. *Environ Sci Technol Lett.* 2018;5(9):556-563. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00385>
- 13.** Hernández P, López D, Ramos E. Evaluación de contaminación por hidrocarburos en suelos amazónicos. *Rev Cienc Ambiente.* 2019;5(1):29-40. <https://revistas.unamad.edu.pe/index.php/scientiaambiente/article/view/246>
- 14.** Nieuwenhuijsen MJ, Martínez D, Grellier J. Exposure to hydrocarbons and health effects in Amazonian communities. *Int J Environ Res Public Health.* 2017;14(11):1457. DOI 10.3390/ijerph14111457.
- 15.** Flores LA, Ríos L, Gálvez C. Caracterización de borras de hidrocarburos en operaciones amazónicas del Lote 95. *Rev Investig Amazónica UNAP.* 2025;12(1):15-28. <https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/items/7d220abf-fa0a-4763-acba-b1647a684842>
- 16.** Domazetovska S, Karanfilovska B, Ilievská J. Analytical approaches for characterization of oil sludges in petroleum industries. *Chem Eng J Adv.* 2020; 3:100018. DOI 10.1016/j.cej.2020.100018.
- 17.** Kpang FA, Dollah R. Sampling methodologies for oil sludge and contaminated sediments. *J Environ Chem Eng.* 2021;9(4):105642. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105642
- 18.** Agudelo D, Parra P, Gómez J. Procedures for representative sampling of oil-based residues in storage tanks. *Petrol Sci Eng J.* 2021; 201:108418. <https://www.astm.org/d4057-22.html>
- 19.** Peixoto R, Castro R, da Silva L. Environmental monitoring and safe handling of petroleum sludges. *J Environ Manage.* 2023; 341:118223. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.118223
- 20.** Bernedo G. Procedimientos de muestreo de residuos peligrosos según norma ISO 17025. *Bol Tec Ambient Perú.* 2021;4(2):23-31. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/manual-tecnico-gestion-residuos-peligrosos-peru>
- 21.** United States Environmental Protection Agency (EPA). Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods. SW-846. Washington D.C.: U.S. EPA; 2022. <https://www.epa.gov/hw-sw846>