

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**“TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO
MEDIANTE EL PROCESO DE ADSORCIÓN CON CARBÓN
ACTIVADO”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO SANITARIO

ELABORADO POR:

DIANA QUISPE PARDAVÉ

ASESOR:

ING. JUAN CARLOS ALARCÓN CÓNDOR

LIMA - PERÚ

2023

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos, por todo el amor y apoyo incondicional brindado, por todos los valores inculcados, por sus enseñanzas de vida a través de hechos y no sólo palabras.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Juan Carlos Alarcón Córdor, por su constante asesoría para el desarrollo de la presente investigación.

A la Municipalidad Provincial de Cajamarca (MPC), por brindarme las facilidades para acceder al relleno sanitario que administra y obtener las muestras de lixiviados para el desarrollo de la presente investigación.

Al Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Sólidos Peligrosos CITRAR – UNI, por permitirme acceder a un módulo dentro de sus instalaciones para la implementación de la investigación, y el acceso al laboratorio y equipos para los análisis necesarios.

Al Ing. Frank Martínez, por su apoyo y asesoría para la elaboración de viales de DQO.

Al Ing. Juan Carlos Castro, por su apoyo y asesoría para la selección del mejor carbón activado en la investigación.

A mis familiares, amigos y colegas, por sus sugerencias, red de contactos y ayuda brindada.

RESUMEN

La presente investigación se orientó a evaluar el proceso de adsorción con carbón activado para el tratamiento de lixiviados de relleno sanitario, basado en la reducción de materia orgánica.

Se consideró desarrollar el proceso de adsorción entre lixiviados provenientes del relleno sanitario de Cajamarca y carbón activado en un equipo de prueba de jarras. Se inició con la caracterización del afluente basada en DQO total e IB (DBO_5/DQO) principalmente; posterior a ello, se realizó la selección del carbón activado a emplear, la evaluación de la cantidad de carbón y del tiempo de contacto, y la estimación de la isoterma de adsorción, basadas en la remoción de DQO total. La investigación se desarrolló de junio a agosto del 2019.

Los lixiviados evaluados se clasificaron como intermedios con baja biodegradabilidad, los que requieren de procesos fisicoquímicos para la depuración de la materia orgánica. Por otro lado, el carbón activado CARBOSORB PAC 18 presentó buena afinidad con la DQO total presente en los lixiviados y mejor capacidad adsorptiva frente a los otros carbones evaluados. Además, se evidenció que, a mayor cantidad de CARBOSORB PAC 18, se obtienen mejores remociones de DQO total mediante adsorción, estabilizándose el nivel de remoción máxima a partir de 20 g/L; de forma similar, a mayor tiempo de contacto, mejores remociones son alcanzadas, las que se estabilizan a partir de 60 minutos; con esta cantidad de carbón activado (CA) y tiempo de contacto (TC), la remoción máxima de DQO total obtenida fue 75%. La isoterma de Freundlich fue la que regía el proceso de adsorción, con la cual se estimaron las siguientes remociones teóricas de DQO total: 60% con 4 g/L de CA, 65% con 7.5 g/L, 70% con 15 g/L y 72% con 20 g/L; además, alcanzar el 60% de remoción, significaría una inversión mensual de S/. 1.15 por familia para el suministro del carbón activado.

De los resultados obtenidos, se sostiene que, el proceso de adsorción estudiado permite reducir la materia orgánica presente en los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca. Sin embargo, a pesar de la alta eficiencia presentada, aún requiere de un proceso adicional para cumplir con el marco legal vigente.

ABSTRACT

This research was aimed at evaluating the adsorption process with activated carbon for the treatment of landfill leachate, based on the reduction of organic matter.

It was considered to develop the adsorption process between leachate from the Cajamarca landfill and activated carbon in a jar test equipment. It began with the characterization of the influent based on total COD and BI (BOD_5/COD) mainly; subsequently, the selection of the activated carbon to be used, the evaluation of the amount of carbon and the contact time, and the estimation of the adsorption isotherm, based on the removal of total COD, were developed. The research ran from June to August 2019.

The leachates evaluated are classified as intermediates with low biodegradability, which require physicochemical processes for the purification of organic matter. On the other hand, the activated carbon CARBOSORB PAC 18 presented good affinity with the total COD present in the leachates and better adsorptive capacity compared to the others evaluated carbons. In addition, it was evidenced that, with a higher quantity of CARBOSORB PAC 18, better total COD removals are obtained by adsorption, stabilizing the maximum removal level from 20 g/L; similarly, the longer the contact time, the better the removals are achieved, which stabilize after 60 minutes; with this amount of activated carbon (AC) and contact time (CT), the maximum removal of total COD obtained was 75%. The Freundlich isotherm was the one that governed the adsorption process, with which the following theoretical removals of total COD were estimated: 60% with 4 g/L of AC, 65% with 7.5 g/L, 70% with 15 g/L and 72% with 20 g/L; Furthermore, reaching 60% removal would mean a monthly investment of S/. 1.15 per family for the supply of activated carbon.

From the results obtained, it is argued that the adsorption process studied allows reducing the organic matter present in the leachate from the Cajamarca landfill. However, despite the high efficiency presented, it still requires an additional process to satisfy the current legal framework.

PRÓLOGO

Los lixiviados generados en los rellenos sanitarios van perdiendo su característica de biodegradabilidad al pasar de los años, pues las celdas de disposición final de residuos que confinan desechos orgánicos e inorgánicos, funcionan como grandes reactores anaerobios que agotan el material biodegradable y de forma paulatina va predominando el material refractario. Tan es así que, los lixiviados son catalogados como jóvenes tan sólo hasta los 2 años, edad hasta la que se mantiene una biodegradabilidad importante y a partir de la cual las alternativas de tratamiento biológico ya no son recomendables. Por ello, las alternativas que contemplan procesos fisicoquímicos para la depuración de materia orgánica presente en lixiviados resultan ser beneficiosas la mayor parte del tiempo de vida útil de un relleno sanitario, entre ellas se tiene al proceso de adsorción con carbón activado, el cual ha presentado alta eficiencia en investigaciones en países como México y Colombia, resultando atractivo evaluar este proceso empleando lixiviados generados en nuestro país.

En la presente investigación, se ha evaluado del proceso de adsorción con carbón activado para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca, basado en la reducción de materia orgánica. Se consideró desarrollar el proceso de adsorción en un equipo de prueba de jarras. Para ello, se realizó la caracterización del afluente, se seleccionó el carbón activado a emplear, se evaluó la cantidad de carbón y el tiempo de contacto, y se estimó la isoterma de adsorción. La investigación se realizó en el Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Sólidos Peligrosos CITRAR – UNI.

Para la verificación de la reducción de materia orgánica, se ha considerado el parámetro de medición de Demanda Química de Oxígeno total. Además, con el objeto de definir las condiciones del medio, se han considerado los parámetros de Temperatura y Potencial de hidrógeno (pH).

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
PRÓLOGO	VI
CAPÍTULO I: INFORMACIÓN GENERAL.....	1
1.1. ANTECEDENTES REFERENCIALES	1
1.2. PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	4
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	4
1.4. OBJETIVOS	4
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	4
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.5. HIPÓTESIS	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y LEGAL	6
2.1. MARCO TEÓRICO	6
2.1.1. LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO.....	6
2.1.1.1. DEFINICIÓN.....	6
2.1.1.2. GENERACIÓN DE LOS LIXIVIADOS.....	6
2.1.1.3. COMPOSICIÓN DE LOS LIXIVIADOS	8
2.1.1.4. TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS	10
2.1.2. ADSORCIÓN	12
2.1.2.1. DEFINICIÓN Y TIPOS DE ADSORCIÓN.....	12
2.1.2.2. FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE ADSORCIÓN.....	13
2.1.2.3. ANÁLISIS DEL PROCESO DE ADSORCIÓN.....	14

2.1.2.4. MATERIALES ADSORBENTES	16
2.1.2.5. EL CARBÓN ACTIVADO.....	16
2.1.3. RELLENO SANITARIO DE CAJAMARCA.....	19
2.1.3.1. GENERALIDADES	19
2.1.3.2. INSTALACIONES.....	21
2.1.3.3. OPERACIONES	22
2.1.3.4. RESIDUOS SÓLIDOS DISPUESTOS	22
2.1.3.5. LIXIVIADOS GENERADOS	23
2.2. MARCO LEGAL.....	24
2.2.1. LEGISLACIÓN NACIONAL	25
2.2.1.1. LEY N° 29338.....	25
2.2.1.2. D.S. N° 003-2010-MINAM.....	26
2.2.1.3. D.S. N° 004-2017-MINAM.....	27
2.2.1.4. D.S. N° 014-2017-MINAM.....	30
2.2.2. LEGISLACIÓN INTERNACIONAL DE REFERENCIA	31
2.2.2.1. REGLAMENTO DE LEY FEDERAL – 2020, AUSTRIA....	31
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	33
3.1. UBICACIÓN.....	33
3.2. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	34
3.3. CARACTERIZACIÓN DEL AFLUENTE	35
3.4. SELECCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO.....	35
3.5. CANTIDAD DE CARBÓN ACTIVADO Y TIEMPO DE CONTACTO.....	37
3.6. ISOTERMA DE ADSORCIÓN	38
3.7. MATERIALES Y EQUIPOS	39
3.8. PARÁMETROS DE MEDICIÓN Y CONTROL	41
3.8.1. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO TOTAL (DQO)	41

3.8.2. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO TOTAL (DBO ₅)	42
3.8.3. TURBIEDAD	43
3.8.4. TEMPERATURA Y POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)	43
3.9. CRONOGRAMA	44
CAPÍTULO IV: OBTENCIÓN DE RESULTADOS	45
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL AFLUENTE	45
4.2. SELECCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO.....	46
4.3. CANTIDAD DE CARBÓN ACTIVADO Y TIEMPO DE CONTACTO.....	47
4.4. ISOTERMA DE ADSORCIÓN	48
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS	54
5.1. DE LA CARACTERIZACIÓN DEL AFLUENTE	54
5.2. DE LA SELECCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO.....	55
5.3. DE LA CANTIDAD DE CARBÓN ACTIVADO Y TIEMPO DE CONTACTO.....	57
5.4. DE LA ISOTERMA DE ADSORCIÓN	61
5.5. SUMINISTRO DE CARBOSORB PAC 18 PARA LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DE CAJAMARCA	65
5.6. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS.....	67
5.7. CUMPLIMIENTO DEL MARCO LEGAL.....	67
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	70
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES	73
CAPÍTULO VIII: REFERENCIAS	74
CAPÍTULO IX: ANEXOS.....	78
9.1. ANEXO A: REPORTES DE RESULTADOS ZEDERLAB S.A.C.....	78
9.2. ANEXO B: CARACTERIZACIÓN DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DE CAJAMARCA – 2017.....	79

9.3. ANEXO C: FICHAS TÉCNICAS DE LOS CARBONES ACTIVADOS EVALUADOS.....	80
9.4. ANEXO D: COTIZACIÓN DE LOS CARBONES ACTIVADOS EVALUADOS.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de los antecedentes.....	3
Tabla 2: Rango de composición típica de los lixiviados de rellenos sanitarios	8
Tabla 3: Comparación de las características típicas de los lixiviados de rellenos sanitarios	9
Tabla 4: Clasificación de los lixiviados de rellenos sanitarios según su edad.....	10
Tabla 5: Tratamientos convencionales de lixiviados de rellenos sanitarios	11
Tabla 6: Características del carbón activado granular y en polvo	18
Tabla 7: Residuos ingresados al relleno sanitario de Cajamarca 2010 – 2018 ..	23
Tabla 8: Composición de los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca en Marzo 2017.....	24
Tabla 9: Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de PTAR	27
Tabla 10: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua – Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales.....	28
Tabla 11: Límites de Emisiones de Lixiviados de Rellenos Sanitarios – Austria	31
Tabla 12: Características de los carbones activados evaluados	36
Tabla 13: Cronograma de la investigación.....	44
Tabla 14: Caracterización de los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca a emplear como afluente en la investigación	45
Tabla 15: Remoción de DQO total para los carbones activados CARBOSORB PAC 18, PAC 19 y GAC 23.....	46
Tabla 16: DQO total y su remoción para diferentes cantidades de CARBOSORB PAC 18 y tiempos de contacto – Prueba 1.....	47
Tabla 17: DQO total y su remoción para diferentes cantidades de CARBOSORB PAC 18 y tiempos de contacto – Prueba 2.....	47
Tabla 18: DQO total y su remoción para diferentes cantidades de CARBOSORB PAC 18 y tiempos de contacto – Promedio.....	48

Tabla 19: Resultados para el CARBOSORB PAC 18 y TC=60min – Prueba 1 ..	48
Tabla 20: Resultados para el CARBOSORB PAC 18 y TC=60min – Prueba 2 ..	49
Tabla 21: Remoción de DQO total para el CARBOSORB PAC 18 y TC=60min.	49
Tabla 22: Remoción de Turbiedad para el CARBOSORB PAC 18 y TC=60min	50
Tabla 23: Variación de Temperatura y pH para el CARBOSORB PAC 18 y TC=60min.....	50
Tabla 24: Procesamiento de información para la determinación de la isoterma de adsorción.....	51
Tabla 25: Isotermas de adsorción Freundlich y Langmuir evaluadas	52
Tabla 26: Comparación de isotermas de Freundlich y Langmuir para el CARBOSORB PAC 18 y lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca	53
Tabla 27: Análisis de la caracterización de los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca a emplear como afluente en la investigación	54
Tabla 28: Análisis de la selección del carbón activado para remoción de la DQO total presente en los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca.....	55
Tabla 29: Remoción de DQO total en función de la cantidad de CARBOSORB PAC 18 y tiempo de contacto.....	61
Tabla 30: Isoterma de adsorción de Freundlich para el CARBOSORB PAC 18 y DQO total presente en los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca.....	63
Tabla 31: Estimación de la generación de lixiviados en el relleno sanitario de Cajamarca en el año 2019.....	65
Tabla 32: Estimación del suministro mensual de CARBOSORB PAC 18 para la reducción de la materia orgánica presente en los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca	66
Tabla 33: Comparación de los Resultados Obtenidos con el Marco Legal Nacional e Internacional de Referencia (Austria)	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Componentes de un balance hidráulico en un relleno sanitario	7
Figura 2: Esquema del tratamiento de lixiviados mediante adsorción con una columna empacada con carbón activado.....	11
Figura 3: Diferencia entre absorción y adsorción	13
Figura 4: Partículas de carbón y carbón activado	16
Figura 5: Ubicación del relleno sanitario de Cajamarca	20
Figura 6: Instalaciones en el relleno sanitario de Cajamarca	21
Figura 7: Celda de disposición final de residuos sólidos municipales y poza de lixiviados en el relleno sanitario de Cajamarca	22
Figura 8: Ubicación de la investigación.....	33
Figura 9: Módulo en la Zona 2 denominada "BIOFILM"	33
Figura 10: Actividades a desarrollar para el estudio del sistema adsorción - filtración	34
Figura 11: Gestiones con la Municipalidad Provincial de Cajamarca (MPC)	34
Figura 12: Lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca a emplear como afluente en la investigación	35
Figura 13: Carbones activados evaluados	36
Figura 14: Pruebas de jarras para la selección del carbón activado	37
Figura 15: Pruebas de jarras para evaluación de la cantidad de CA y TC	37
Figura 16: Prueba de jarras para estimación de la isoterma de adsorción	39
Figura 17: Materiales y equipos utilizados en la investigación	40
Figura 18: Equipos para determinación de DQO total.....	42
Figura 19: Equipos para determinación de Turbiedad, Temperatura y pH	44
Figura 20: Resultados para el CARBOSORB PAC 18 y TC=60min	51
Figura 21: Linealización de la isoterma de Freundlich evaluada	52

Figura 22: Linealización de la isoterma de Langmuir evaluada.....	53
Figura 23: Remoción de DQO total vs. Cantidad de carbón activado – CARBOSORB PAC 18, PAC 19 y GAC 23	56
Figura 24: Remoción de DQO total vs. Cantidad de CARBOSORB PAC 18, para tiempos de contacto de 15, 30, 60, 120, 180 y 240 minutos	58
Figura 25: Remoción de DQO total vs. Tiempo de contacto, para 1, 2, 4, 14, 20 y 40 g/L de CARBOSORB PAC 18.....	59
Figura 26: Remoción de DQO total vs. Cantidad de CARBOSORB PAC 18 y Tiempo de contacto – Vista en 3D	60
Figura 27: Remoción de DQO total vs. Cantidad de CARBOSORB PAC 18 y Tiempo de contacto – Vista en planta	60
Figura 28: Temperatura y pH vs. Cantidad de CARBOSORB PAC 18.....	61
Figura 29: DQO total y su remoción vs. Cantidad de CARBOSORB PAC 18.....	62
Figura 30: Isoterma de adsorción de Freundlich para el CARBOSORB PAC 18 y DQO total presente en los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca.....	64
Figura 31: Turbiedad y su remoción vs. Cantidad de CARBOSORB PAC 18	64

CAPÍTULO I: INFORMACIÓN GENERAL

1.1. ANTECEDENTES REFERENCIALES

Se han desarrollado investigaciones orientadas al estudio de la eficiencia del proceso de adsorción con carbón activado para la remoción de materia orgánica presente en lixiviados de rellenos sanitarios en países como México y Colombia.

MEXICO 2002

En el año 2002, académicos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, realizaron un proyecto de investigación denominado “Tratamiento de lixiviados con carbón activado”. El objetivo de este trabajo fue determinar la tratabilidad fisicoquímica de los lixiviados generados en el relleno sanitario de la ciudad de Mérida – México, mediante adsorción con carbón activado.

Los lixiviados estudiados presentaron en promedio una DQO total de 5,764 mg/L, una DBO₅ total de 1,652 mg/L, una Turbiedad de 108 UNT y un pH de 8.4. Se realizaron ensayos de agitación con carbón activo granular de la marca Merck, empleando cantidades diferentes de carbón (0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25 y 2.50 g) en 50 ml de lixiviados con un tiempo de agitación de 1 hora, luego se calcularon las remociones de DQO total de las muestras filtradas con papel Whatman N° 40. Se determinó que ningún modelo teórico de isoterma de adsorción se ajustó al comportamiento experimental ensayado. Además, se obtuvo una remoción de 40% de DQO total con 50 g/L de carbón activado.

COLOMBIA 2013

Más adelante, en el año 2013, académicos del Grupo de Investigación en Modelación Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cartagena, realizaron un proyecto de investigación denominado “Alternativas de tratamiento de lixiviados aplicables al relleno sanitario parque ambiental Loma de Los Cocos de la ciudad de Cartagena, Colombia”. El objetivo de este trabajo fue determinar la viabilidad de dos alternativas para el tratamiento de los lixiviados, la evaporación natural y la adsorción con carbón activado. Los resultados obtenidos

fueron favorables para ambas opciones; sin embargo, se concluye que la adsorción con carbón activado brinda depuración de la materia orgánica, mientras que la evaporación sólo se orienta a reducir volúmenes.

Los lixiviados presentaron para época seca una DQO total de 2,080 mg/L, una DBO₅ total de 339.86 mg/L y un pH de 8.26. Se realizaron pruebas de jarras empleando cantidades diferentes de carbón activado granular de la marca Clarimex (4, 16, 28 y 40 g) en 1 L de lixiviados, el tiempo de agitación fue de 15 horas y la velocidad 150 rpm, luego se calcularon las remociones de DQO total de las muestras filtradas con papel Whatman N° 40. Se determinó que el modelo de isoterma de adsorción de Freundlich se ajustó mejor al comportamiento experimental ensayado, con el cual se verificó una remoción de DQO total superior a 73% con 40 g/L de carbón activado.

COLOMBIA 2015

Posteriormente, en el año 2015, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cartagena, Saah F. bajo la dirección de Eljaiek M. realiza el proyecto de grado “Cinética del carbón activado granular en el tratamiento del lixiviado del relleno sanitario Loma de Los Cocos en la ciudad de Cartagena”. El objetivo de este trabajo fue evaluar la cinética de la adsorción en carbón activado granular (CAG) para la remoción de DQO total presente en lixiviados.

Los lixiviados presentaron en promedio una DQO total de 10,204.7 mg/L, una Temperatura de 29 °C y un pH de 7.93. Se realizaron pruebas de agitación controladas empleando 3, 5, 15 y 30 g de carbón activado granular de la marca Clarimex en 500 ml de lixiviados, el tiempo de agitación fue de 24 horas y la velocidad 100 rpm, luego se separó el carbón de las muestras mediante filtración y se calcularon las remociones de DQO total. Se determinó que el modelo de isoterma de adsorción de Freundlich se ajustó mejor al comportamiento experimental ensayado. Además, se obtuvo una remoción de 72% de DQO total con 60 g/L de carbón activado.

Tabla 1: Resumen de los antecedentes

PROCESO	ADSORCIÓN		
	Méndez R. et al. (2002)	Eljaiek M. et al. (2013)	Saah F. et al. (2015)
Autor	Méndez R. et al. (2002)	Eljaiek M. et al. (2013)	Saah F. et al. (2015)
Afluente			
DQO total (mg/L)	5,764	2,080	10,204.7
DBO ₅ total (mg/l)	1,652	339.86	-
Turbiedad (UNT)	108	-	-
pH	8.4	8.26	7.93
Pruebas de agitación			
Tipo de carbón activo (CA)	Granular	Granular	Granular
Cantidad de CA (g)	0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25 y 2.50	4, 16, 28 y 40	3, 5, 15 y 30
Volumen de lixiviados (ml)	50	1,000	500
Tiempo de agitación (h)	1	15	24
Velocidad agitación (rpm)	-	150	100
Separación del CA	Filtración con papel Whatman N° 40	Filtración con papel Whatman N° 40	Filtración con papel Whatman N° 40
Resultados			
Modelo teórico de isoterma	Ninguno	Freundlich	Freundlich
Cantidad de CA (g/L)	50	40	60
Remoción DQO total	40%	73%	72%

Fuente: [Méndez R. et al.; 2002], [Eljaiek M. et al.; 2013] y [Saah F. et al.; 2015]

1.2. PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

¿El proceso de adsorción con carbón activado permitirá reducir la materia orgánica presente en lixiviados de relleno sanitario?

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

De las investigaciones líneas arriba desarrolladas, se verifica que el proceso de adsorción con carbón activado es adecuado para la remoción de materia orgánica en términos de DQO total empleando como afluente lixiviados de relleno sanitario ya que se obtuvieron remociones importantes; sin embargo, la cantidad de carbón activo y el tiempo de contacto no estarían completamente definidos al no haberse evaluado la influencia de ambas variables en las pruebas de agitación realizadas.

Es por ello que, esta investigación se orienta a estudiar la reducción de la materia orgánica presente en los lixiviados de relleno sanitario mediante el proceso de adsorción, evaluando la influencia de la cantidad de carbón activado y el tiempo de contacto sobre el desarrollo del proceso.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Reducir la materia orgánica presente en lixiviados de relleno sanitario mediante el proceso de adsorción con carbón activado.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Evaluar los principales indicadores de contaminación de los lixiviados provenientes del relleno sanitario.
- ✓ Seleccionar el tipo de carbón activado a emplear.
- ✓ Evaluar la influencia de la cantidad del carbón activado sobre la reducción de materia orgánica.
- ✓ Evaluar la influencia del tiempo de contacto sobre la reducción de materia orgánica.
- ✓ Evaluar la remoción de DQO total mediante el proceso de adsorción.

1.5. HIPÓTESIS

Con el proceso de adsorción con carbón activado para el tratamiento de lixiviados de relleno sanitario, se espera alcanzar una reducción de materia orgánica del 40% en términos de DQO total.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y LEGAL

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO

2.1.1.1. DEFINICIÓN

Según el MINAM – Perú (2011), el lixiviado o percolado es el líquido producido fundamentalmente por la precipitación pluvial que se infiltra a través del material de cobertura de un relleno sanitario y atraviesa las capas de basura, transportando concentraciones apreciables de materia orgánica en descomposición y otros contaminantes. De forma similar, para Giraldo E. (2001), el lixiviado se define como el agua que ha entrado en contacto con la basura y ha quedado altamente contaminada ya que ha recogido gran cantidad de las sustancias que originalmente estaban dentro de los residuos.

Por otro lado, Méndez R. et al. (2002) refieren que los lixiviados son emisiones líquidas producto de la descomposición de los residuos sólidos; mientras que Wiszniowski J. et al. (2006) sostienen que el lixiviado no sólo es el agua de lluvia que atraviesa el relleno sanitario, sino también el líquido generado internamente debido a la degradación de los desechos dispuestos.

Los lixiviados de relleno sanitario constituyen una fuente potencial de contaminación, cuyo derrame, según la OPS et al. (2010), contamina el suelo, aguas subterráneas y superficiales, dañando a la agricultura y afectando la flora y la fauna, significando incluso la pérdida del agua como recurso para el consumo humano o recreativo.

2.1.1.2. GENERACIÓN DE LOS LIXIVIADOS

Todo líquido que ingresa a una celda de disposición final de residuos sólidos, que está contenido en ellos o que es producido internamente, es partícipe de la generación de lixiviados. Mientras los líquidos fluyen a través de los estratos de basura, suceden mecanismos de transferencia de sólido a líquido, siendo los principales: arrastre de material particulado, disolución de sales

solubles y estabilización de la materia orgánica en formas solubles y gaseosas. [Lutfi M. et al.; 2003]

Según el MINAM – Perú (2011), la cantidad de lixiviado generado en un relleno sanitario puede estimarse mediante un balance de masas hidráulico, el cual se basa en el recuento de todos los líquidos que ingresan, salen y se retienen en la infraestructura de disposición final. Entre los líquidos que ingresan, los más importantes son la precipitación pluvial y la humedad propia de los desechos a disponer, mientras que el lixiviado constituye el principal líquido que sale de la infraestructura. Los componentes que intervienen en el balance hidráulico, es decir en la producción de los lixiviados en un relleno sanitario son los siguientes:

- ✓ Precipitación pluvial en la zona.
- ✓ Escorrentía superficial y/o infiltración subterránea.
- ✓ Evapotranspiración.
- ✓ Humedad de los residuos sólidos.
- ✓ Capacidad de campo (capacidad de retención de humedad).

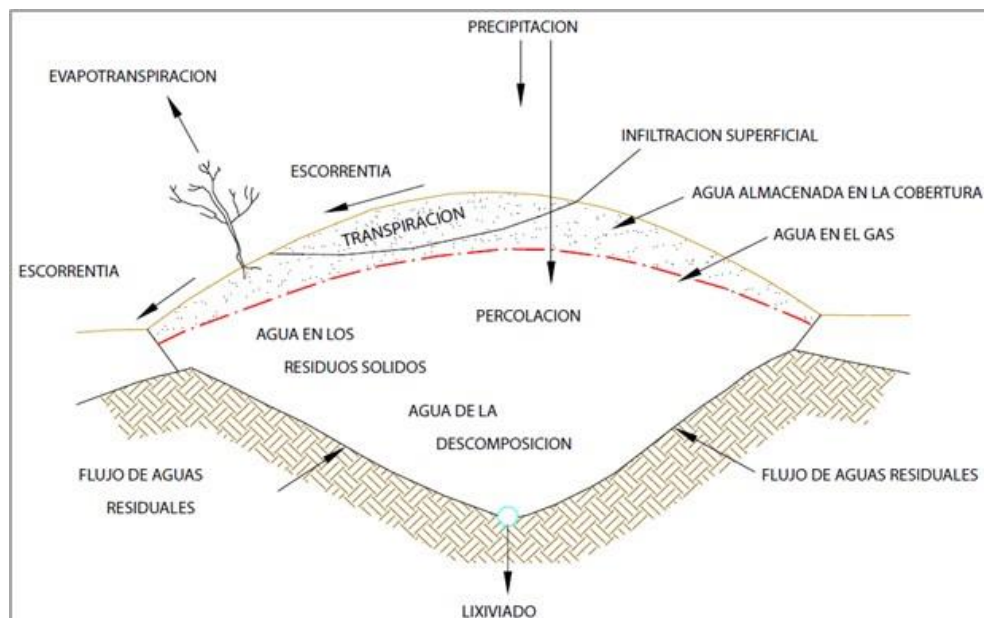


Figura 1: Componentes de un balance hidráulico en un relleno sanitario

Fuente: [Guía MINAM; 2011]

Autores como MINAM – Perú (2011) y Corena M. et al. (2008), coinciden en que son 4 los métodos más usados para la estimación de la cantidad de lixiviados generados en un relleno sanitario, los cuales son:

- ✓ Método de balance hidráulico propio.
- ✓ Método del software HELP.
- ✓ Método Suizo.
- ✓ Método del contenido de humedad.

2.1.1.3. COMPOSICIÓN DE LOS LIXIVIADOS

En general, los lixiviados se caracterizan por su alto contenido de materia orgánica (biodegradable y no biodegradable), presencia de sales orgánicas e inorgánicas, nitrógeno, metales pesados y otras sustancias químicas diluidas. Su composición es muy variada y depende principalmente de la edad del relleno sanitario, del tipo de residuos que se dispongan y de las características de la infraestructura de disposición final que se emplee.

El autor Bagchi A. (2004) propone una composición típica promedio para los lixiviados con el objeto de manejar rangos de valores de referencia, los que se presentan a continuación:

Tabla 2: Rango de composición típica de los lixiviados de rellenos sanitarios

Parámetro	Intervalo (mg/L)	Parámetro	Intervalo (mg/L)
pH	3.7 – 8.9	K	ND – 3,200
Turbiedad	40 – 500 UTN	Mg	4 – 780
Alcalinidad total	ND – 15,050	Mn	ND – 400
Dureza	0.1 – 225,000	Al	ND – 85
Conductancia específica	480 – 72,500 $\mu\Omega/cm$	Zn	ND – 731
DBO ₅	6.6 – 99,000	B	0.87 – 13.00
DQO	10.0 – 195,000	Ba	ND – 12.50
COT	ND – 40,000	Ni	ND – 7.50
Cloruros	2.0 – 11,375	Pb	ND – 14.20
Sulfatos	ND – 1,850	Cr	ND – 9.00
Nitrógeno total	2.0 – 3,320	Sb	ND – 3.19
Nitrógeno amoniacal	ND – 1,200	Cu	ND – 9.00

Nitrógeno de nitratos	ND – 250	Tl	ND – 0.78
Nitrógeno de nitritos	ND – 1.46	As	ND – 70.20
Fósforo total	ND – 234	Mo	0.01 – 1.43
Cianuro	ND – 6	Sn	ND – 0.16
SDT	584 – 55,000	Se	ND – 1.85
SST	2 – 140,900	Cd	ND – 0.40
Ca	3 – 2,500	Ag	ND – 1.96
Na	12 – 6,010	Be	ND – 0.36
Fe	ND – 4,000	Hg	ND – 3.00

Fuente: [Bagchi A.; 2004]

Por otro lado, Giraldo E. (2001) manifiesta que un lixiviado joven es más contaminante que uno viejo y presenta una comparación cualitativa de la composición entre ambos:

Tabla 3: Comparación de las características típicas de los lixiviados de rellenos sanitarios

Característica	Lixiviado Joven	Lixiviado Viejo
DBO	Muy alto	Bajo
DQO	Muy alto	Alto
Amoniaco	Muy alto	Alto
pH	Muy bajo	Bajo
Detergentes	Muy altos	Bajos
Sales disueltas	Muy altas	Bajas
Fe, Ca, Mg	Muy altos	Bajos
Metales pesados	Muy altos	Bajos

Fuente: [Giraldo E.; 2001]

La clasificación más común para los lixiviados de relleno sanitario se basa en la edad del mismo, con lo que su composición varía ampliamente. Renou S. (2007) y Lutfi M. et al. (2003) presentan composiciones similares para una clasificación típica promedio de los parámetros más importantes, pudiéndose resumir en:

Tabla 4: Clasificación de los lixiviados de rellenos sanitarios según su edad

Característica	Jóvenes	Intermedios	Viejos
Edad (años)	< 2	2 – 10	> 10
pH	6.5	6.5 – 7.5	> 7.5
DQO (mg/L)	> 10,000	500 – 10,000	< 500
DBO/DQO	> 0.3	0.1 – 0.3	< 0.1
Biodegradabilidad	Importante	Media	Baja

Fuente: Adaptado de [Renou S.; 2007] y [Lutfi M. et al.; 2003]

2.1.1.4. TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS

La composición tan variable que presentan los lixiviados hace que la selección de la tecnología de tratamiento no sea una tarea fácil. Un lixiviado maduro requerirá un sistema de tratamiento distinto al de uno joven, y el hecho de contar con una mezcla de lixiviados de distintas edades debido a la normal operación de un relleno sanitario, hace necesario evaluar constantemente las características del lixiviado y las posibles tecnologías de tratamiento a emplear. [Lutfi M. et al.; 2003]

Renou S. (2007) considera que el tratamiento más apropiado deberá ser simple y adaptado particularmente al lixiviado que se desee tratar, teniendo en cuenta las ventajas y desventajas que cada tecnología ofrece, siendo comúnmente necesario la combinación o secuencia de varios tipos de éstas. Por otro lado, Bodalo A. et al. (2007) sostienen que cuando los lixiviados presentan índices de biodegradabilidad altos (lixiviados jóvenes), los procesos biológicos son los más efectivos, mientras que cuando el índice baja (lixiviados intermedios y viejos), es adecuado emplear los fisicoquímicos como proceso principal para la depuración del material refractario que predomina.

Entre los tratamientos convencionales más importantes que se han estudiado para lixiviados de rellenos, se tienen los siguientes:

Tabla 5: Tratamientos convencionales de lixiviados de rellenos sanitarios

Tipo	Tratamiento
Biológicos	a) Lodos activados. b) Reactor secuencial discontinuo (SBR). c) Lagunas de estabilización. d) Reactor anaerobio de flujo ascendente y manto de lodos (UASB).
Fisicoquímicos	a) Sedimentación – flotación. b) Coagulación – floculación. c) Precipitación química. d) Evaporación. e) Adsorción. f) Oxidación química.
Transferencia	a) Recirculación. b) Combinación con aguas residuales.

Fuente: Adaptado de [Renou S.; 2007] y [Bodalo A. et al.; 2007]

A. TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS POR ADSORCIÓN

Tratamiento aplicado para lixiviados con material no biodegradable principalmente, que se encuentra en forma coloidal o soluble. Se ponen en contacto los lixiviados con adsorbentes de gran superficie específica, generalmente carbón activado.

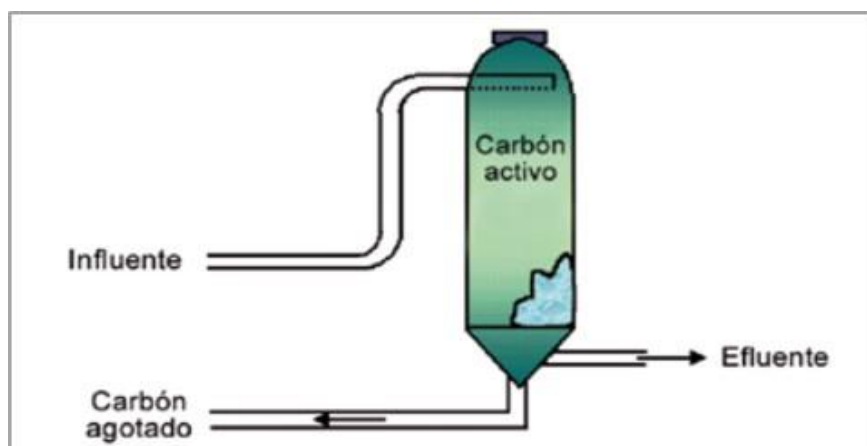


Figura 2: Esquema del tratamiento de lixiviados mediante adsorción con una columna empacada con carbón activado

Fuente: [Bodalo A. et al.; 2007]

El atractivo primordial del tratamiento de lixiviados por adsorción radica en que permite remoción importante de materia orgánica, habiéndose estudiado esta alternativa empleando reactores tipo

batch y columnas empacadas. Méndez R. et al. (2002) verificaron una remoción de 40% de DQO en reactores batch con 50 g/L de carbón activado (CA) y 65% en una columna empacada con 640 g de CA; mientras que Eljaiek M. et al. (2013) obtuvieron una remoción de 73% de DQO para reactores batch con 40 g/L de CA y 92% para una columna con 1,100 g de CA; por otro lado, Saah F. et al. (2015) verificaron una remoción de 72% de DQO en reactores batch para 60 g/L de CA.

La principal desventaja del tratamiento mediante adsorción es el alto consumo de carbón activo en reactores o la equivalente necesidad de su frecuente regeneración en las columnas. [Renou S.; 2007]

B. FILTRACIÓN EN LA ADSORCIÓN DE LIXIVIADOS

Si bien es cierto que la filtración por sí misma no ha sido estudiada a detalle para el tratamiento de lixiviados, ésta se encuentra inmersa en el planteamiento de la alternativa de adsorción, pues en las columnas empacadas se generará la filtración de material particulado que llegase a ingresar a la unidad; de forma similar el planteamiento de reactores de contacto estipula que se requiere de una filtración para poder separar el carbón activo del efluente, sobre todo cuando se emplea carbón en polvo [Metcalf & Eddy; 2003].

2.1.2. ADSORCIÓN

2.1.2.1. DEFINICIÓN Y TIPOS DE ADSORCIÓN

Según Metcalf & Eddy (2003), “el proceso de adsorción consiste, en términos generales, en la captación de sustancias solubles presentes en la interfase de una solución.” Peláez A. (2013) complementa esta idea manifestando que la adsorción es el fenómeno por el cual moléculas, átomos o iones son acumulados, atrapados o retenidos en una superficie; siendo el adsorbato la sustancia que se adsorbe y el adsorbente el material sobre el cual lo hace; el proceso inverso se denomina desorción. En la adsorción, un

sólido o un líquido retiene en su superficie gases, líquidos o cuerpos disueltos. Mientras que la absorción es un fenómeno de volumen, en el que ocurre penetración de una sustancia en otra, la adsorción es un fenómeno de superficie que se sitúa entre dos sustancias. [Bolívar G.; 2010]

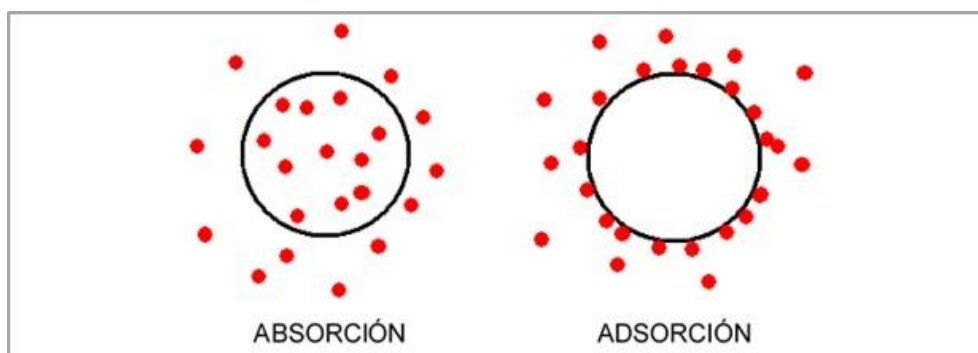


Figura 3: Diferencia entre absorción y adsorción

Fuente: [Bolívar G.; 2010]

Peláez A. (2013) sostiene que, debido a las fuerzas de interacción entre el adsorbato y el adsorbente, se cuenta con 2 tipos fundamentales de adsorción: física y química. En la adsorción física o también denominada fisisorción, las fuerzas de Van der Waals son las responsables del fenómeno de adsorción; es una interacción multicapa simple de largo alcance pero débil, en la que el adsorbente no altera su estructura molecular, siendo posible desarrollarse la desorción. En la adsorción química o también llamada quimisorción, los enlaces químicos covalentes son los que unen al adsorbato a la superficie del adsorbente; es una interacción monocapa de corto alcance pero fuerte, en la que la estructura molecular del adsorbente es modificada, siendo casi imposible dar lugar a la desorción.

2.1.2.2. FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE ADSORCIÓN

Benavides L. et al. (2004) sintetizan los factores que afectan los procesos de adsorción en general, los cuales se presentan a continuación:

- ✓ **Sistema adsorbente – adsorbato:** a) Superficie específica y porosidad (tamaño, estructura, distribución de poros) del adsorbente, b) tamaño de partícula del adsorbato, c) Afinidad respecto del adsorbato, que depende de los grupos funcionales

existentes en la superficie del adsorbente, d) presión parcial o concentración del adsorbato en la fase fluida, e) cantidad de adsorbente y f) tiempo de contacto.

- ✓ **Condiciones del medio:** a) El pH, que afecta al grado de ionización de los compuestos ácidos o básicos, siendo frecuente que el proceso de adsorción se facilite a un pH bajo y b) La temperatura, que influye sobre la velocidad del proceso y el estado final de equilibrio.

2.1.2.3. ANÁLISIS DEL PROCESO DE ADSORCIÓN

Metcalf & Eddy (2014) sostienen que la adsorción se desarrolla en 3 etapas: macrotransporte, microtransporte y sorción, las que para un adsorbato disuelto en un líquido y adsorbente sólido se desarrollan como sigue:

- ✓ **Macrotransporte:** Corresponde al movimiento del adsorbato a través del líquido donde se encuentra disuelto hasta alcanzar la interfase líquido sólido con el adsorbente.
- ✓ **Microtransporte:** Corresponde a la difusión del adsorbato a través de los macroporos y mesoporos del adsorbente hasta alcanzar los microporos y submicroporos.
- ✓ **Sorción:** Corresponde a la adherencia del adsorbato en la superficie de los microporos y submicroporos del adsorbente.

Cabe mencionar que la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) clasifica a los poros según su tamaño, como sigue: macroporos (>50nm), mesoporos (2–5nm) y microporos (<2nm).

El proceso de adsorción alcanza el equilibrio una vez que las tasas de sorción y desorción se igualan, lo que ocurre cuando se agota la capacidad de adsorción del adsorbente, esta capacidad teórica puede calcularse determinando su isoterma de adsorción. En general, la isoterma de adsorción es la función en la que la cantidad de adsorbato que puede retener

un adsorbente depende de la concentración del soluto a una temperatura constante. [Metcalf & Eddy; 2014]

Autores como Metcalf & Eddy (2014) y Weber W. (2003) describen las 2 fórmulas de isoterma de adsorción más comunes: Freundlich y Langmuir, siendo la isoterma de Freundlich la que mejor suele ajustarse al proceso de adsorción para el tratamiento de aguas residuales y según los antecedentes evaluados, sucedería algo similar para el caso de lixiviados de relleno sanitario.

A. ISOTERMA DE FREUNDLICH

Modelo desarrollado por Erwin Finlay Freundlich en 1909, cuya ecuación derivada a partir de consideraciones empíricas es la siguiente:

$$\frac{x}{m} = kC_e^{1/n}$$

Ecuación lineal:

$$\log\left(\frac{x}{m}\right) = \frac{1}{n}\log C_e + \log k$$

Donde:

x/m : Cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente (g/g)

C_e : Concentración de equilibrio del adsorbato en solución después de la adsorción (mg/L)

k, n : Constantes empíricas

B. ISOTERMA DE LANGMUIR

Modelo determinado por Irving Langmuir en 1916, cuya ecuación obtenida a partir de consideraciones teóricas es la siguiente:

$$\frac{x}{m} = \frac{abC_e}{1 + bC_e}$$

Ecuación lineal:

$$\frac{1}{(x/m)} = \frac{1}{ab}\left(\frac{1}{C_e}\right) + \frac{1}{a}$$

Donde:

x/m : Cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente (g/g)

C_e : Concentración de equilibrio del adsorbato en solución después de la adsorción (mg/L)

a, b : Constantes empíricas

2.1.2.4. MATERIALES ADSORBENTES

En cuanto a los materiales sólidos más empleados como adsorbentes, se tienen a los naturales (alúmina, zeolita) e industriales (gel de sílice, biopolímeros, carbón activado), los que se caracterizan por su alta porosidad y gran área superficial. De éstos, son los adsorbentes industriales, sobre todo los carbones activados, los que presentan propiedades superiores a las de los adsorbentes naturales. [Benavides L. et al.; 2004]

2.1.2.5. EL CARBÓN ACTIVADO

Si bien es cierto que todo material carbonizado presenta propiedades adsorbentes, un proceso de activación de éste incrementa significativamente sus bondades como material adsorbente. [Franceschi M. et al.; 2015] El carbón activado es un material de estructura carbonosa que presenta una superficie específica excepcionalmente alta y elevada porosidad, lo que sumado a la naturaleza química de su superficie lo convierten en un excelente adsorbente. [Peláez A.; 2013]

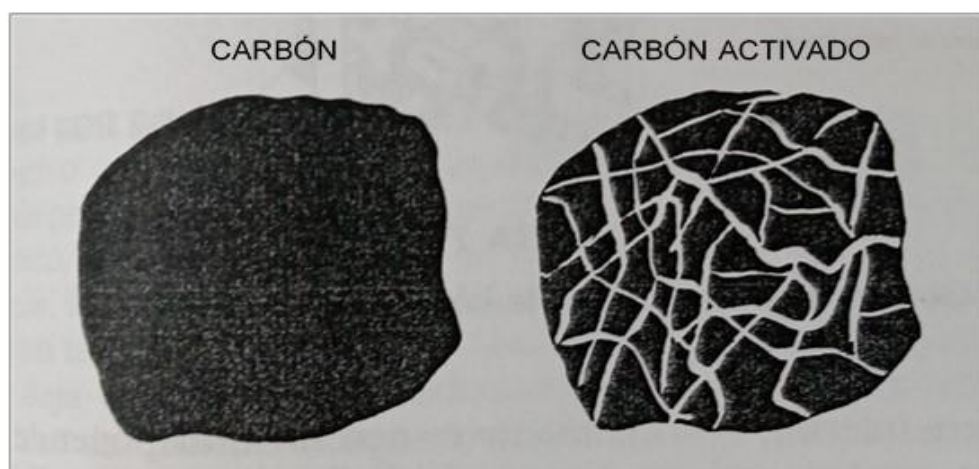


Figura 4: Partículas de carbón y carbón activado

Fuente: [Metcalf & Eddy; 2003]

El carbón activado posee en promedio una porosidad interna de 80% y un área superficial entre 700 y 1,800 m²/g, con un diámetro de poro entre 1 y 6 nm, abarcando principalmente microporos y mesoporos. Estas características físicas del carbón activado y las propiedades químicas (grupos funcionales) de su superficie dependen de la materia prima que se emplee y del tipo de activación a la que ésta sea sometida. [Peláez A.; 2013]

Pilamonta J. (2013) divide en 2 grupos a la materia prima que se emplea para la fabricación de carbón activado, las que pueden ser de origen vegetal o mineral. En el primer grupo se tiene a la madera, residuos de madera, cáscara de coco, cáscara de nuez, bagazo, huesos de frutas, etc.; y en el segundo a la antracita, hulla bituminosa, lignito, turba, coque, etc.

El proceso de fabricación del carbón activo puede realizarse mediante una activación física o una activación química, por medio de las cuales se forman los microporos y se desarrollan las propiedades de adsorción. [Cecen F. et al. 2011]

- ✓ **Activación física o térmica:** inicia con la carbonización de la materia prima, secándola y calentándola para expulsar los hidrocarburos, tiene lugar a una temperatura entre los 400 y 600 °C en condiciones de déficit de oxígeno para evitar favorecer la combustión; posteriormente, se somete el material carbonizado a una gasificación con vapor de agua a 800°C o dióxido de carbono a temperaturas aún más altas.
- ✓ **Activación química:** es generada por reacciones de deshidratación química a temperaturas moderadas, se impregna la materia prima con un agente químico como el ácido fosfórico, hidróxido de potasio o cloruro de zinc, y se calienta a una temperatura entre 500 y 700 °C, siendo necesario recuperar el agente químico empleado mediante un lavado posterior.

Ambos mecanismos de fabricación del carbón activado requieren de un pre tratamiento de molienda y tamizado de la materia prima, lo que permite homogenizar el precursor para el mejor desarrollo del proceso de activación.

[Quintana D. et al.; 2010] De igual manera, un proceso de molienda, selección y tamizado posterior es aplicado, dando lugar a la clasificación del carbón activo producido según el tamaño de partícula, los cuales son el carbón activado granular con diámetro superior a 0.10mm y el carbón activado en polvo con diámetro menor al tamiz 200 (0.075mm). [Metcalf & Eddy; 2014]

Tabla 6: Características del carbón activado granular y en polvo

Parámetro	Und	Carbón activado	
		Granular (CAG)	Polvo (CAP)
Superficie total	m ² /g	700 – 1,300	800 – 1,800
Densidad aparente	g/cm ³	400 – 500	360 – 740
Tamaño de partícula	µm	100 – 2,400	5 – 50

Fuente: [Metcalf & Eddy; 2014]

Metcalf & Eddy (2003) describe la aplicación del carbón activado granular y en polvo en el tratamiento de aguas residuales, lo que permite trasladar la concepción de su uso para la depuración de lixiviados de rellenos sanitarios:

A. CARBÓN ACTIVADO GRANULAR (CAG)

Se suelen emplear columnas de lecho fijo individualmente o conectadas en serie o paralelo con flujo descendente, también se emplean columnas de lecho expandido y lecho móvil; en el sistema de lecho expandido, el flujo del agua residual es ascendente; mientras que en el sistema de lecho móvil el carbón que ya ha sido utilizado se va reemplazando por carbón nuevo de forma continua.

El CAG se regenera mediante la oxidación de la materia orgánica adherida y su posterior eliminación en un horno, entre un 5 y 10% de carbón es destruido en el proceso de regeneración y es necesario reemplazarlo por carbón nuevo. El CAG regenerado pierde parte de su capacidad de adsorción.

B. CARBÓN ACTIVADO EN POLVO (CAP)

El carbón activado en polvo suele emplearse añadiéndolo luego de un tratamiento biológico, directamente en las unidades de tratamiento o constituyendo un proceso fisicoquímico de tratamiento por sí mismo. El carbón activado en polvo se adiciona en un tanque de contacto, y una vez transcurrido el tiempo establecido, se deja sedimentar el carbón en el fondo y se extrae el agua tratada. Ya que el carbón activado en polvo es muy fino, suele emplearse un coagulante o un medio filtrante para su completa separación del agua tratada.

La regeneración del CAP aún no está definida, lo que constituye la principal desventaja de su uso; sin embargo, puede obviarse su regeneración si se emplean residuos sólidos recuperados de la zona como materia prima.

2.1.3. RELLENO SANITARIO DE CAJAMARCA

La información plasmada en el presente apartado corresponde a la establecida en documentos técnico referidos al relleno sanitario de Cajamarca, como son la Memoria Descriptiva (MD) del expediente de obra elaborado en el año 2008, el Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos (ECRS) del 2014, y el Expediente de Operación y Mantenimiento Modificado (EOMM) del Subsistema de Disposición Final Segura de Residuos Sólidos Municipales y Biomédicos del 2019, información brindada por la Municipalidad Provincial de Cajamarca (MPC) que ha sido complementada y actualizada con datos manifestados por el personal de gestión y operaciones del relleno sanitario, así como también verificada durante las visitas realizadas a sus instalaciones.

2.1.3.1. GENERALIDADES

El relleno sanitario de Cajamarca, también denominado Planta de Tratamiento y Disposición Final de Residuos Sólidos del Ámbito Municipal y No Municipal, fue construido en el año 2009, es del tipo mecanizado

(>50ton/día) e inició operaciones en el año 2010, bajo la administración de la Gerencia de Desarrollo Ambiental de la Municipalidad Provincial de Cajamarca, a través de la Sub Gerencia de Limpieza Pública y Ornato Ambiental.

El área total destinada al relleno sanitario de Cajamarca asciende a 50 Ha aproximadamente, ubicado en el sector Palturo, distrito de Jesús, provincia y región Cajamarca, en las coordenadas UTM WGS84: 788250E, 9201500S. El acceso desde el centro de la ciudad, se realiza mediante la carretera Cajamarca – Namora, hasta el kilómetro 13+800, desde donde se continúa en dirección Este a través de la trocha carrozable que se dirige hacia los sectores Palturo y Canay dentro del distrito de Jesús.



Figura 5: Ubicación del relleno sanitario de Cajamarca

Fuente: Google Earth.

El relleno sanitario de Cajamarca se encuentra a una altitud de 2,810 a 2,910 msnm; donde el clima característico de esta zona es templado seco, soleado en el día y frío en las noches, con temperatura máxima de 22°C y mínima de 3°C; la precipitación pluvial anual es 720 mm (Estación Meteorológica Weberbauer), siendo los meses de mayor precipitación de octubre a mayo.

Existen cuerpos de agua dentro del relleno sanitario de Cajamarca y en sus alrededores, por lo que se requiere un adecuado manejo de los lixiviados generados.

2.1.3.2. INSTALACIONES

Las instalaciones del relleno sanitario de Cajamarca se distribuyen de la siguiente manera: 1) Infraestructura para la disposición final de residuos sólidos municipales, 2) Infraestructura para la disposición final de residuos sólidos no municipales, 3) Infraestructura para el reciclaje de materiales inorgánicos y procesamiento de residuos orgánicos, y 4) Otras instalaciones.



Figura 6: Instalaciones en el relleno sanitario de Cajamarca

Fuente: Google Earth.

La infraestructura para la disposición final de residuos sólidos municipales está destinada a la disposición final de residuos sólidos domésticos, comerciales e industriales que sean asimilables a domésticos. Actualmente, cuenta con 02 celdas de aproximadamente 4.00 Ha en total con 35.00 m de altura de diseño y 07 pozas de lixiviados. Las celdas se encuentran debidamente impermeabilizadas con geomembrana y geotextil, se cuenta con drenaje para lixiviados en el fondo de las celdas y drenaje vertical para gases, las pozas de lixiviados se encuentran impermeabilizadas con geomembrana en la base y taludes, en ellas se almacenan los lixiviados generados para luego ser recirculados a las celdas.

2.1.3.3. OPERACIONES

Las principales actividades desarrolladas para la disposición final de residuos sólidos municipales, son las siguientes:

- ✓ Registro, pesaje y control.
- ✓ Descarga, esparcimiento y compactación.
- ✓ Cubierta diaria.
- ✓ Sellado final.
- ✓ Recirculación de lixiviados.



Figura 7: Celda de disposición final de residuos sólidos municipales y poza de lixiviados en el relleno sanitario de Cajamarca

2.1.3.4. RESIDUOS SÓLIDOS DISPUESTOS

Según MPC – ECRS (2014), la Generación Per Cápita (GPC) domiciliaria alcanza los 0.55 kilogramos por habitante por día en la ciudad de Cajamarca, lo que implica que se generaban 109.19 toneladas de Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD) diariamente; mientras que los Residuos Sólidos No Domiciliarios (RSND) generados eran 90.19 toneladas diarias. Por lo tanto, la generación de Residuos Sólidos Municipales (RSM) por día ascendía a 199.38 toneladas, siendo el 54.80% RSD y el 45.20% RSND.

En cuanto a la composición de los RSD, se tiene que el 55.31% (60.39ton/día) corresponde a residuos orgánicos, el 8.94% (9.76ton/día) corresponde a los residuos inorgánicos recuperables, y el 35.75% (39.04ton/día) a residuos no aprovechables. Además, el contenido de

humedad de los residuos sólidos orgánicos generados en la ciudad de Cajamarca es 83.99%.

Por otro lado, MPC – EOMM (2019) indica que se estima que la generación de RSM para la ciudad de Cajamarca al 2019 asciende a 209.16 toneladas diarias, siendo el 51.78% (108.31ton/día) RSD y el 48.22% (100.85ton/día) RSND, así mismo indica que se estima un total de 58,059 viviendas en la zona urbana. Sin embargo, la cobertura del servicio se encontraría por debajo del 70%, considerando el registro de 142.26ton/día de RSM ingresados al relleno sanitario en el año 2018.

Desde el inicio de operaciones en el año 2010 hasta el año 2018, se han dispuesto un total de 427,181.40 toneladas de RSM y 19,856.00 toneladas de RSNM en el relleno sanitario de Cajamarca, tal como se muestra a continuación:

Tabla 7: Residuos ingresados al relleno sanitario de Cajamarca 2010 – 2018

Año		RS Municipales		RS No Municipales	
		(ton/día)	(ton/año)	(ton/día)	(ton/año)
1	2010	96.00	35,040.00	5.00	1,825.00
2	2011	119.00	43,435.00	6.00	2,190.00
3	2012	128.00	45,720.00	7.00	2,555.00
4	2013	131.00	47,815.00	0.50	182.50
5	2014	135.00	49,275.00	0.50	182.50
6	2015	145.00	52,925.00	0.50	182.50
7	2016	132.80	48,472.00	0.60	219.00
8	2017	141.30	51,574.50	14.80	5,402.00
9	2018	142.26	51,924.90	19.50	7,117.50
Total (2010–2018)			427,181.40		19,856.00

Fuente: [MPC – EOMM; 2019]

2.1.3.5. LIXIVIADOS GENERADOS

Los lixiviados generados en la infraestructura de disposición final de residuos sólidos municipales del relleno sanitario de Cajamarca, no cuentan con un equipo o estructura de medición de su producción, éstos son

dispuestos de forma directa en las pozas de almacenamiento adyacentes a las celdas de operación, desde donde son transportados en 2 modalidades según la época del año. Durante la época de precipitaciones leves en la zona, los lixiviados son bombeados desde las pozas hacia la superficie de las plataformas de residuos, siendo la recirculación y evaporación natural sin control de emisiones de los procesos que se emplean para el manejo de los lixiviados. Durante la época lluviosa, los lixiviados son conducidos a pozas adicionales implementadas para contener el volumen de lixiviados al no ser posible recircularlos ni evaporarlos naturalmente, pues los residuos contenidos en las celdas se encuentran saturados por las intensas precipitaciones de la zona.

En cuanto a la composición de los lixiviados generados, no existen monitoreos de control que se hayan realizado por parte de la MPC y el personal manifiesta que en cuanto a las características de color y olor son variables; sin embargo, por intermedio de la empresa AQUA & FIRE S.A.C. se contrataron los servicios de AGQ PERÚ S.A.C. para analizar los principales parámetros de contaminación presentes en los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca en el año 2017 (CAPÍTULO IX - ANEXO B), los que se presentan a continuación:

Tabla 8: Composición de los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca en Marzo 2017

Parámetro	Medida	Parámetro	Medida
Color	> 100 CU	STD	8,010 mg/L
DBO ₅	231 mg/L	SST	146 mg/L
DQO	2,162 mg/L	Turbidez	214 NTU

Fuente: [AGQ PERÚ S.A.C.; 2017]

2.2. MARCO LEGAL

La presente investigación se enmarca dentro de la siguiente legislación emitida por el Gobierno Peruano; asimismo, se presenta legislación internacional de referencia:

2.2.1. LEGISLACIÓN NACIONAL

2.2.1.1. LEY N° 29338

LEY DE RECURSOS HÍDRICOS

Artículo 76.- Vigilancia y fiscalización del agua

La Autoridad Nacional en coordinación con el Consejo de Cuenca, en el lugar y el estado físico en que se encuentre el agua, sea en sus cauces naturales o artificiales, controla, supervisa, fiscaliza el cumplimiento de las normas de calidad ambiental del agua sobre la base de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-Agua) y las disposiciones y programas para su implementación establecidos por autoridad del ambiente. También establece medidas para prevenir, controlar y remediar la contaminación del agua y los bienes asociados a esta. Asimismo, implementa actividades de vigilancia y monitoreo, sobre todo en las cuencas donde existan actividades que pongan en riesgo la calidad o cantidad del recurso.

Artículo 79.- Vertimiento de agua residual

La Autoridad Nacional del Agua autoriza el vertimiento del agua residual tratada a un cuerpo natural de agua continental o marítima sobre la base del cumplimiento de los ECA-Agua y los LMP.

Queda prohibido el vertimiento directo o indirecto de agua residual sin dicha autorización.

En caso de que el vertimiento del agua residual tratada pueda afectar la calidad del cuerpo receptor, la vida acuática asociada a este o sus bienes asociados, según los estándares de calidad establecidos o estudios específicos realizados y sustentados científicamente, la Autoridad Nacional del Agua debe disponer las medidas adicionales que hagan desaparecer o disminuyan el riesgo de la calidad del agua, que puedan incluir tecnologías superiores,

pudiendo inclusive suspender las autorizaciones que se hubieran otorgado al efecto. En caso de que el vertimiento afecte la salud o modo de vida de la población local, la Autoridad Nacional del Agua suspende inmediatamente las autorizaciones otorgadas.

Artículo 80.- Autorización de vertimiento

Todo vertimiento de agua residual en una fuente natural de agua requiere de autorización de vertimiento, para cuyo efecto debe presentar el instrumento ambiental pertinente aprobado por la autoridad ambiental respectiva, el cual debe contemplar los siguientes aspectos respecto de las emisiones:

1. Someter los residuos a los necesarios tratamientos previos.
2. Comprobar que las condiciones del receptor permitan los procesos naturales de purificación.

2.2.1.2. D.S. N° 003-2010-MINAM

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LOS EFLUENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS O MUNICIPALES

Artículo 2.- Definiciones

- Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR): Infraestructura y procesos que permiten la depuración de las aguas residuales Domésticas o Municipales.
- Límite Máximo Permisible (LMP): Es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente.

Tabla 9: Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de PTAR

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	10 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	Unidad	6.5 – 8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	< 35

2.2.1.3. D.S. N° 004-2017-MINAM**ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA AGUA****Artículo 3.- Categorías de los ECA para Agua**

Para la aplicación de los ECA para Agua se debe considerar las siguientes precisiones sobre sus categorías:

3.3 Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales**a) Subcategoría D1: Riego de vegetales**

Entiéndase como aquellas aguas utilizadas para el riego de los cultivos vegetales, las cuales, dependiendo de factores como el tipo de riego empleado en los cultivos, la clase de consumo utilizado (crudo o cocido) y los posibles procesos industriales o de transformación a los que puedan ser sometidos los productos agrícolas:

- Agua para riego no restringido.
- Agua para riego restringido.

b) Subcategoría D2: Bebida de animales

Entiéndase como aquellas aguas utilizadas para bebida de animales mayores como ganado vacuno, equino o camélido, y

para animales menores como ganado porcino, ovino, caprino, cuyes, aves y conejos.

Tabla 10: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua – Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
FISICO – QUIMICOS				
Aceites y grasas	mg/L	5		10
Bicarbonatos	mg/L	518		**
Cianuro Wad	mg/L	0.1		0.1
Cloruros	mg/L	500		**
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	100 (a)		100 (a)
Conductividad	μS/cm	2 500		5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	15		15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40		40
Detergentes (SAAM)	mg/L	0.2		0.5
Fenoles	mg/L	0.002		0.01
Fluoruros	mg/L	1		**
Nitratos (NO ₃ ⁻ -N) + Nitritos (NO ₂ ⁻ -N)	mg/L	100		100
Nitritos (NO ₂ ⁻ -N)	mg/L	10		10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4		≥ 5
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6.5 – 8.5		6.5 – 8.4
Sulfatos	mg/L	1 000		1 000
Temperatura	°C	Δ3		Δ3
INORGANICOS				
Aluminio	mg/L	5		5
Arsénico	mg/L	0.1		0.2
Bario	mg/L	0.7		**
Berilio	mg/L	0.1		0.1
Boro	mg/L	1		5
Cadmio	mg/L	0.01		0.05
Cobre	mg/L	0.2		0.5
Cobalto	mg/L	0.05		1
Cromo Total	mg/L	0.1		1
Hierro	mg/L	5		**
Litio	mg/L	2.5		2.5
Magnesio	mg/L	**		250
Manganeso	mg/L	0.2		0.2

Mercurio	mg/L	0.001	0.01	
Níquel	mg/L	0.2	1	
Plomo	mg/L	0.05	0.05	
Selenio	mg/L	0.02	0.05	
Zinc	mg/L	2	24	
ORGANICO				
<u>Bifenilos Policlorados</u>				
Bifenilos Policlorados (PCB)	µg/L	0.04	0.045	
PLAGUICIDAS				
Paratión	µg/L	35	35	
<u>Organoclorados</u>				
Aldrín	µg/L	0.004	0.7	
Clordano	µg/L	0.006	7	
Dicloro Difenil Tricloroetano (DDT)	µg/L	0.001	30	
Dieldrín	µg/L	0.5	0.5	
Endosulfán	µg/L	0.01	0.01	
Endrín	µg/L	0.004	0.2	
Heptacloro y Heptacloro Epóxido	µg/L	0.01	0.03	
Lindano	µg/L	4	4	
<u>Carbamato</u>				
Aldicarb	µg/L	1	11	
MICROBIOLOGICOS Y PARASITOLÓGICO				
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1 000	2 000	1 000
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	1 000	**	**
Huevos de Helminetos	Huevo/L	1	1	**

(a): Para aguas claras. Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural).

(b): Después de filtración simple.

(c): Para el riego de parques públicos, campos deportivos, áreas verdes y plantas ornamentales, sólo aplican los parámetros microbiológicos y parasitológicos del tipo de riego no restringido.

Δ3: significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

** : significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría.

2.2.1.4. D.S. N° 014-2017-MINAM**REGLAMENTO DEL D.L. N° 1278 “LEY DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS”****Artículo 112.- Plan de cierre de infraestructura de disposición final de residuos sólidos**

El plan de cierre de la infraestructura de disposición final de residuos sólidos que forma parte del IGA debe contar, como mínimo, con los siguientes aspectos:

- a) Diseño de cobertura final;
- b) Control de gases;
- c) Control, manejo y/o tratamiento de lixiviados;**
- d) Programa de monitoreo ambiental;
- e) Medidas de contingencia posterior al cierre;
- f) Proyecto de uso del área después de su cierre, en caso corresponda.

El plan de cierre debe contener actividades y acciones dirigidas a mitigar los posibles impactos ambientales de la infraestructura hasta por un periodo de diez (10) años después de su cierre definitivo, el mismo que debe ser establecido en el IGA y ser de cumplimiento obligatorio.

Artículo 114.- Instalaciones del relleno sanitario

Las instalaciones del relleno sanitario deben cumplir como mínimo con lo siguiente:

- b) Drenes de lixiviados con planta de tratamiento o sistema de recirculación interna de los mismos.

2.2.2. LEGISLACIÓN INTERNACIONAL DE REFERENCIA

2.2.2.1. REGLAMENTO DE LEY FEDERAL – 2020, AUSTRIA

LIMITACIÓN DE LAS DESCARGAS DE LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS

Párrafo 2

En el caso de la aprobación de la ley del agua para la descarga de lixiviados de los siguientes rellenos sanitarios en un río o en un sistema de alcantarillado público, se deben estipular los límites de emisión especificados en el Anexo A:

1. Rellenos sanitarios de residuos municipales mixtos (no tratados o tratados);
2. Rellenos sanitarios para lodos de depuración bioquímicamente estabilizados procedentes del tratamiento de aguas residuales;
3. Vertederos de compost;
4. Rellenos sanitarios para otros desechos no mencionados en los incisos anteriores, cuya proporción de carbono orgánico total (TOC) sea más del cinco por ciento en masa;
5. Rellenos sanitarios para mezclas de residuos mencionados en los incisos del 1 al 4.

Tabla 11: Límites de Emisiones de Lixiviados de Rellenos Sanitarios – Austria

Parámetro	Límites para descarga en un río	Límites para descarga en una red de alcantarillado
Parámetros generales		
1. Toxicidad		
1.1 Toxicidad de algas G_A	8	*
1.2 Toxicidad bacteriana G_L	4	*
1.3 Dafnia toxicidad G_D	4	*
1.4 Toxicidad para peces $G_{F,Ei}$	2	*
2. Sustancias filtrables	20 mg/L	100 mg/L
3. pH	6.5 – 8.5	6.5 – 9.5
Parámetros inorgánicos		
4. Arsénico	0.1 mg/L	0.1 mg/L

5. Plomo	0.5 mg/L	0.5 mg/L
6. Cadmio	0.1 mg/L	0.1 mg/L
7. Cromo	0.5 mg/L	0.5 mg/L
8. Cobre	0.5 mg/L	0.5 mg/L
9. Níquel	0.5 mg/L	0.5 mg/L
10. Mercurio	0.01 mg/L	0.01 mg/L
11. Zinc	0.5 mg/L	0.5 mg/L
12. Amonio	10 mg/L	200 mg/L
13. Amoniaco	0.5 mg/L	20 mg/L
14. Cloruro	Determ. por toxicidad	–
15. Nitrógeno total	50 mg/L	–
16. Nitrito	2.0 mg/L	10 mg/L
17. Sulfuro	0.5 mg/L	2.0 mg/L
Parámetros orgánicos		
18. Carbono orgánico total	20 mg/L	120 mg/L
19. Demanda Química de Oxígeno	50 mg/L	300 mg/L
20. Demanda Bioquímica de Oxígeno	10 mg/L	–
21. Halógenos AOX	0.5 mg/L	0.5 mg/L
22. Índice de hidrocarburos	5 mg/L	15 mg/L
23. Hidrocarburos aromáticos BTXE	0.1 mg/L	0.5 mg/L

* No debe perjudicar los procesos de degradación biológica en la planta de tratamiento de aguas residuales.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1. UBICACIÓN

La presente investigación fue desarrollada en un Módulo de la Zona 2 denominada "BIOFILM", dentro de las instalaciones del Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Sólidos Peligrosos CITRAR – UNI ubicado en la Av. Túpac Amaru S/N en el distrito del Rímac – Lima.



Figura 8: Ubicación de la investigación

Fuente: Google Earth.



Figura 9: Módulo en la Zona 2 denominada "BIOFILM"

3.2. DESCRIPCIÓN GENERAL

Para estudiar el proceso de adsorción con carbón activado para el tratamiento de lixiviados de relleno sanitario, basado en la reducción de materia orgánica, se ha considerado evaluar el proceso mediante un equipo de prueba de jarras. Además, se procedió con la siguiente secuencia de actividades:

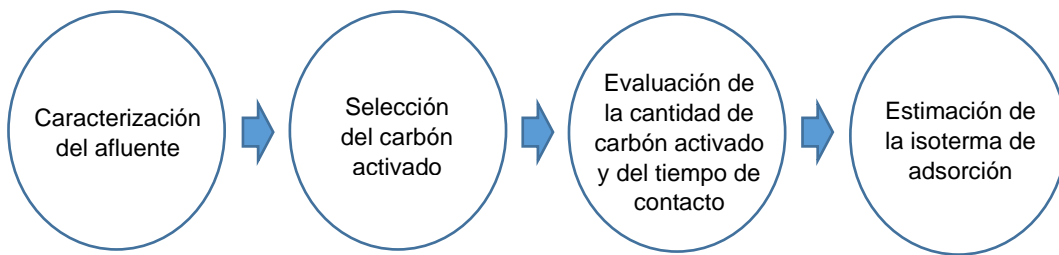


Figura 10: Actividades a desarrollar para el estudio del sistema adsorción - filtración

Los lixiviados empleados para la investigación fueron los provenientes del relleno sanitario de Cajamarca generados en el año 2019, para lo cual se realizaron las gestiones necesarias ante la Gerencia de Desarrollo Ambiental de la Municipalidad Provincial de Cajamarca.



Figura 11: Gestiones con la Municipalidad Provincial de Cajamarca (MPC)

El proveedor de carbón activado fue la empresa Mercantil S.A., quien comercializa una variedad en presentaciones granular y en polvo dentro de la división de Industria, Aguas y Procesos.

3.3. CARACTERIZACIÓN DEL AFLUENTE

Para la caracterización del afluente proveniente del relleno sanitario de Cajamarca en el año 2019, se realizaron las mediciones de DQO total al considerarse como el principal indicador de contaminación para lixiviados; además, se realizaron sólo 3 mediciones de DBO_5 total durante la primera semana con el objeto de establecer la relación $\text{IB}=\text{DBO}_5/\text{DQO}$ y determinar el tipo de lixiviados a emplear como afluente para el sistema a evaluar; se consideraron también, los parámetros de Turbiedad, Temperatura y pH. En cuanto a la obtención de muestras, se consideró la recolección de lixiviados en la poza de almacenamiento del relleno sanitario que se encontraba en operación, empleando el equipo de protección personal necesario. Se consideraron muestras puntuales semanales.



Figura 12: Lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca a emplear como afluente en la investigación

3.4. SELECCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

Para la selección del carbón activado, se evaluaron 3 opciones que Mercantil S.A. suele comercializar para reducción de DQO elevadas en efluentes industriales. Estas 3 opciones son codificadas por el proveedor como: CARBOSORB PAC 18, CARBOSORB PAC 19 y CARBOSORB GAC 23.

Se realizaron pruebas de jarras por duplicado, en las que se pusieron en contacto los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca con las 3 opciones de carbón activado (CA) y se evaluaron las remociones de DQO total, en base a estos resultados se seleccionó el carbón activado a emplear en la investigación.

Tabla 12: Características de los carbones activados evaluados

CARBÓN ACTIVADO	PAC 18	PAC 19	GAC 23
Rótulo	A	B	C
Presentación*	Polvo	Polvo	Granular
Activación*	Química con ácido fosfórico	Física o térmica con vapor de agua	Física o térmica con vapor de agua
Materia prima*	Madera	Madera	Hulla bituminosa
Precio por kg**	\$ 3.5	\$ 3.5	\$ 3.8

* De las fichas técnicas remitidas por Mercantil S.A (CAPÍTULO IX – ANEXO C).

** De la cotización remitida por Mercantil S.A (CAPÍTULO IX – ANEXO D).



Figura 13: Carbones activados evaluados

Para las pruebas de jarras, se tuvo en cuenta lo siguiente:

- ✓ 2 cantidades diferentes de cada tipo de CA: 8 y 32 g/L, considerando los rangos de 5 a 50 g/L, 4 a 40 g/L y 6 a 60 g/L de CA definidos por Méndez R. et al. (2002), Eljaiek M. et al. (2013) y Sahn F. et al (2015), respectivamente.
- ✓ La agitación se realizó a 65 rpm, velocidad que el equipo de prueba de jarras brindaba de forma estable.
- ✓ El tiempo de contacto se fijó en 1 h, al ser razonable y considerando también el antecedente fijado por Méndez R. Et al (2002).
- ✓ Se dejaron sedimentar las muestras por 15 minutos y luego fueron filtradas con papel Whatman N° 40 para separar el carbón activo del efluente.



Figura 14: Pruebas de jarras para la selección del carbón activado

3.5. CANTIDAD DE CARBÓN ACTIVADO Y TIEMPO DE CONTACTO

Se realizaron pruebas de jarras por duplicado, en las que se pusieron en contacto los lixiviados con el CA seleccionado a diferentes cantidades y tiempos de contacto (TC); se evaluaron las remociones de DQO total y en base a estos resultados se seleccionó la mejor combinación de los 2 factores evaluados para la remoción de materia orgánica.

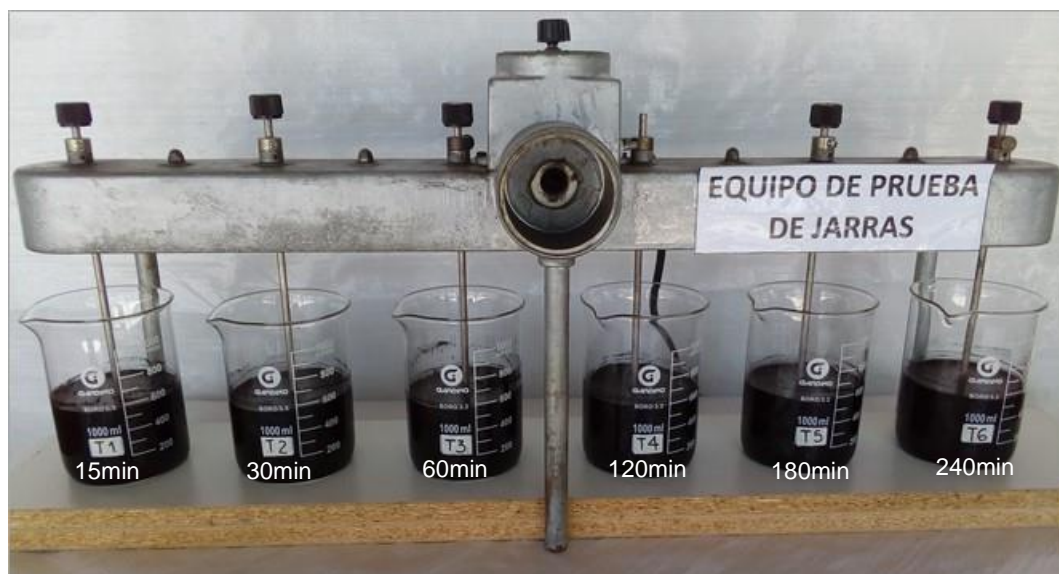


Figura 15: Pruebas de jarras para evaluación de la cantidad de CA y TC

Para las pruebas de jarras, se tuvo en cuenta lo siguiente:

- ✓ 6 cantidades diferentes del CA: 1, 2, 4, 14, 20 y 40 g/L.
- ✓ La agitación se realizó a 65 rpm, velocidad que el equipo de prueba de jarras brindaba de forma estable.
- ✓ 6 TC distintos por cada cantidad de CA considerada: 15, 30, 60, 120, 180 y 240 minutos.
- ✓ Se dejaron sedimentar las muestras por 15 minutos y luego fueron filtradas con papel Whatman N° 40 para separar el carbón activo del efluente.

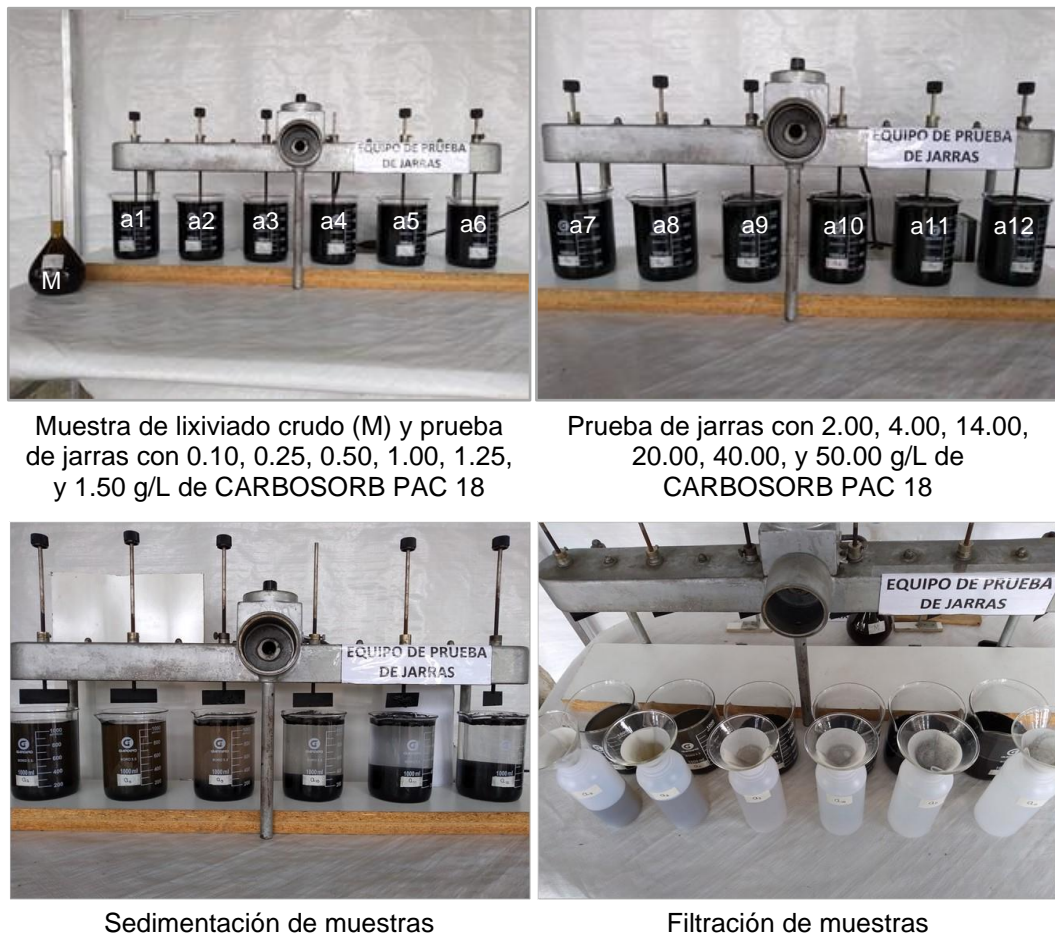
3.6. ISOTERMA DE ADSORCIÓN

Se realizaron pruebas de jarras adicionales en la que se puso en contacto los lixiviados con el CA seleccionado, considerando un número mayor de diferentes cantidades a un TC definido en pruebas anteriores.

Se evaluaron las remociones de DQO total y se determinó qué modelo teórico de adsorción se ajustó mejor al comportamiento experimental para la remoción de materia orgánica, las isotermas evaluadas fueron las de Freundlich y Langmuir. Como parámetros de control, también se consideraron: Turbiedad, Temperatura y pH.

Para la prueba de jarras, se tuvo en cuenta lo siguiente:

- ✓ 12 cantidades diferentes del CA: 0.10, 0.25, 0.50, 1.00, 1.25, 1.50, 2.00, 4.00, 14.00, 20.00, 40.00, y 50.00 g/L.
- ✓ La agitación se realizó a 65 rpm, velocidad que el equipo de prueba de jarras brindaba de forma estable.
- ✓ El TC previamente definido fue 1 h.
- ✓ Se dejaron sedimentar las muestras por 15 minutos y luego fueron filtradas con papel Whatman N° 40 para separar el carbón activo del efluente.



Muestra de lixiviado crudo (M) y prueba de jarras con 0.10, 0.25, 0.50, 1.00, 1.25, y 1.50 g/L de CARBOSORB PAC 18

Prueba de jarras con 2.00, 4.00, 14.00, 20.00, 40.00, y 50.00 g/L de CARBOSORB PAC 18

Sedimentación de muestras

Filtración de muestras

Figura 16: Prueba de jarras para estimación de la isoterma de adsorción

3.7. MATERIALES Y EQUIPOS

Para el desarrollo de la investigación, se emplearon:

- ✓ Kit de protección personal (mandil, guantes y mascarillas).
- ✓ Mesa de trabajo.
- ✓ 750 g de carbón activado CARBOSORB PAC 18.
- ✓ 100 g de carbón activado CARBOSORB PAC 19.
- ✓ 100 g de carbón activado CARBOSORB GAC 23.
- ✓ Kit de pesaje (balanza, vaso y cuchara de plástico).
- ✓ 06 vasos de precipitación de 1 L.
- ✓ 06 embudos de 90 mm de diámetro.
- ✓ 150 unidades de papel Whatman N° 40.
- ✓ 25 frascos de plástico de 500 ml.

- ✓ 25 frascos de plástico de boca ancha de 100 ml.
- ✓ 01 fiola de 500 ml y 01 jarra de plástico, para medición de volúmenes.
- ✓ 01 equipo de prueba de jarras (incl. transformador de 220 a 110 v).



Kit de protección personal (mandil, guantes y mascarillas)



Mesa de trabajo y equipo prueba jarras

Carbones activados y kit de pesaje



Vasos de precipitación 1L

Embudos de 90 mm

Papel Whatman N° 40



Frascos 500 ml

Frascos 100 ml

Fiola 500 ml

Jarra

Figura 17: Materiales y equipos utilizados en la investigación

3.8. PARÁMETROS DE MEDICIÓN Y CONTROL

Todos los parámetros de medición y control fueron determinados en el laboratorio de CITRAR – UNI por la tesista, excepto el parámetro de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) total que se encargó al laboratorio ZEDERLAB S.A.C.

Para la evaluación de los parámetros considerados, se tomaron en cuenta los métodos estándar de análisis para agua y agua residual según APHA (2017), así como los manuales de uso de los diferentes equipos a emplear. Durante el trabajo en laboratorio se usó de manera obligatoria un kit de protección personal propio (mandil, guantes y mascarilla), de modo que se realizó un trabajo seguro.

3.8.1. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO TOTAL (DQO)

El objeto de la investigación fue medir la reducción de materia orgánica en términos de DQO total.

El método empleado para la determinación de la DQO total fue el Colorimétrico Reflujo Cerrado, el cual se basa en que la DQO es equivalente al oxígeno contenido en la materia orgánica que es susceptible a ser oxidado mediante un oxidante fuerte, dicromato de potasio K₂Cr₂O₇ en medio ácido H₂SO₄, el tiempo de reflujo es de 2 horas a 150 °C en un termoreactor y se emplea un espectrofotómetro para medir el consumo de oxígeno.

Materiales y equipos:

- ✓ Reactor digestor digital DRB200, marca Hach.
- ✓ Colorímetro portátil DR/890, marca Hach.
- ✓ Viales de alto rango.
- ✓ Pipetas, papel tissue, gradilla.
- ✓ Caja de encapsulamiento.
- ✓ Agua destilada.

Procedimiento de medición:

- ✓ Precalentar el reactor digestor hasta 150°C.
- ✓ Colocar 2.5 ml de la muestra en un vial y limpiarlo externamente.

- ✓ Mezclar el contenido del vial suavemente y colocarlo en el reactor precalentado.
- ✓ Preparar una muestra de control denominada “Blanco” repitiendo todos los pasos anteriores con 2.5 ml de agua destilada.
- ✓ Digestar los viales en el reactor por 2 horas.
- ✓ Terminada la digestión, esperar que la temperatura descienda hasta los 120°C.
- ✓ Retirar los viales a la gradilla para su enfriamiento hasta temperatura ambiente.
- ✓ En el colorímetro, seleccionar el programa 17 para mediciones de alto rango.
- ✓ Introducir el vial con la muestra de control (“Blanco”) en el colorímetro y presionar el botón ZERO. Repetir hasta que al realizar la lectura se obtenga 0.
- ✓ Luego, realizar la lectura de la DQO introduciendo el vial con la muestra a evaluar en el equipo.

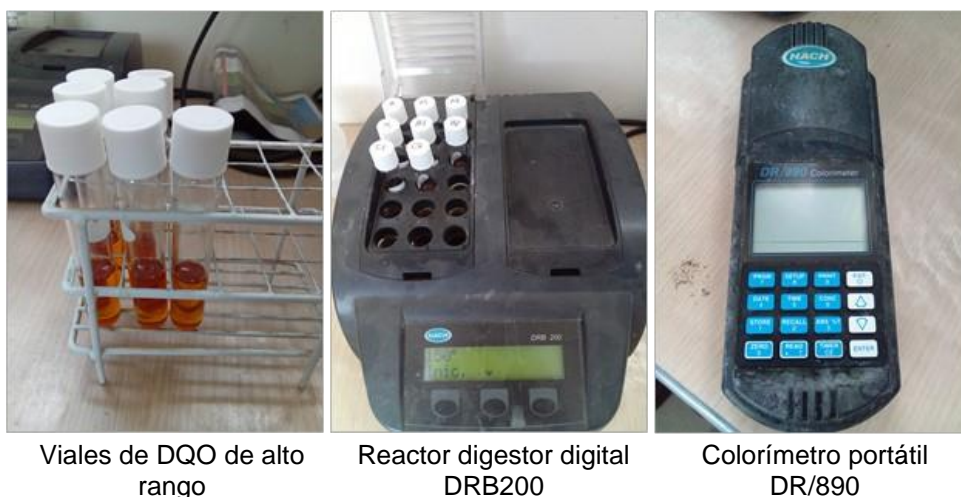


Figura 18: Equipos para determinación de DQO total

3.8.2. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO TOTAL (DBO₅)

Se consideró el parámetro de DBO₅ total sólo para definir el tipo de lixiviados según el índice de biodegradabilidad (DBO₅/DQO) en el afluente.

ZEDERLAB S.A.C. fue quien realizó las mediciones de DBO_5 , quien aplicó el método de Diluciones, basado en que el promedio de la degradación bioquímica de la materia orgánica es directamente proporcional a la cantidad de material existente al mismo tiempo. La prueba consiste en la medición del Oxígeno Disuelto (OD) antes y después de 5 días de incubación a 20 °C.

3.8.3. TURBIEDAD

Se consideró la turbiedad sólo como indicador de partículas en suspensión para evaluar su variación con el proceso estudiado.

Se aplicó el método Nefelométrico para la medición de la Turbiedad, basado en cuantificar la intensidad de la luz dispersada a 90° cuando un haz de luz atraviesa un líquido. La pérdida de transparencia es el resultado de la presencia de material suspendido en la muestra a evaluar.

Materiales y equipos:

- ✓ Turbidímetro 2100Q portátil, marca Hach.
- ✓ 01 celda de vidrio de 10 ml.
- ✓ 01 vaso de vidrio de 10 ml.
- ✓ Papel tissue, piseta de 500 ml.
- ✓ Agua destilada.

Procedimiento de medición:

- ✓ Llenar la celda de vidrio con la muestra hasta la marca señalada y limpiar el exterior.
- ✓ Colocar la celda con la muestra en el turbidímetro y realizar la lectura.

3.8.4. TEMPERATURA Y POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)

Se realizó la medición de Temperatura y pH para conocer a qué condiciones de medio se estaba desarrollando el proceso de adsorción y cómo variaron dichos parámetros con el proceso estudiado. Se emplearon instrumentos analíticos para su cuantificación directa.

Materiales y equipos:

- ✓ Medidor HQ30d portátil, marca Hach.
- ✓ 01 sonda de pH estándar de PHC301.
- ✓ 01 piseta de 500 ml.
- ✓ Agua destilada.

Procedimiento de medición:

- ✓ Introducir la sonda en la muestra a evaluar.
- ✓ Esperar la estabilización del equipo y realizar la lectura.



Turbidímetro portátil 2100Q con celda de vidrio

Medidor HQ30d portátil con sonda

Figura 19: Equipos para determinación de Turbiedad, Temperatura y pH

3.9. CRONOGRAMA

La presente investigación se desarrolló durante 10 semanas en total, a partir del 24 de junio del 2019 hasta el 29 de agosto del 2019.

Tabla 13: Cronograma de la investigación

ACTIVIDAD	SEMANA									
	Del 24/06/2019 al 29/08/2019									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Caracterización del afluente	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Selección del carbón activado			X	X						
Evaluación de la cantidad de CA y del TC					X	X	X			
Estimación de la isoterma de adsorción								X	X	X

CAPÍTULO IV: OBTENCIÓN DE RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL AFLUENTE

Tabla 14: Caracterización de los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca a emplear como afluente en la investigación

Semana	Muestra	Parámetro					
		DQO	DBO ₅	IB	Turbied	Temperat	pH
		mg/L	mg/L		UNT	°C	
1	m1	1,693.0	243.7	0.14	153.6	18.5	8.84
	m2	1,629.1	229.5	0.14	169.2	18.3	8.95
	m3	1,734.7	255.8	0.15	144.9	18.4	9.68
Promedio		1,685.6	243.0	0.14	155.9	18.4	9.16
Resultados semanales							
1	M1	1,685.6	243.0	0.14	155.9	18.4	9.16
2	M2	1,683.3	-	-	152.1	18.6	8.83
3	M3	1,654.1	-	-	150.7	18.2	8.62
4	M4	1,606.8	-	-	142.2	18.4	8.76
5	M5	1,618.0	-	-	139.5	18.1	8.67
6	M6	1,555.4	-	-	135.9	18.3	8.75
7	M7	1,581.8	-	-	136.4	17.8	9.02
8	M8	1,533.2	-	-	129.9	18.0	8.74
9	M9	1,562.4	-	-	133.1	17.7	8.72
10	M10	1,572.1	-	-	135.5	17.0	8.78
Promedio		1,605.3	-	-	141.1	18.1	8.80
Mínimo		1,533.2	-	-	129.9	17.0	8.62
Máximo		1,685.6	-	-	155.9	18.6	9.16

De las muestras de lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca obtenidas de junio a agosto del año 2019, analizadas en los laboratorios de CITRAR – UNI, se obtuvieron valores promedio de 1,605.3 mg/L para Demanda Química de Oxígeno total (DQO), 141.1 UNT para Turbiedad, 18.1°C para Temperatura y 8.80 para Potencial de Hidrógeno (pH); mientras que el análisis inicial para Demanda Bioquímica de Oxígeno total (DBO₅) desarrollado por ZEDERLAB S.A.C. arrojó un valor promedio de 243.0 mg/L, por lo que el Índice de Biodegradabilidad (IB=DBO₅/DQO) promedio fue 0.14.

Como valores mínimos se obtuvieron 1,533.2 mg/L para DQO total, 129.9 para Turbiedad, 17.0°C para Temperatura y 8.62 para pH. Por otro lado, como valores máximos se presentaron 1,685.6 mg/L para DQO total, 155.9 para Turbiedad, 18.6°C para Temperatura y 9.16 para pH.

4.2. SELECCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

Tabla 15: Remoción de DQO total para los carbones activados CARBOSORB PAC 18, PAC 19 y GAC 23

A		CARBOSORB PAC 18					
B		CARBOSORB PAC 19					
C		CARBOSORB GAC 23					
Muestra	Cantidad de CA	Prueba 1		Prueba 2		Promedio	
		DQO	Rem	DQO	Rem	DQO	Rem
	g/L	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%
M	0	1,654.1	-	1,606.8	-	1,630.5	0.0%
A1	8	690.8	58.2%	603.3	62.5%	647.0	60.3%
A2	32	436.5	73.6%	392.0	75.6%	414.2	74.6%
B1	8	1,384.4	16.3%	1,353.9	15.7%	1,369.2	16.0%
B2	32	714.5	56.8%	675.5	58.0%	695.0	57.4%
C1	8	1,116.2	32.5%	1,087.0	32.4%	1,101.6	32.4%
C2	32	928.5	43.9%	909.1	43.4%	918.8	43.6%

El carbón activado CARBOSORB PAC 18 alcanzó remociones de DQO total de 60.3% con 8 g/L y 74.6% con 32 g/L; mientras que el CARBOSORB PAC 19 presentó remociones de DQO de 16.0% con 8 g/L y 57.4% con 32 g/L; y el CARBOSORB GAC 23, 32.4% con 8 g/L y 43.6% con 32 g/L.

Se seleccionó el carbón activado CARBOSORB PAC 18 por alcanzar las mejores remociones de DQO total en las pruebas en comparación con el CARBOSORB PAC 19 y el CARBOSORB GAC 23.

4.3. CANTIDAD DE CARBÓN ACTIVADO Y TIEMPO DE CONTACTO

Tabla 16: DQO total y su remoción para diferentes cantidades de CARBOSORB PAC 18 y tiempos de contacto – Prueba 1

DQO (mg/L) M=1,618.0		Cantidad de carbón activado (g/L)					
		1	2	4	14	20	40
Tiempo de contacto (min)	15	1,088.4	1,010.5	932.7	608.8	551.8	557.4
	30	1,011.9	909.1	838.2	557.4	487.9	469.8
	60	939.6	825.7	706.1	507.4	403.1	401.7
	120	946.6	818.7	693.6	528.2	422.6	467.0
	180	929.9	829.8	710.3	536.5	462.9	428.1
	240	938.3	818.7	714.5	544.9	426.7	424.0
Remoción DQO		Cantidad de carbón activado (g/L)					
		1	2	4	14	20	40
Tiempo de contacto (min)	15	32.7%	37.5%	42.4%	62.4%	65.9%	65.5%
	30	37.5%	43.8%	48.2%	65.5%	69.8%	71.0%
	60	41.9%	49.0%	56.4%	68.6%	75.1%	75.2%
	120	41.5%	49.4%	57.1%	67.4%	73.9%	71.1%
	180	42.5%	48.7%	56.1%	66.8%	71.4%	73.5%
	240	42.0%	49.4%	55.8%	66.3%	73.6%	73.8%

Tabla 17: DQO total y su remoción para diferentes cantidades de CARBOSORB PAC 18 y tiempos de contacto – Prueba 2

DQO (mg/L) M=1,555.4		Cantidad de carbón activado (g/L)					
		1	2	4	14	20	40
Tiempo de contacto (min)	15	1,067.5	988.3	784.0	635.2	542.1	549.1
	30	995.2	924.4	793.7	576.9	475.4	447.6
	60	925.7	845.1	720.0	497.6	397.5	410.1
	120	916.0	852.1	704.7	539.3	428.1	429.5
	180	921.6	863.2	714.5	556.0	425.3	432.3
	240	928.5	859.0	721.4	553.2	432.3	417.0
Remoción DQO		Cantidad de carbón activado (g/L)					
		1	2	4	14	20	40
Tiempo de contacto (min)	15	34.0%	38.9%	51.5%	60.7%	66.5%	66.1%
	30	38.5%	42.9%	50.9%	64.3%	70.6%	72.3%
	60	42.8%	47.8%	55.5%	69.2%	75.4%	74.7%
	120	43.4%	47.3%	56.4%	66.7%	73.5%	73.5%
	180	43.0%	46.6%	55.8%	65.6%	73.7%	73.3%
	240	42.6%	46.9%	55.4%	65.8%	73.3%	74.2%

Tabla 18: DQO total y su remoción para diferentes cantidades de CARBOSORB PAC 18 y tiempos de contacto – Promedio

DQO (mg/L) M=1,586.7		Cantidad de carbón activado (g/L)					
		1	2	4	14	20	40
Tiempo de contacto (min)	15	1,077.9	999.4	858.3	622.0	547.0	553.2
	30	1,003.6	916.7	815.9	567.1	481.6	458.7
	60	932.7	835.4	713.1	502.5	400.3	405.9
	120	931.3	835.4	699.2	533.8	425.3	448.3
	180	925.7	846.5	712.4	546.3	444.1	430.2
	240	933.4	838.9	717.9	549.1	429.5	420.5
Remoción DQO		Cantidad de carbón activado (g/L)					
		1	2	4	14	20	40
Tiempo de contacto (min)	15	33.4%	38.2%	47.0%	61.6%	66.2%	65.8%
	30	38.0%	43.3%	49.6%	64.9%	70.2%	71.6%
	60	42.4%	48.4%	55.9%	68.9%	75.3%	74.9%
	120	42.4%	48.4%	56.8%	67.0%	73.7%	72.3%
	180	42.8%	47.7%	56.0%	66.2%	72.6%	73.4%
	240	42.3%	48.2%	55.6%	66.1%	73.5%	74.0%

De las cantidades de CARBOSORB PAC 18 evaluadas y los tiempos de contacto considerados, se obtuvo una remoción mínima de DQO total de 33.4% con 1 g/L de CA y con TC de 15 min, mientras que la remoción máxima de 75.3% se obtuvo con 20 g/L de CA y con TC de 60 min.

4.4. ISOTERMA DE ADSORCIÓN

Tabla 19: Resultados para el CARBOSORB PAC 18 y TC=60min – Prueba 1

Muestra	Cant. CA	DQO	Turbiedad	Temperat	pH
	g/L	mg/L	UNT	°C	
M	0	1,533.2	129.9	18.0	8.74
a1	0.10	1,128.7	106.2	17.7	8.84
a2	0.25	989.7	110.3	17.8	8.81
a3	0.50	921.6	101.8	17.6	8.86
a4	1.00	870.1	83.2	17.7	8.80
a5	1.25	695.0	71.7	17.5	8.77
a6	1.50	834.0	57.8	17.7	8.75
a7	2.00	777.0	38.6	18.2	8.73
a8	4.00	657.5	25.1	18.0	8.63

a9	14.00	461.5	10.0	17.7	8.29
a10	20.00	368.4	4.5	17.9	8.22
a11	40.00	367.0	4.8	17.8	8.04
a12	50.00	367.0	4.9	17.9	7.85

Tabla 20: Resultados para el CARBOSORB PAC 18 y TC=60min – Prueba 2

Muestra	Cant. CA	DQO	Turbiedad	Temperat	pH
	g/L	mg/L	UNT	°C	
M		1,562.4	133.1	17.7	8.72
a1	0.10	1,141.2	110.8	17.1	8.81
a2	0.25	903.5	112.5	16.8	8.79
a3	0.50	931.3	90.3	16.6	8.80
a4	1.00	860.4	81.7	16.8	8.77
a5	1.25	852.1	69.9	16.7	8.84
a6	1.50	822.9	64.8	16.9	8.82
a7	2.00	800.6	44.2	17.2	8.73
a8	4.00	675.5	37.3	17.1	8.72
a9	14.00	479.6	13.9	17.4	8.68
a10	20.00	369.7	6.8	17.2	8.73
a11	40.00	419.8	6.5	17.4	8.33
a12	50.00	368.4	7.0	17.5	8.28

Tabla 21: Remoción de DQO total para el CARBOSORB PAC 18 y TC=60min

Muestra	Cant. CA	Prueba 1		Prueba 2		Promedio	
		DQO	Rem	DQO	Rem	DQO	Rem
	g/L	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%
M		1,533.2		1,562.4		1,547.8	
a1	0.10	1,128.7	26.4%	1,141.2	27.0%	1,134.9	26.7%
a2	0.25	989.7	35.4%	903.5	42.2%	946.6	38.8%
a3	0.50	921.6	39.9%	931.3	40.4%	926.4	40.1%
a4	1.00	870.1	43.2%	860.4	44.9%	865.3	44.1%
a5	1.25	695.0	54.7%	852.1	45.5%	773.5	50.1%
a6	1.50	834.0	45.6%	822.9	47.3%	828.4	46.5%
a7	2.00	777.0	49.3%	800.6	48.8%	788.8	49.0%
a8	4.00	657.5	57.1%	675.5	56.8%	666.5	56.9%
a9	14.00	461.5	69.9%	479.6	69.3%	470.5	69.6%
a10	20.00	368.4	76.0%	369.7	76.3%	369.0	76.2%
a11	40.00	367.0	76.1%	419.8	73.1%	393.4	74.6%
a12	50.00	367.0	76.1%	368.4	76.4%	367.7	76.2%

Tabla 22: Remoción de Turbiedad para el CARBOSORB PAC 18 y TC=60min

Muestra	Cant. CA	Prueba 1		Prueba 2		Promedio	
		Turbied	Rem	Turbied	Rem	Turbied	Rem
	g/L	UNT	%	UNT	%	UNT	%
M		129.9		133.1		131.5	
a1	0.10	106.2	18.2%	110.8	16.8%	108.5	17.5%
a2	0.25	110.3	15.1%	112.5	15.5%	111.4	15.3%
a3	0.50	101.8	21.6%	90.3	32.2%	96.1	26.9%
a4	1.00	83.2	36.0%	81.7	38.6%	82.5	37.3%
a5	1.25	71.7	44.8%	69.9	47.5%	70.8	46.1%
a6	1.50	57.8	55.5%	64.8	51.3%	61.3	53.4%
a7	2.00	38.6	70.3%	44.2	66.8%	41.4	68.5%
a8	4.00	25.1	80.7%	37.3	72.0%	31.2	76.3%
a9	14.00	10.0	92.3%	13.9	89.6%	12.0	90.9%
a10	20.00	4.5	96.5%	6.8	94.9%	5.7	95.7%
a11	40.00	4.8	96.3%	6.5	95.1%	5.7	95.7%
a12	50.00	4.9	96.2%	7.0	94.7%	6.0	95.5%

Tabla 23: Variación de Temperatura y pH para el CARBOSORB PAC 18 y TC=60min

Muestra	Cant. CA	Prueba 1		Prueba 2		Promedio	
		Temp	pH	Temp	pH	Temp	pH
	g/L	°C		°C		°C	
M		18.0	8.74	17.7	8.72	17.9	8.73
a1	0.10	17.7	8.84	17.1	8.81	17.4	8.83
a2	0.25	17.8	8.81	16.8	8.79	17.3	8.80
a3	0.50	17.6	8.86	16.6	8.80	17.1	8.83
a4	1.00	17.7	8.80	16.8	8.77	17.3	8.79
a5	1.25	17.5	8.77	16.7	8.84	17.1	8.81
a6	1.50	17.7	8.75	16.9	8.82	17.3	8.79
a7	2.00	18.2	8.73	17.2	8.73	17.7	8.73
a8	4.00	18.0	8.63	17.1	8.72	17.6	8.68
a9	14.00	17.7	8.29	17.4	8.68	17.6	8.49
a10	20.00	17.9	8.22	17.2	8.73	17.6	8.48
a11	40.00	17.8	8.04	17.4	8.33	17.6	8.19
a12	50.00	17.9	7.85	17.5	8.28	17.7	8.07
Promedio (a1–a12)		17.8	8.55	17.1	8.69	17.4	8.62
Mínimo (a1–a12)		17.5	7.85	16.6	8.28	17.1	8.07
Máximo (a1–a12)		18.2	8.86	17.5	8.84	17.7	8.83

Durante las pruebas de jarras de evaluación, se obtuvieron remociones mayores de DQO y Turbiedad mientras se incrementaba la cantidad de CARBOSORB PAC 18, presentándose remociones de hasta 76.2% para DQO y 95.7% para Turbiedad, ambas para 20 g/L de CA.

Además, la Temperatura y pH presentaron valores promedio de 17.4°C y 8.62, valores mínimos de 17.1°C y 8.07 y valores máximos de 17.7°C y 8.83.

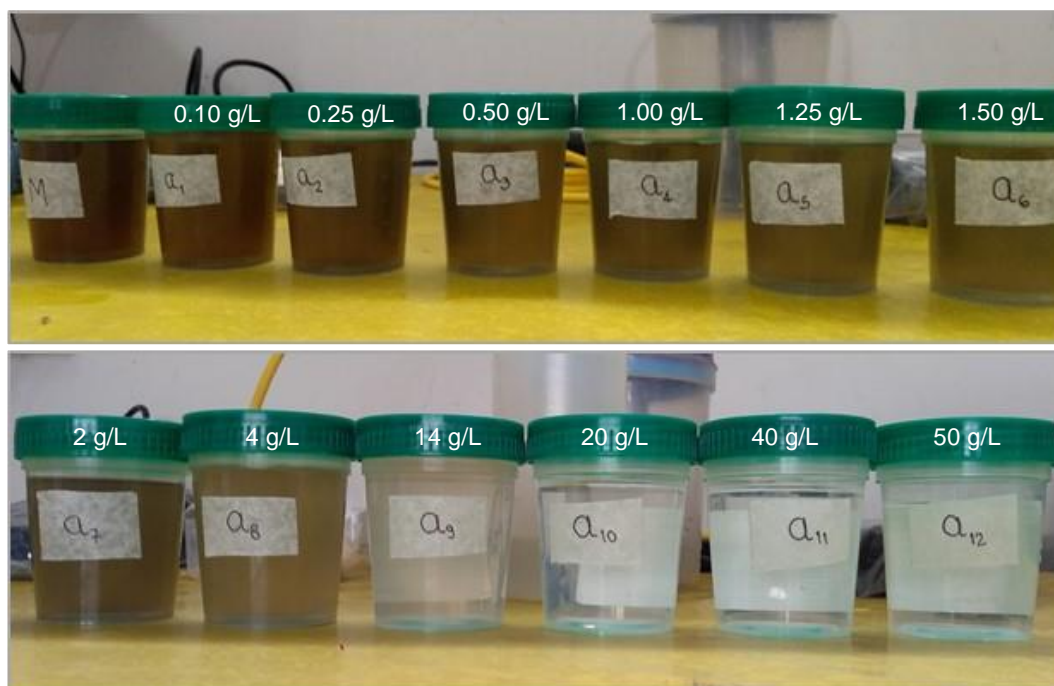


Figura 20: Resultados para el CARBOSORB PAC 18 y TC=60min

Tabla 24: Procesamiento de información para la determinación de la isoterma de adsorción

Muestra	Cantidad de CA		DQO Ce (mg/L)	Remoción		x/m
	g/L	m (mg/L)		x (mg/L)	%	
M		Co:	1,547.8			
a1	0.10	100	1,134.9	412.83	26.7%	4.13
a2	0.25	250	946.6	601.18	38.8%	2.40
a3	0.50	500	926.4	621.33	40.1%	1.24
a4	1.00	1,000	865.3	682.49	44.1%	0.68
a5	1.25	1,250	773.5	774.23	50.0%	0.62
a6	1.50	1,500	828.4	719.33	46.5%	0.48
a7	2.00	2,000	788.8	758.94	49.0%	0.38

a8	4.00	4,000	666.5	881.26	56.9%	0.22
a9	14.00	14,000	470.5	1,077.25	69.6%	0.08
a10	20.00	20,000	369.0	1,178.72	76.2%	0.06
a11	40.00	40,000	393.4	1,154.40	74.6%	0.03
a12	50.00	50,000	367.7	1,180.11	76.2%	0.02

Tabla 25: Isotermas de adsorción Freundlich y Langmuir evaluadas

Muestra	Ce	x/m	Isoterma de Freundlich		Isoterma de Langmuir	
	mg/L		X=log(Ce)	Y=log(x/m)	X=1/Ce	Y=1/(x/m)
M	1,547.8					
a1	1,134.9	4.13	3.05	0.62	0.0009	0.24
a2	946.6	2.40	2.98	0.38	0.0011	0.42
a3	926.4	1.24	2.97	0.09	0.0011	0.80
a4	865.3	0.68	2.94	-0.17	0.0012	1.47
a5	773.5	0.62	2.89	-0.21	0.0013	1.61
a6	828.4	0.48	2.92	-0.32	0.0012	2.09
a7	788.8	0.38	2.90	-0.42	0.0013	2.64
a8	666.5	0.22	2.82	-0.66	0.0015	4.54
a9	470.5	0.08	2.67	-1.11	0.0021	13.00
a10	369.0	0.06	2.57	-1.23	0.0027	16.97
a11	393.4	0.03	2.59	-1.54	0.0025	34.65
a12	367.7	0.02	2.57	-1.63	0.0027	42.37

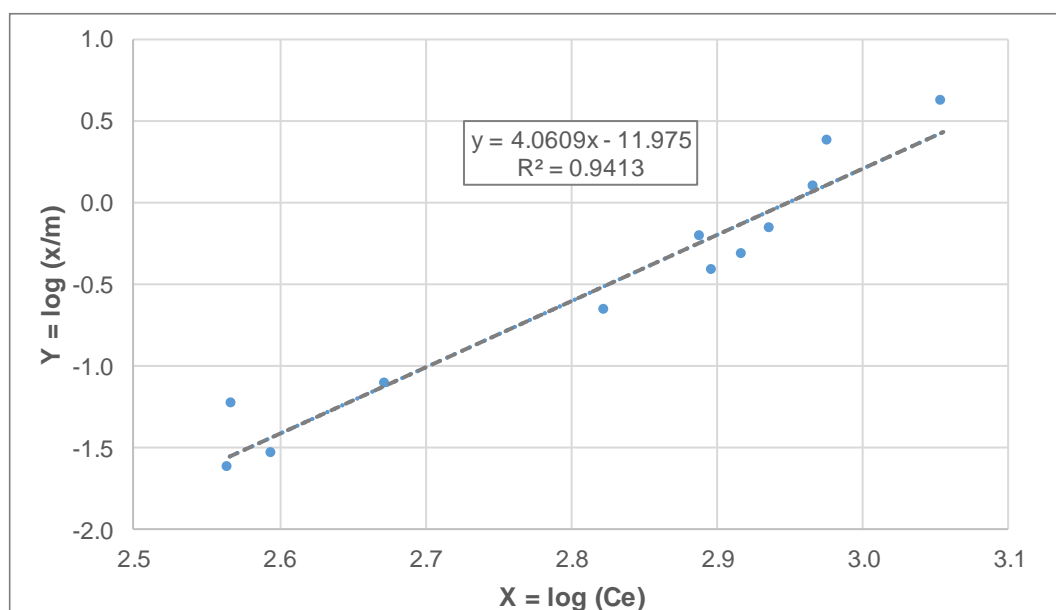


Figura 21: Linealización de la isoterma de Freundlich evaluada

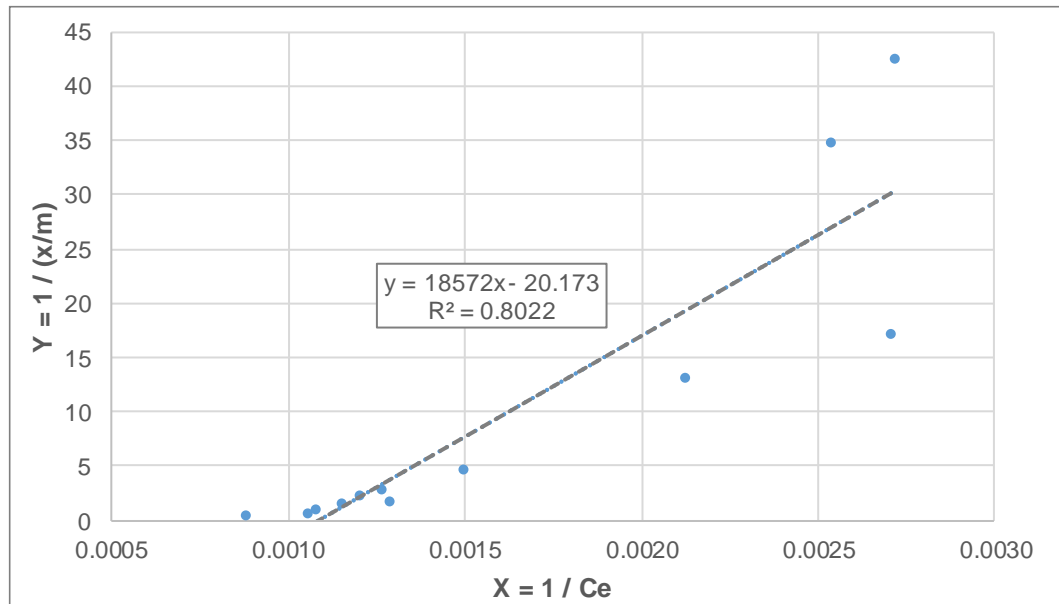


Figura 22: Linealización de la isoterma de Langmuir evaluada

Tabla 26: Comparación de isotermas de Freundlich y Langmuir para el CARBOSORB PAC 18 y lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca

ISOTERMA DE FREUNDLICH		
ECUACIÓN LINEAL		ECUACIÓN ORIGINAL
$\log\left(\frac{x}{m}\right) = \frac{1}{n} \log C_e + \log k$		$\frac{x}{m} = k C_e^{1/n}$
k	$1.0593 \cdot 10^{-12}$	$\frac{x}{m} = 1.0593 \cdot 10^{-12} \cdot (C_e)^4$
n	0.25	
R ²	0.9413	
ISOTERMA DE LANGMUIR		
ECUACIÓN LINEAL		ECUACIÓN ORIGINAL
$\frac{1}{(x/m)} = \frac{1}{ab} \left(\frac{1}{C_e}\right) + \frac{1}{a}$		$\frac{x}{m} = \frac{abC_e}{1 + bC_e}$
a	-0.0496	$\frac{x}{m} = \frac{0.000053866 \cdot C_e}{1 - 0.001086C_e}$
b	-0.001086	
R ²	0.8022	

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

5.1. DE LA CARACTERIZACIÓN DEL AFLUENTE

Tabla 27: Análisis de la caracterización de los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca a emplear como afluente en la investigación

Lixiviados		Cajamarca		Jóvenes	Intermedios	Viejos
Fecha		Marzo 2017	Jun a agos 2019			
Edad (años)		7	9	< 2	2 – 10	> 10
Parámetro	Und	(*)	(**)	(***)		
pH	-	-	8.80	6.5	6.5 – 7.5	> 7.5
DQO	mg/L	2,162.0	1,605.3	> 10,000	500 – 10,000	< 500
DBO ₅	mg/L	231.0	243.0	3,000	50 – 3,000	< 50
IB	mg/L	0.11	0.14	> 0.3	0.1 – 0.3	< 0.1

(*) De la Tabla 8, (**) De la Tabla 14, (***) De la Tabla 4.

Como se aprecia en la Tabla 27, en base a los principales indicadores de contaminación considerados para la presente investigación, se pueden categorizar a los lixiviados generados en el relleno sanitario de Cajamarca en el año 2019, como lixiviados intermedios, los que pronto se convertirían en viejos o maduros, toda vez que:

- ✓ El relleno sanitario de Cajamarca inició sus operaciones en el año 2010, por lo que los lixiviados evaluados tendrían alrededor de 9 años de edad, encontrándose cerca del límite superior del rango definido para lixiviados Intermedios (2 a 10 años).
- ✓ El Potencial de Hidrógeno (pH) que presentaron los lixiviados evaluados fue 8.80, condición que lo ubicaría en el rango de lixiviados viejos (>7.5), lo que respondería a que los lixiviados pronto alcanzarían los 10 años de edad.
- ✓ Los lixiviados evaluados presentaron valores de 1,605.3 mg/L para DQO, 243.0 mg/L para DBO₅ y 0.14 para IB, encontrándose dentro de los rangos definidos para lixiviados Intermedios y con tendencia hacia los rangos de lixiviados viejos.

Los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca en el 2019 presentaron valores altos de contenido de materia orgánica en términos de DQO y DBO₅; sin embargo, su condición de lixiviados intermedios cercanos a maduros implica que, la materia orgánica ha sido reducida con el paso del tiempo y su condición de biodegradabilidad también, dando pie a que el material refractario predomine y sea necesario emplear métodos fisicoquímicos como la adsorción con carbón activado para su remoción. Además, si consideramos la caracterización de los lixiviados realizada en el año 2017, se verifica que ya se contaba con la condición de lixiviados intermedios para entonces.

Por otro lado, al contar con una caracterización de marzo del 2017 que corresponde a la época de lluvia en la zona, implica que los resultados de DQO y DBO₅ para la época seca fueron superiores a 2,162.0 mg/L y 231.0 mg/L, valores que superarían a 1,605.3 mg/L y 243.0 mg/L reportados para la época seca en el año 2019. Quedando evidenciada la normal estabilización de la materia orgánica que se presenta en un relleno sanitario con el paso de los años.

5.2. DE LA SELECCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

Tabla 28: Análisis de la selección del carbón activado para remoción de la DQO total presente en los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca

De la Tabla 12						
CARBÓN ACT	PAC 18		PAC 19		GAC 23	
Rótulo	A		B		C	
Presentación	Polvo		Polvo		Granular	
Activación	Química		Física		Física	
Materia prima	Madera		Madera		Hulla bituminosa	
Precio	\$ 3.5 / kg		\$ 3.5 / kg		\$ 3.8 / kg	
De la Tabla 15						
ID	A1	A2	B1	B2	C1	C2
Cant. de CA (g/L)	8	32	8	32	8	32
Rem DQO	60.3%	74.6%	16.0%	57.4%	32.4%	43.6%

Los 3 carbones activados evaluados mostraron afinidad para el proceso de adsorción de materia orgánica en términos de DQO total presente en los lixiviados

del relleno sanitario de Cajamarca, obteniéndose remociones por encima del 16% con 8 g/L de CA y sobre el 43% con 32 g/L. Sin embargo, fue el carbón activado CARBOSORB PAC 18 el que presentó mejores remociones, 63.3% con 8 g/L y 74.6% con 32 g/L.

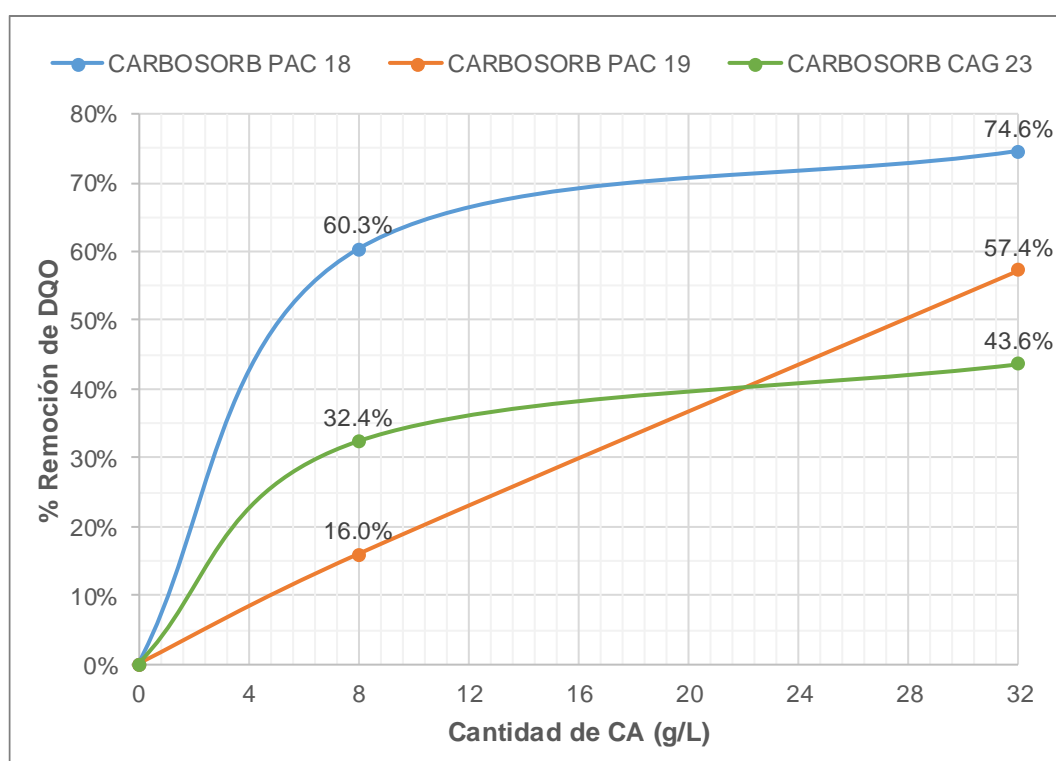


Figura 23: Remoción de DQO total vs. Cantidad de carbón activado – CARBOSORB PAC 18, PAC 19 y GAC 23

Del análisis de la Tabla 28 y Figura 23, se desprende lo siguiente:

- ✓ Si comparamos el CARBOSORB PAC 18 con el CARBOSORB GAC 23, podemos apreciar que la relación entre sus remociones alcanzadas fue de 1.9 (60.3%/32.4%) a 1.7 (74.6%/43.6%), lo que estaría relacionado con las características de fabricación, pudiendo establecerse que un carbón proveniente de madera, activado mediante procesos químicos y particulado en polvo, presenta mejor capacidad adsorptiva para DQO presente en los lixiviados evaluados que un carbón proveniente de hulla bituminosa, activado mediante procesos físicos y particulado en gránulos. Por ello, sumado a que el costo del CARBOSORB GAC 23 es superior, no se elige a éste como carbón activado a emplear para la presente investigación.

- ✓ Del mismo modo, si comparamos el CARBOSORB PAC 18 con el CARBOSORB PAC 19, podemos apreciar que la relación entre sus remociones alcanzadas fue de 3.8 (60.3%/16.0%) a 1.3 (74.6%/57.4%), pudiendo establecerse que a pesar de contar con un carbón proveniente de madera y particulado en polvo, el proceso de activación determinará cuál presenta mejor capacidad adsorptiva para DQO presente en los lixiviados evaluados, siendo superior el proceso de activación química. Por ello, y a pesar de contar con costos iguales, no se elige al CARBOSORB PAC 19 como carbón activado a emplear en la investigación.

Por lo tanto, se eligió el CARBOSORB PAC 18 comercializado por Mercantil S.A. como el carbón activado a emplear en la evaluación de la reducción de materia orgánica presente en los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca mediante adsorción, el cual proviene de carbón vegetal (madera), activado mediante procesos químicos (con ácido fosfórico) y particulado en polvo, quien presentó mayor capacidad adsorptiva en comparación con los otros carbones activados evaluados y buena afinidad con el adsorbato objetivo.

5.3. DE LA CANTIDAD DE CARBÓN ACTIVADO Y TIEMPO DE CONTACTO

De los resultados obtenidos y presentados en la Figura 24 y Figura 25, se evidencia que, a mayor cantidad de carbón activado CARBOSORB PAC 18 y mayor tiempo de contacto se obtienen mejores remociones de DQO total, estabilizándose cada curva en niveles distintos de remoción máxima a 20 g/L de CA y TC de 60 min.

En la Figura 24 se aprecia que, las remociones obtenidas crecen aceleradamente hasta los 4 g/L de CARBOSORB PAC 18, el crecimiento disminuye ligeramente con cantidades en el rango de 4 a 20 g/L, y por encima de éste ya no se aprecia un incremento.

- ✓ Para el tiempo de contacto de 15 minutos, se alcanzó una remoción de alrededor del 66% con 20 g/L de CARBOSORB PAC 18.
- ✓ Para el tiempo de contacto de 30 minutos, se alcanzó una remoción de alrededor del 70% con 20 g/L de CARBOSORB PAC 18.

- ✓ Para el tiempo de contacto de 60 minutos, se alcanzó una remoción de alrededor del 75% con 20 g/L de CARBOSORB PAC 18.
- ✓ Para los tiempos de contacto de 120, 180 y 240 minutos, se alcanzaron remociones de alrededor del 73% con 20 g/L de CARBOSORB PAC 18.

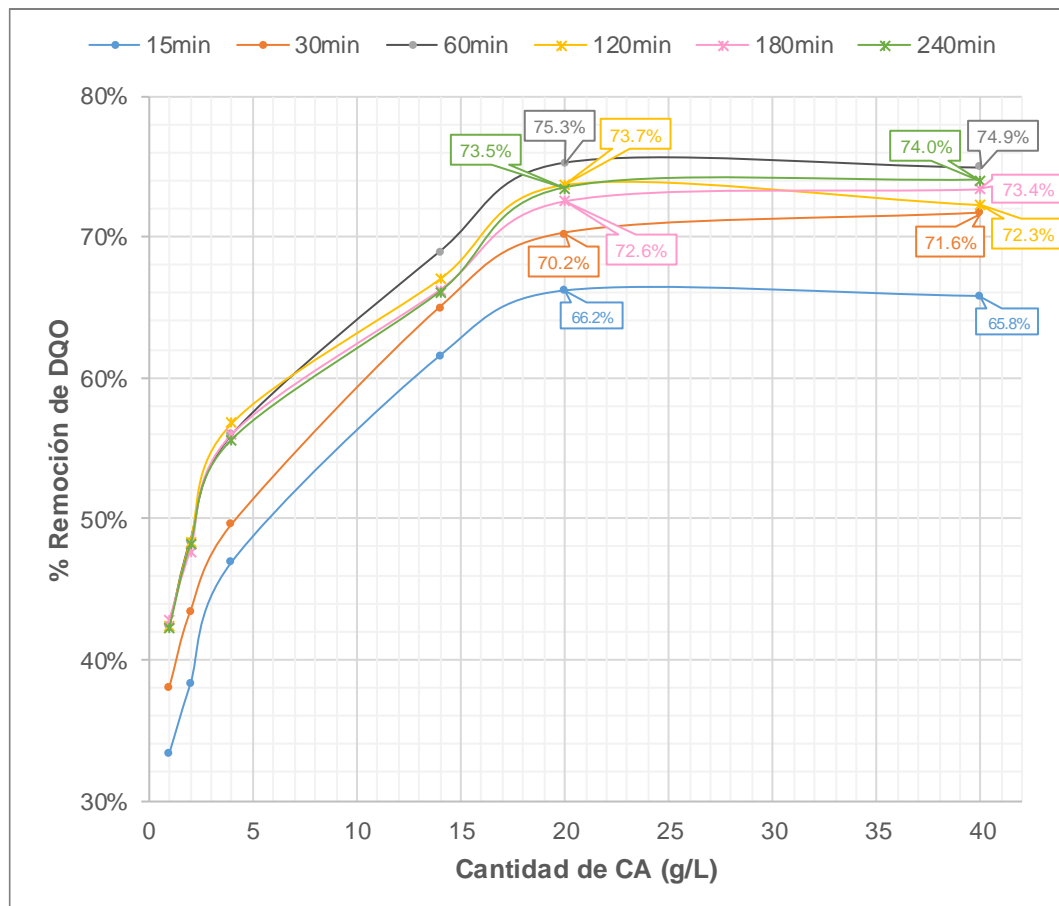


Figura 24: Remoción de DQO total vs. Cantidad de CARBOSORB PAC 18, para tiempos de contacto de 15, 30, 60, 120, 180 y 240 minutos

En la Figura 25 se aprecia que, las remociones obtenidas crecen hasta los 60 minutos de tiempo de contacto y por encima de éste ya no se aprecia un incremento.

- ✓ Para la cantidad de CARBOSORB PAC 18 de 1 g/L, se alcanzó una remoción de alrededor del 42% con un tiempo de contacto de 60 minutos.
- ✓ Para la cantidad de CARBOSORB PAC 18 de 2 g/L, se alcanzó una remoción de alrededor del 48% con un tiempo de contacto de 60 minutos.

- ✓ Para la cantidad de CARBOSORB PAC 18 de 4 g/L, se alcanzó una remoción de alrededor del 56% con un tiempo de contacto de 60 minutos.
- ✓ Para la cantidad de CARBOSORB PAC 18 de 14 g/L, se alcanzó una remoción de alrededor del 69% con un tiempo de contacto de 60 minutos.
- ✓ Para las cantidades de CARBOSORB PAC 18 de 20 y 40 g/L, se alcanzaron remociones de alrededor del 75% con un tiempo de contacto de 60 minutos.

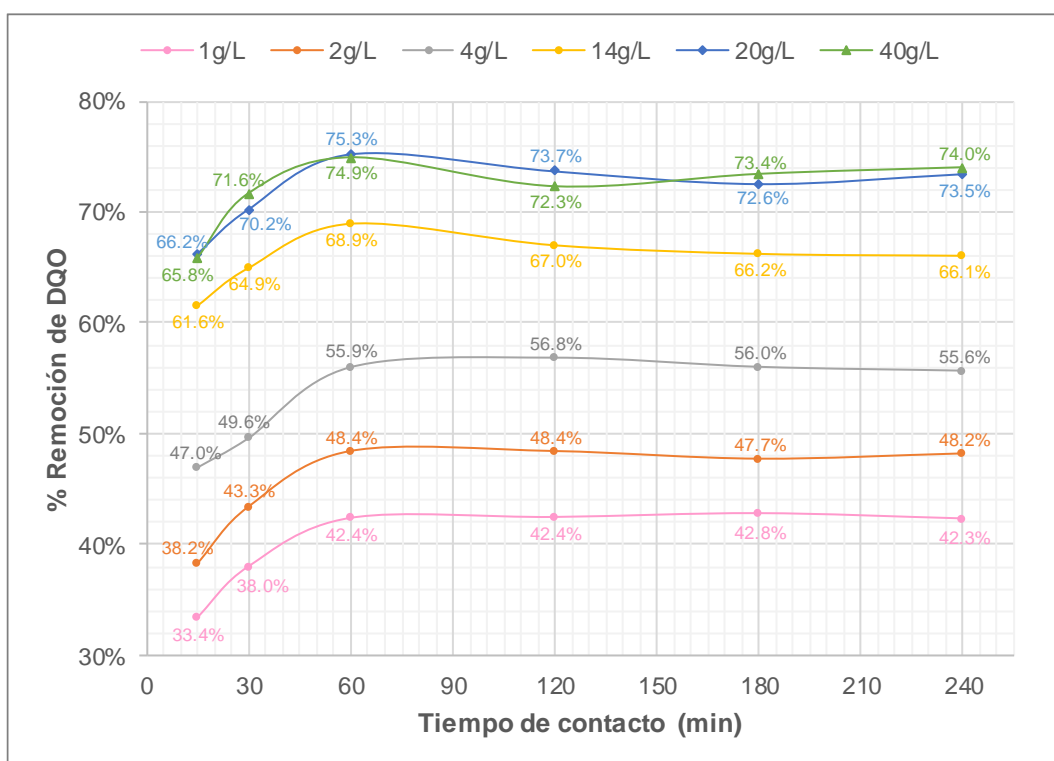


Figura 25: Remoción de DQO total vs. Tiempo de contacto, para 1, 2, 4, 14, 20 y 40 g/L de CARBOSORB PAC 18

La Figura 26 y Figura 27 muestran de forma esquemática la influencia del factor cantidad de CARBOSORB PAC 18 y el factor tiempo de contacto sobre la remoción de materia orgánica en términos de DQO total presente en los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca, donde queda evidenciado que, para las combinaciones estudiadas de estos 2 factores en la presente investigación, todas las remociones alcanzadas se encontraron sobre el 30% y algunas de ellas superaron el 70% (color celeste).

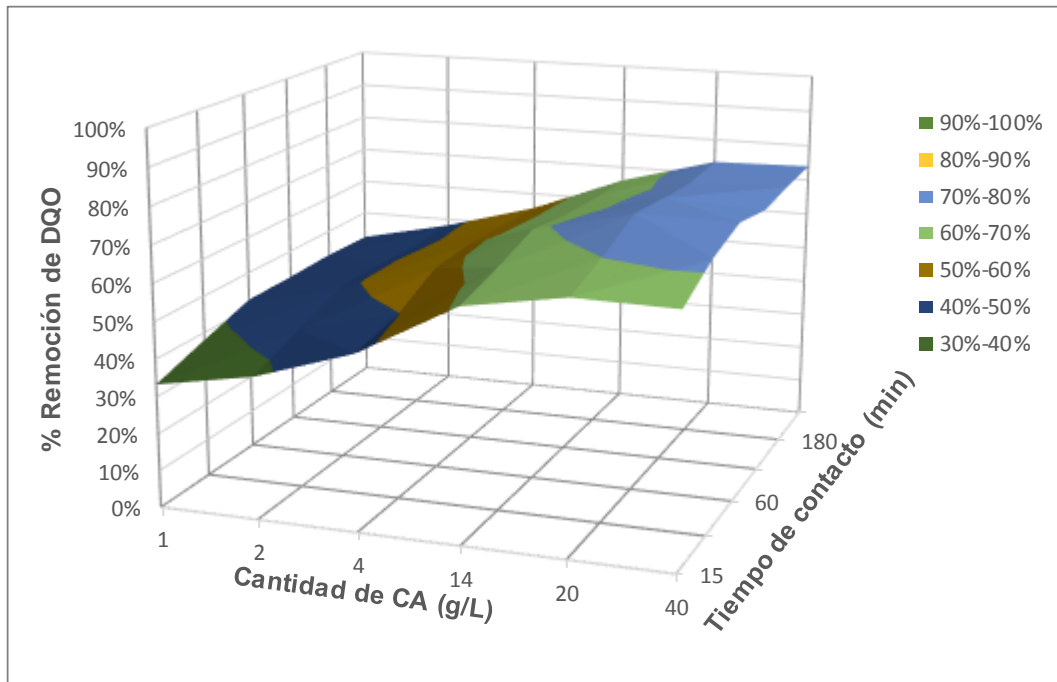


Figura 26: Remoción de DQO total vs. Cantidad de CARBOSORB PAC 18 y Tiempo de contacto – Vista en 3D

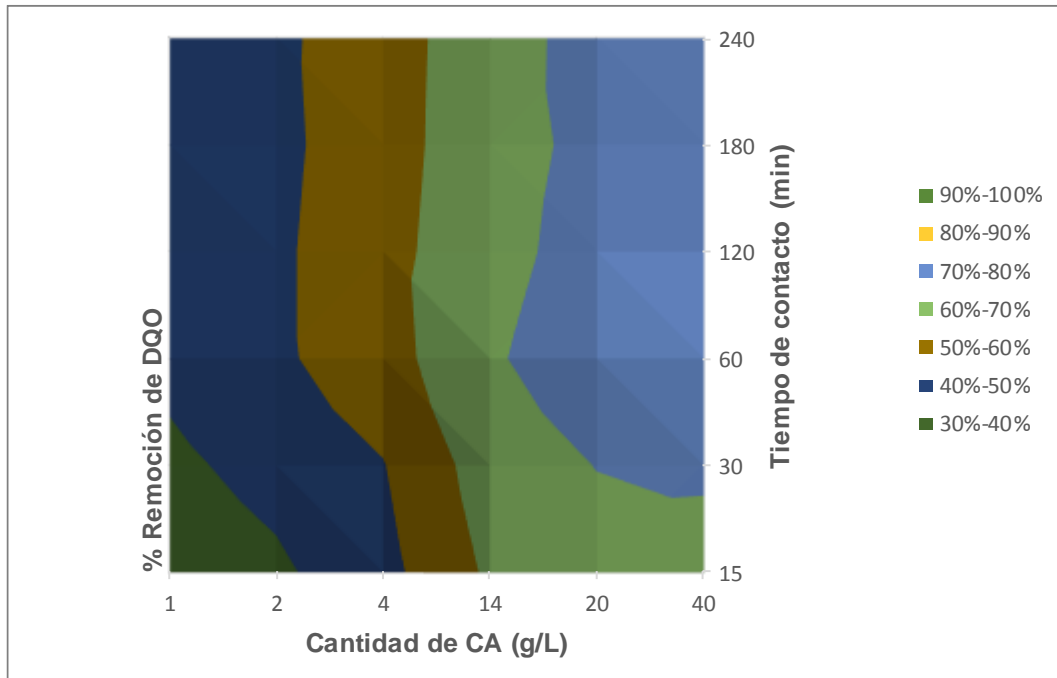


Figura 27: Remoción de DQO total vs. Cantidad de CARBOSORB PAC 18 y Tiempo de contacto – Vista en planta

Tabla 29: Remoción de DQO total en función de la cantidad de CARBOSORB PAC 18 y tiempo de contacto

Remoción DQO		Cantidad de carbón activado (g/L)					
		1	2	4	14	20	40
Tiempo de contacto (min)	240	42.3%	48.2%	55.6%	66.1%	73.5%	74.0%
	180	42.8%	47.7%	56.0%	66.2%	72.6%	73.4%
	120	42.4%	48.4%	56.8%	67.0%	73.7%	72.3%
	60	42.4%	48.4%	55.9%	68.9%	75.3%	74.9%
	30	38.0%	43.3%	49.6%	64.9%	70.2%	71.6%
	15	33.4%	38.2%	47.0%	61.6%	66.2%	65.8%

Como se aprecia en la Tabla 29, las mejores remociones de DQO total fueron obtenidas para un tiempo de contacto de 60 minutos, por lo que se decide hacer el estudio de la isoterma de adsorción a estas condiciones.

5.4. DE LA ISOTERMA DE ADSORCIÓN

El estudio de la isoterma de adsorción entre el CARBOSORB PAC 18 y la materia orgánica medida como DQO total presente los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca en el año 2019, fue realizado con las siguientes condiciones del medio en el afluente: Temperatura y pH promedio de 17.9°C y 8.73, las que no se vieron significativamente afectadas luego del proceso estudiado, presentando en el efluente: Temperatura y pH promedio de 17.4°C y 8.62.

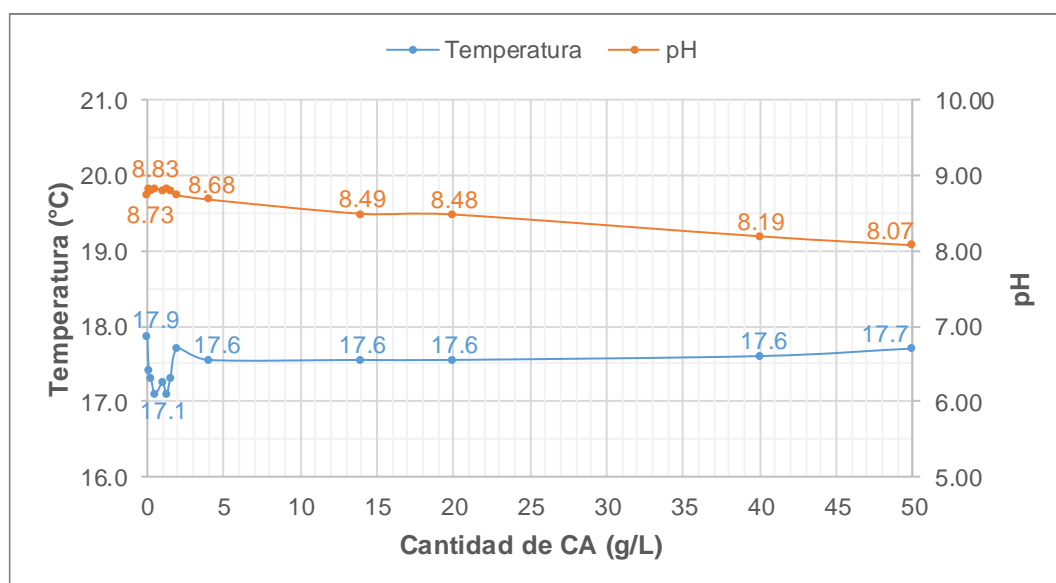


Figura 28: Temperatura y pH vs. Cantidad de CARBOSORB PAC 18

De los resultados obtenidos para la estimación de la isoterma de adsorción, se aprecia en la Figura 29 que se alcanzó una remoción máxima de 76% de DQO total a partir de 20 g/L de CARBOSORB PAC 18, describiendo un comportamiento previsible por lo estudiado en las pruebas anteriores.

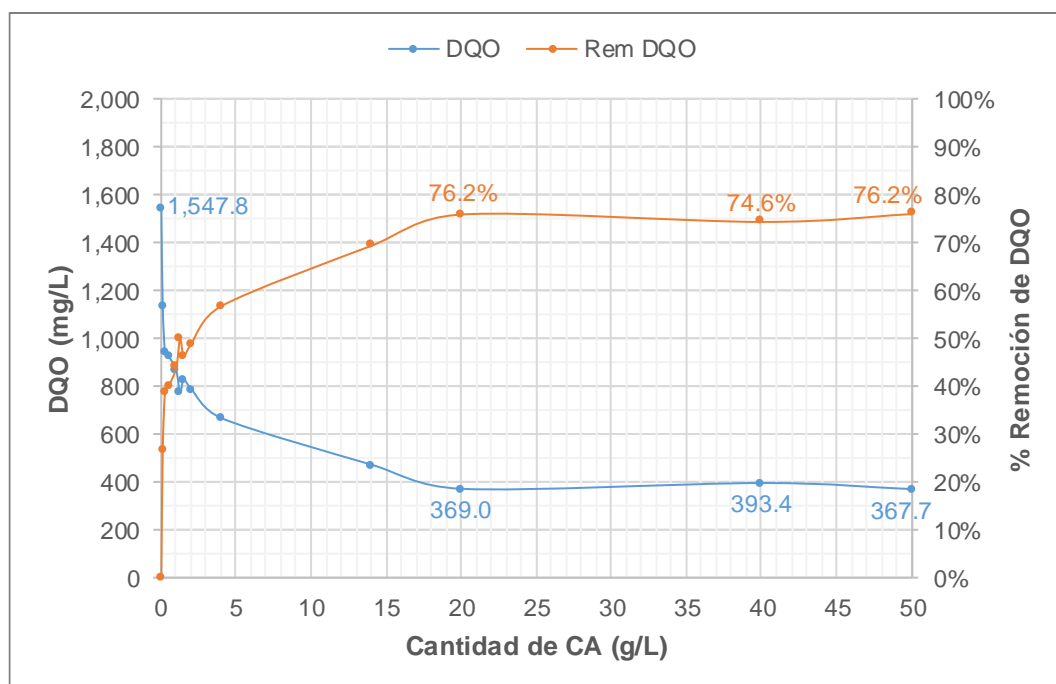


Figura 29: DQO total y su remoción vs. Cantidad de CARBOSORB PAC 18

De los 2 modelos teóricos de isotermas de adsorción evaluados, Freundlich y Langmuir, se establece que:

- ✓ En la Figura 21 y Figura 22, se aprecia que la dispersión de los datos respecto de la línea de tendencia es menor para la isoterma de Freundlich frente a la de la de Langmuir, correspondiéndoles valores de coeficiente de determinación R^2 de 0.94 y 0.80, respectivamente. Al contar con un valor de R^2 mayor y cercano a 1, se establece que la isoterma de Freundlich es la que mejor se ajusta a los resultados experimentales.
- ✓ En la Tabla 26, se presenta la ecuación de la isoterma de adsorción de Freundlich determinada: $x/m = 1.0593 * 10^{-12} * (C_e)^4$, donde "x" es la remoción de DQO o cantidad adsorbida (mg/L), "m" es la cantidad de

CARBOSORB PAC 18 o cantidad de adsorbente (mg/L), y " C_e " la DQO remanente o concentración del adsorbato después de la adsorción (mg/L).

Tabla 30: Isotherma de adsorción de Freundlich para el CARBOSORB PAC 18 y DQO total presente en los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca

Remoción		Ce DQO (mg/L)	x/m	Cantidad de carbón	
(%)	m (mg/L)			x (mg/L)	(g/L)
	Co:	1,547.8			
5.0%	77.39	1,470.4	7.720	10.02	0.01
10.0%	154.78	1,393.0	6.198	24.97	0.02
15.0%	232.16	1,315.6	4.914	47.24	0.05
20.0%	309.55	1,238.2	3.842	80.58	0.08
25.0%	386.94	1,160.8	2.956	130.90	0.13
30.0%	464.33	1,083.4	2.234	207.87	0.21
35.0%	541.72	1,006.0	1.653	327.67	0.33
40.0%	619.11	928.7	1.194	518.32	0.52
45.0%	696.49	851.3	0.839	830.24	0.83
50.0%	773.88	773.9	0.570	1358.48	1.36
55.0%	851.27	696.5	0.371	2292.26	2.29
60.0%	928.66	619.1	0.230	4034.39	4.03
65.0%	1,006.05	541.7	0.134	7516.91	7.52
70.0%	1,083.44	464.3	0.072	15138.69	15.14
72.0%	1,114.39	433.4	0.054	20606.32	20.61
75.0%	1,160.82	386.9	0.034	34009.37	34.01
76.0%	1,176.30	371.5	0.029	40676.70	40.68
80.0%	1,238.21	309.6	0.014	89777.85	89.78

De la isoterma teórica de Freundlich estimada, se obtiene que con 4 g/L de CARBOSORB PAC 18 se alcanzaría una remoción importante de DQO total del 60%, con 7.5 g/L 65%, con 15 g/L 70% y con 20 g/L 72%.

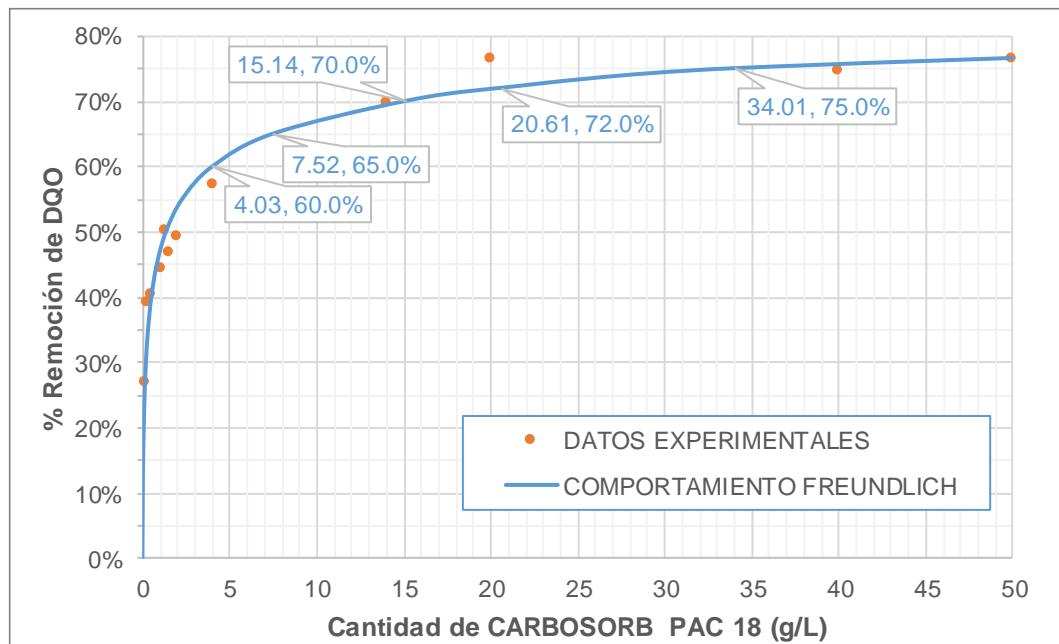


Figura 30: Isoterma de adsorción de Freundlich para el CARBOSORB PAC 18 y DQO total presente en los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca

Por otro lado, se apreció que la remoción de la Turbiedad presentó un comportamiento muy similar al desarrollado por la remoción de DQO total, pero con un nivel máximo de remoción mayor, alcanzando el 95% a partir de 20 g/L de CARBOSORB PAC 18.

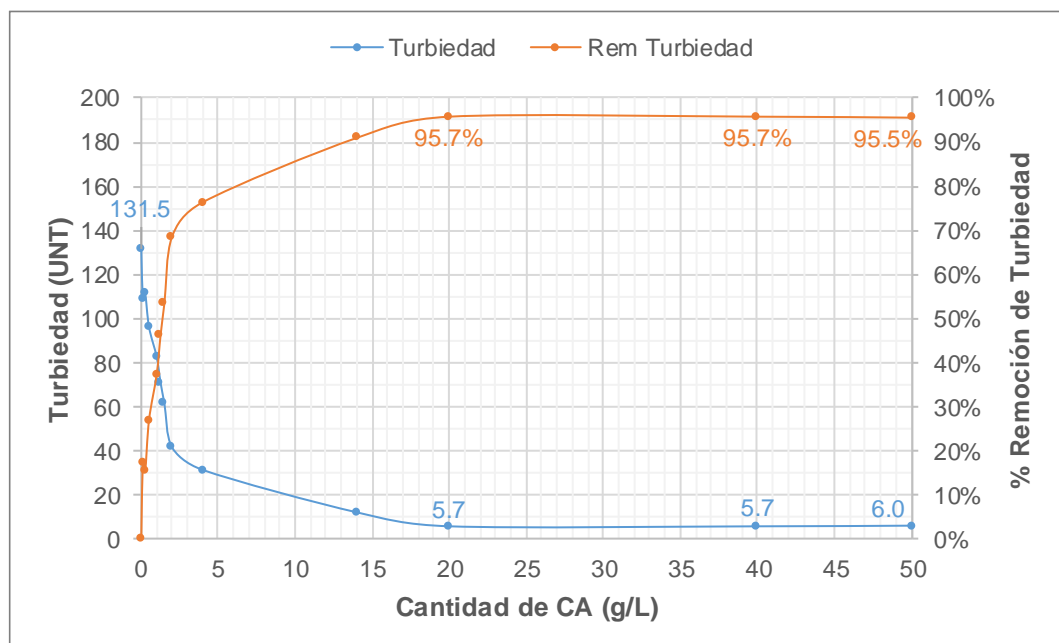


Figura 31: Turbiedad y su remoción vs. Cantidad de CARBOSORB PAC 18

La Figura 20 muestra cualitativamente las remociones alcanzadas durante las pruebas de agitación para la determinación de la isoterma de adsorción, correspondiendo claramente a los valores obtenidos y presentados en la Figura 29 y Figura 31.

5.5. SUMINISTRO DE CARBOSORB PAC 18 PARA LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DE CAJAMARCA

El suministro necesario de carbón activado CARBOSORB PAC 18 para la reducción de la materia orgánica presente en los lixiviados evaluados, mediante adsorción, puede ser estimado a partir de la isoterma de adsorción determinada.

El volumen de lixiviados generados durante el año 2019 fue estimado mediante el Método Suizo y el Método del Contenido de Humedad. Alcanzando casi 12,000 m³ (7,200+4,316), es decir alrededor de 1,000 m³ mensuales.

Tabla 31: Estimación de la generación de lixiviados en el relleno sanitario de Cajamarca en el año 2019

MÉTODO SUIZO		
$V = P \times A \times K$		
Precipitación media anual (P)	720	mm
Área superficial del relleno (A)	40,000	m ²
K (para una compactación de residuos de al menos 0.7 ton/m ³)	0.25 ¹	
Volumen de lixiviados por precipitación (V)	7,200	m³/año
MÉTODO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD		
$L = A_{MO} - A_G - A_R$		
$A_{MO} = \%H_{MO} \times W_{MO}, W_{MO} = \%MO \times W_{RS}$		
$A_G = 0.23 \times (\%T_G \times W_{MOseca}), W_{MOseca} = (100\% - \%H_{MO}) \times W_{MO}$		
$A_R = CC \times W_{RS}, CC = 0.6 - 0.55 [P/(10,000 + P)], P = DC_{RS} \times [A_{RS} \times (H/2)]$		
% de humedad presente en la materia orgánica (%H _{MO})	83.99	%
% de material orgánica (%MO) ²	55.31	%
Peso de los residuos sólidos (W _{RS}) ³	52,000	ton
% de transformación a biogás (%T _G)	80	%
Densidad de compactación de residuos sólidos (DC _{RS})	0.7	ton/m ³

Área de disposición de residuos sólidos (A_{RS}) ⁴	20,000	m ²
Altura de disposición de residuos sólidos (H) ⁵	6	m
Peso de la materia orgánica (W_{MO})	43,675	ton H ₂ O
Peso de la materia orgánica seca (W_{MOseca})	6,992	ton H ₂ O
Peso de sobrecarga a altura media (P)	42,000	ton
Capacidad de campo de los residuos dispuestos (CC)	59.77	%
Cant. de agua como humedad en la materia orgánica (A_{MO})	36,683	ton H ₂ O
Cant. de agua necesaria para la generación de biogás (A_G)	1,287	ton H ₂ O
Cant. de agua retenida en la celda de residuos sólidos (A_R)	31,080	ton H ₂ O
Volumen de lixiviados por humedad de residuos (L)	4,316	m³/año

¹ Valor teórico tomado de la Guía de Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento y Cierre de Rellenos Sanitarios Mecanizados – MINAM, 2011.

² Tomado del % de residuos orgánicos presentes en los residuos sólidos domésticos.

³ Estimado con la cantidad de residuos sólidos municipales del año 2018.

⁴ Aproximación del área que ocuparían los residuos sólidos generados en el año 2019.

⁵ Altura aproximada de 2 plataformas.

Tabla 32: Estimación del suministro mensual de CARBOSORB PAC 18 para la reducción de la materia orgánica presente en los lixiviados del relleno sanitario de Cajamarca

Vol mensual lixiviados	Remoción de DQO total	Cant. PAC18	Cant. mensual PAC18	Costo unitario PAC18	Costo mensual PAC18	Costo mensual por familia
(m3)		(kg/m3)	(kg)	(\$/kg)	(S/.)	(S/.)
1,000	72.0%	20.00	20,000.00	3.50	234,500.00	5.77
1,000	70.0%	15.00	15,000.00	3.50	175,875.00	4.33
1,000	65.0%	7.50	7,500.00	3.50	87,937.50	2.16
1,000	60.0%	4.00	4,000.00	3.50	46,900.00	1.15

En la Tabla 32, se puede apreciar que para alcanzar una remoción importante de DQO total de 60%, se requeriría un suministro mensual de CARBOSORB PAC 18 de aproximadamente 4,000 kg, es decir una inversión de S/. 46,900, lo que significaría S/. 1.15 por familia atendida (40,641 atendidas = 70% de 58,059 totales). Para alcanzar una remoción de 72% será necesario casi quintuplicar la

inversión para el suministro para el 60% de remoción, encareciendo significativamente el sistema.

No se considera la reutilización del carbón activado empleado, pues el CARBOSORB PAC 18 pertenece a la categoría de carbones activados en polvo, cuya regeneración aún no está definida y por ende debería asegurarse el suministro constante del carbón activado.

5.6. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

La hipótesis planteada en la presente investigación fue alcanzar una remoción del 40% de DQO total mediante adsorción con carbón activado, la cual fue comprobada de acuerdo a los resultados obtenidos:

- ✓ En la Figura 23, se aprecia que, de las pruebas de selección del carbón activado, para 8 g/L de CARBOSORB PAC 18 y 60 min de tiempo de contacto, se alcanzó una remoción de 60%, superando el 40% planteado.
- ✓ En la Tabla 29, se aprecia que, de las pruebas de evaluación de la cantidad de CARBOSORB PAC 18 y tiempo de contacto, las remociones en color azul, oro, verde claro y celeste son superiores al 40%, siendo las combinaciones mínimas para alcanzar esta remoción las siguientes: 1g/L y 60 min, 2 g/L y 30 min y, 4 g/L y 15 min. Además, se alcanzó una remoción máxima de 75% con 20 g/L y 60 min, superando ampliamente el 40% planteado.
- ✓ En la Tabla 30, se aprecia que, a partir de la isoterma determinada para 60 minutos de tiempo de contacto, se alcanza el 40% de remoción con 0.52 g/L de CARBOSORB PAC 18, mientras que la remoción de 72% se obtiene con 20 g/L, superando ampliamente el 40% planteado.

5.7. CUMPLIMIENTO DEL MARCO LEGAL

La normativa nacional exhorta a tener en cuenta el cuidado del medio ambiente al realizar cualquier tipo de actividad, en aras del garantizar el bienestar de todos los ciudadanos peruanos. Ésta alcanza, por su puesto, a los lixiviados generados en los rellenos sanitarios del país, por lo que es indispensable investigar diferentes

alternativas para la depuración de materia orgánica que, para la presente investigación, se centra en la DQO total.

A continuación, se comparan los resultados obtenidos con normativa nacional específica: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua – Categoría 3 (Riego de vegetales y bebida de animales), establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM, y Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de PTAR (al no existir LMP para lixiviados), establecidos en el D.S. N° 003-2010-MINAM.

Además, también se realiza la comparación con normativa internacional de referencia: Límites de Emisiones de Lixiviados de Rellenos Sanitarios – Austria, para descarga en un río y para descarga en una red de alcantarillado, establecidos en el Reglamento de Ley Federal sobre la Limitación de Descargas de Lixiviados de Rellenos Sanitarios, 2020.

Tabla 33: Comparación de los Resultados Obtenidos con el Marco Legal Nacional e Internacional de Referencia (Austria)

Parámetro		Efluente (*)			PERÚ		AUSTRIA	
		Prom	Mín	Máx	ECA	LMP PTAR	LDR	LDRA
Temp	°C	17.4	17.1	17.7	-	< 35	-	< 35
pH	-	8.62	8.07	8.83	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-9.5
DQO	mg/L	-	369.0	1,134.9	40	200	50	300

LELRS: Límites de Emisiones de Lixiviados de Rellenos Sanitarios. LDR: Límites para Descarga en un Río. LDRA: Límites para Descarga en una Red de Alcantarillado.

(*) De las pruebas para determinación de la isoterma.

Al comparar el efluente con los ECA y LDR, se aprecia lo siguiente:

- ✓ El pH promedio obtenido en el efluente fue 8.62, no cumpliendo con el rango de 6.5 a 8.5 establecido para el parámetro de pH en los ECA y LDR.
- ✓ La DQO mínima obtenida en el efluente fue 369.0 mg/L y la máxima 1,134.9 mg/L, no cumpliendo con el valor máximo de 40 mg/L establecido para el parámetro de DQO en los ECA, ni con el valor de 50 mg/L que señala los LDR. Sin embargo, se obtuvo una remoción importante de 76% y para lograr cumplir con los valores máximos establecidos podría plantearse un proceso

adicional posterior que permita alcanzar el nivel de remoción necesario, pudiendo éste emplear la misma tecnología, otra similar o avanzada. Además, considerar un pretratamiento adecuado también contribuiría a obtener mejores remociones.

Al comparar el efluente con los LMP de PTAR y los LDRA, se aprecia lo siguiente:

- ✓ La Temperatura promedio obtenida en el efluente fue 17.4°C, cumpliendo con el valor máximo de 35°C establecido para el parámetro de Temperatura en los LMP de PTAR y LDRA.
- ✓ El pH promedio obtenido en el efluente fue 8.62, no cumpliendo con el rango de 6.5 a 8.5 establecido para el parámetro de pH en los LMP de PTAR, pero sí cumpliendo con el rango de 6.5 a 9.5 señalado en los LDRA.
- ✓ La DQO mínima obtenida en el efluente fue 369.0 mg/L y la máxima 1,134.9 mg/L, no cumpliendo con el valor máximo de 200 mg/L establecido para el parámetro de DQO en los LMP de PTAR, ni con el valor de 300 mg/L que señala los LDRA. Sin embargo, se obtuvo una remoción importante de 76% y para lograr cumplir con los valores máximos establecidos podría plantearse un proceso adicional posterior y un pretratamiento adecuado.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

- 1) El proceso de adsorción con carbón activado CARBOSORB PAC 18, permite reducir la materia orgánica presente en los lixiviados generados en el relleno sanitario de Cajamarca, alcanzando una remoción de hasta 75% de DQO total.
- 2) Se superó el porcentaje de reducción de materia orgánica planteada en la hipótesis de la investigación. Se obtuvo hasta un 75% de remoción de DQO total mediante adsorción con carbón activado, superior al 40% fijado en la hipótesis.
- 3) Los lixiviados generados en el relleno sanitario de Cajamarca durante la época seca del año 2019 presentaron valores de 1,605.3 mg/L para DQO total, 141.1 UNT para Turbiedad, 18.1°C para Temperatura, 8.80 para pH y 243.0 mg/L para DBO₅ total, con un IB de 0.14; clasificándose, según la edad de 9 años y la composición que presentan, como lixiviados intermedios, los que requieren de procesos fisicoquímicos como la adsorción con carbón activado, para la depuración de la materia orgánica que posee, la que es principalmente no biodegradable.
- 4) El carbón activado CARBOSORB PAC 18, que proviene de carbón vegetal (madera), activado mediante procesos químicos (con ácido fosfórico), particulado en polvo y es comercializado por Mercantil S.A., presentó buena afinidad con la materia orgánica medida como DQO total presente en los lixiviados evaluados, y mejor capacidad adsortiva frente a los carbones activados CARBOSORB PAC 19 y CARBOSORB GAC 23.
- 5) A mayor cantidad de carbón activado CARBOSORB PAC 18 y a mayor tiempo de contacto, se obtienen mejores remociones de DQO total presente en los lixiviados evaluados mediante adsorción con carbón activado, estabilizándose el nivel de remoción máxima a partir de 20 g/L de CA y TC de 60 min.
- 6) Para 20 g/L de CARBOSORB PAC 18, se alcanzó una remoción de DQO total de 66% para el TC de 15 min, se alcanzó 70% para el TC de 30 min,

75% para el TC de 60 min, y 73% para los TC de 120, 180 y 240 min. Para 60 min de tiempo de contacto, se alcanzó una remoción de DQO total de 42% para 1 g/L de CARBOSORB PAC 18, se alcanzó 48% para 2 g/L de CA, 56% para 4 g/L de CA, 69% para 14 g/L, y 75% para 20 y 40 g/L. Siendo 75% la reducción de materia orgánica máxima obtenida para 20 g/L de CARBOSORB PAC 18 con 60 minutos de tiempo de contacto.

- 7) Acorde a la investigación realizada por Méndez R. et al. (2002), para lixiviados con DQO total inicial de 5,764 mg/L e IB de 0.29, mediante adsorción se alcanzó una remoción de 40% con 50 g/L de CA granular y 1 hora de TC; según Eljaiek M. et al. (2013), para lixiviados con DQO total inicial de 2,080 mg/L e IB de 0.16, se obtuvo 73% de remoción con 40 g/L de CA granular y 15 horas de TC; por otro lado, acorde a Sah F. et al. (2015), para lixiviados con DQO total inicial de 10,204.7 mg/L, se obtuvo 72% con 60 g/L de CA granular y 24 horas de TC; mientras que en la presente investigación, para lixiviados con DQO total inicial de 1,605.3 mg/L e IB de 0.14, se alcanzó una remoción de 75% con 20 g/L de CA en polvo y 1 hora de TC. Justificándose por la clasificación de los lixiviados evaluados, lixiviados de mayor edad contarán con menor cantidad de materia orgánica a remover y ésta será en su mayoría refractaria afín a procesos fisicoquímicos; además el tipo de carbón activado empleado determinará la superficie disponible para la adsorción de la materia orgánica, la cual es superior para CA en polvo.
- 8) El modelo teórico de isoterma de adsorción de Freundlich es el que mejor se ajusta al proceso de adsorción desarrollado entre el CARBOSORB PAC 18 y la materia orgánica medida como DQO total presente en los lixiviados evaluados, con un R^2 de 0.94, siendo su ecuación para un TC de 1 hora y condiciones de medio en el afluente de Temperatura y pH promedio de 17.9°C y 8.73, la siguiente: $x/m = 1.0593 * 10^{-12} * (C_e)^4$, donde "x" es la remoción de DQO (mg/L), "m" es la cantidad de CARBOSORB PAC 18 (mg/L), y " C_e " la DQO remanente (mg/L). Con esta ecuación, se determinó la remoción teórica de DQO total de 60% con 4 g/L de CARBOSORB PAC18, 65% con 7.5 g/L, 70% con 15 g/L y 72% con 20 g/L.

- 9) El volumen estimado de lixiviados generados en el relleno sanitario de Cajamarca en el año 2019 fue 1,000 m³/mes, lo que según la isoterma determinada significaría un requerimiento mensual de 4,000 kg de CARBOSORB PAC 18 para obtener una remoción importante de 60% de DQO total, es decir una inversión mensual de S/. 46,900 en el suministro del carbón activado, siendo equivalente a S/ 1.15 por familia atendida. Por tratarse de un carbón activado en polvo, no se considera su regeneración y se requiere de un suministro constante, lo que constituye la principal desventaja de la alternativa evaluada.
- 10) El efluente del proceso de adsorción con carbón activado CARBOSORB PAC 18 no cumple el valor máximo de 40 mg/L de DQO total definido en los ECAS para Agua – Categoría 3, ni con el valor máximo de 200 mg/L establecido en LMP para PTAR; sin embargo, ya que se alcanzaron remociones importantes de DQO total, se espera cumplir con el marco legal vigente luego de un proceso adicional de tratamiento, pudiendo emplear la misma tecnología, otra similar o avanzada, así como considerar un pretratamiento adecuado.
- 11) Pueden plantearse las siguientes alternativas como línea de tratamiento:
- I: Cribas + Sedimentador + 1° Reactor de contacto (adsorción con carbón activo en polvo) con filtro (recuperación del carbón) + 2° Reactor de contacto con filtro.
- II: Cribas + Sedimentador + Reactor de contacto con filtro + Columna de adsorción (carbón activo granular).
- III: Cribas + Sedimentador + Reactor de contacto con filtro + Reactor Fenton (oxidación química).
- IV: Cribas + Sedimentador + Reactor de contacto con filtro + Nanofiltración u Ósmosis inversa.

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

- 1) Ser muy cuidadoso con el manejo de los lixiviados mientras se trabaje con él ya que son líquidos altamente contaminantes, debe usarse un kit de protección personal en todo momento.
- 2) Desarrollar una caracterización más completa y constante de los lixiviados a evaluar, pues la composición va cambiando según la edad del relleno sanitario y las estaciones del año.
- 3) Evaluar el proceso de adsorción con carbones activados fabricados en la zona; además, debido a que el carbón activado es un material costoso, se recomienda buscar materias primas alternativas para su fabricación en aras de reducir la inversión en el suministro del carbón activado, pudiendo éstas ser recicladas de entre los residuos de la zona.
- 4) Evaluar la influencia del parámetro velocidad de agitación para definir valores óptimos, de modo que se logre alcanzar la condición de equilibrio y no se incremente la tasa de desorción; además, con la velocidad de agitación óptima podría reducirse el requerimiento de suministro eléctrico a lo mínimo necesario.
- 5) Determinar las diferentes isothermas de adsorción para diferentes condiciones de medio, es decir distintos rangos de temperatura, acorde a las condiciones climáticas de la zona, y pH.
- 6) Evaluar las remociones en términos de DQO soluble y DQO particulada para verificar la eficiencia del proceso sobre ambas fracciones de materia orgánica.
- 7) Evaluar la incidencia que podría tener la filtración con papel Whatman N° 40 empleada para separación del carbón, sobre la remoción de materia orgánica estudiada en la presente investigación.
- 8) Estudiar cada una de las alternativas de línea de tratamiento descritas en la conclusión N° 11.

CAPÍTULO VIII: REFERENCIAS

- 1) American Public Health Association – APHA (2017), **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 23rd Edition, Washington D.C. – United States.
- 2) AGQ PERÚ S.A.C. (2017), **Informe de Ensayo SAA-17/00376**, AQUA FIRE S.A.C., Lima – Perú.
- 3) Bagchi A. (2004), **Design of Landfills and Integrated Solid Waste Management**, 3rd Edition, New York – United States.
- 4) Benavides L. y Posada R. (2004), **Remoción de Color de los Lixiviados del Relleno Sanitario La Esmeralda por Adsorción sobre Carbón Activado**, Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia – Colombia.
- 5) Bodalo A., Hidalgo M., Gómez M., Murcia M. y Marín V. (2007), **Tecnologías de Tratamiento de Lixiviados de Vertedero: Tratamientos Convencionales**, Artículo de Revista de Ingeniería, Departamento de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de los Murcia, Murcia – España.
- 6) Bolívar G. (2010), **Obtención de Adsorbentes Lignocelulosos con Alta Capacidad de Adsorción de Metales Pesados por Modificación Química**, Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas – Venezuela.
- 7) Cecen F. and Aktas O. (2011), **Activated Carbon for Water and Wastewater treatment: Integrations of Adsorption and Biological Treatment**, 1st Edition, Weinheim – Germany.
- 8) Corena M. y Guerra D. (2008), **Sistemas de Tratamiento para Lixiviados Generados en Rellenos Sanitarios**, Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Sucre – Colombia.
- 9) Eljaiek M., Torres L. y Bermúdez W. (2013), **Alternativas de Tratamiento de Lixiviados Aplicables al Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma**

- de Los Cocos**, Proyecto de Investigación, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cartagena – Colombia.
- 10) Franceschi M. y Guerra M. (2015), **Estudio de Agotamiento de columnas de Carbón Activado Granular Usadas para el Manejo de un Lixiviado Previamente Tratado Mediante Procesos de Oxidación Avanzada**, Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cartagena – Colombia.
 - 11) Giraldo E. (2001), **Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes**, Artículo de Revista de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá – Colombia.
 - 12) Lutfi M. y Hernández A. (2003), **Investigación Relativa a la Minimización de Lixiviados en Vertederos y su Depuración**, Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid – España.
 - 13) Méndez R., Medina E., Quintal C., Castillo E. y Sauri M. (2002), **Tratamiento de Lixiviados con Carbón Activado**, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán – México.
 - 14) Metcalf & Eddy (2003), **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**, 4th Edition, New York – United States.
 - 15) Metcalf & Eddy (2014), **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery**, 5th Edition, New York – United States.
 - 16) Ministerio del Ambiente – MINAM (2011), **Guía de Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento y Cierre de Relleno Sanitario Mecanizado**, Red de Instituciones Especializadas en Capacitación para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos, Lima – Perú.
 - 17) Municipalidad Provincial de Cajamarca (2008), **Memoria Descriptiva del Expediente de Obra de la Infraestructura para Tratamiento y Disposición Final de Residuos Sólidos del Ámbito de la Gestión Municipal**, Subgerencia de Limpieza Pública y Ornato Ambiental de la Gerencia de Desarrollo Ambiental, Cajamarca – Perú.

- 18) Municipalidad Provincial de Cajamarca (2014), **Estudio de Caracterización de los Residuo Sólidos Municipales en la Ciudad de Cajamarca**, Subgerencia de Limpieza Pública y Ornato Ambiental de la Gerencia de Desarrollo Ambiental, Cajamarca – Perú.
- 19) Municipalidad Provincial de Cajamarca (2019), **Expediente de Operación y Mantenimiento Modificado del Subsistema de Disposición Final Segura de Residuos Sólidos Municipales y Biomédicos de la Ciudad de Cajamarca**, Subgerencia de Limpieza Pública y Ornato Ambiental de la Gerencia de Desarrollo Ambiental, Cajamarca – Perú.
- 20) Organización Panamericana de la Salud – OPS, Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – AIDIS, Banco Interamericano de Desarrollo – BID y Gobiernos de los países de la Región (2010), **Informe de Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y El Caribe**, Washington D.C. – United States.
- 21) Peláez A. (2013), **Alternativas de Solución para el Tratamiento de Efluentes Textiles**, Investigación, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Puebla – México.
- 22) Pilamonta J. (2013), **Mejoramiento del Carbón Activado Contaminado en el Tratamiento del Agua Potable**, Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Central del Ecuador, Quito – Ecuador.
- 23) Quintana D., Gortáres P., Drogui P., Estrada M. y Villa M. (2010), **Tecnologías Electroquímicas como Alternativas en el Tratamiento de Aguas Contaminadas: Adsorción por Carbón Activado**, Artículo de Ide@s CONCYTEG, Guanajuato – México.
- 24) Renou S. (2007), **Landfill Leachte Treatment: Review and Opportunity**, Article of Journal of Hazardous Materials, Marseille – France.
- 25) Saah F. y Eljaiek M. (2015), **Cinética del Carbón Activado Granular en el Tratamiento del Lixiviado del Relleno Sanitario “Loma de Los Cocos”**

en la Ciudad de Cartagenan, Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cartagena – Colombia.

- 26) Wiszniowski J., Robert D., Surmacz-Gorska J., Miksch K. and Weber J. (2006), **Landfill leachate treatment methods: A Review**, Article of Environmental Chemistry Letters, Berlin – Germany.
- 27) Weber W. (2003), **Physicochemical Processes for Water Quality Control**, 3rd Edition, New York – United States.

CAPÍTULO IX: ANEXOS

9.1. ANEXO A: REPORTES DE RESULTADOS ZEDERLAB S.A.C.

Resultados de DBO₅ emitidos por ZEDERLAB S.A.C.:

Ensayo	Método	L.C	Unidades
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part -5210 B 23nd Ed.2017. Biochemical Oxygen Demand (BOD)	2.00	mg/L



L.C.: límite de cuantificación.

II. RESULTADOS

Producto declarado	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual
Matriz analizada	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual
Fecha de muestreo	2019-06-27	2019-06-27	2019-06-27
Hora de inicio de muestreo(h)	11:30	11:30	11:30
Condiciones de la muestra	Refrigerada	Refrigerada	Refrigerada
Código del Cliente	m1	m2	m3
Código del Laboratorio	19010143	19010144	19010145
Ensayo	Unidad	Resultados	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	243.7	229.5 255.8

L.D.M.: límite de detección del método.

Lima, 5 de julio del 2019


 José David Granada Romero
 CEO Director Ejecutivo


9.2. ANEXO B: CARACTERIZACIÓN DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DE CAJAMARCA – 2017

Estudio		SAA-17/00376		Tipo Muestra: Agua Residual Industrial	
RESULTADOS ANALITICOS					
Nº de Referencia		A-17/014097			
Descripción		L-01			
Parámetro	Incert	Unidades			
Parámetros Físico-Químicos					
3	Color	± 13 %	CU	> 100	
3	DBO5	± 12 %	mg/L	231	
3	DQO	± 11 %	mg/L	2 162	
3	Sólidos Totales Disueltos	± 7 %	mg/L	8 010	
3	Sólidos Totales en Suspensión (TSS)	± 11 %	mg/L	146	
3	Turbidez	± 9 %	NTU	214	
Metales Totales					
2	Aluminio Total	± 10 %	mg/L	0,659	
2	Antimonio Total	± 10 %	mg/L	0,00407	
2	Arsénico Total	± 14 %	mg/L	0,07569	
2	Bario Total	± 10 %	mg/L	0,1909	
2	Berilio Total	± 15 %	mg/L	0,00005	
2	Bismuto Total	± 18 %	mg/L	< 0,00001	
2	Boro Total	-	mg/L	1,11	
2	Cadmio Total	± 10 %	mg/L	0,00029	
2	Calcio Total	± 8 %	mg/L	127	
2	Cerio Total	± 8 %	mg/L	0,00157	
2	Cobalto Total	± 16 %	mg/L	0,02592	
2	Cobre Total	± 15 %	mg/L	0,0081	
2	Cromo Total	± 15 %	mg/L	0,264	
2	Estaño Total	± 10 %	mg/L	0,0101	
2	Estroncio Total	± 12 %	mg/L	0,56833	
2	Fósforo Total	± 17 %	mg/L	6,28	
2	Hierro Total	± 9 %	mg/L	4,6	
2	Litio Total	± 18 %	mg/L	0,0528	
2	Magnesio Total	± 14 %	mg/L	105	
2	Manganeso Total	± 15 %	mg/L	0,25805	
2	Mercurio Total	± 15 %	mg/L	< 0,00007	
2	Molibdeno Total	± 11 %	mg/L	0,04410	
2	Níquel Total	± 17 %	mg/L	0,0785	
2	Plata Total	± 14 %	mg/L	< 0,00006	
2	Plomo Total	± 16 %	mg/L	0,00456	
2	Potasio Total	± 13 %	mg/L	> 1 000	
2	Selenio Total	± 14 %	mg/L	0,00647	
2	Sodio Total	± 15 %	mg/L	> 1 000	
2	Talio Total	± 14 %	mg/L	0,00002	
2	Titanio Total	± 8 %	mg/L	0,0888	
2	Torio Total	± 11 %	mg/L	0,00061	
2	Uranio Total	± 11 %	mg/L	0,00030	
Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como un certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.					
AGQ PERU, S.A.C. Av. Santa Rosa 511 La Perla - Callao Lima, PERU T: (511) 710 27 00 F: (511) 718 30 94 operacionesperu@agq.com.pe www.agqlabs.pe					

9.3. ANEXO C: FICHAS TÉCNICAS DE LOS CARBONES ACTIVADOS EVALUADOS

Ficha Técnica del CARBOSORB PAC 18:



Magnatrade International Corp.



Carbosorb® PAC 18
POWDERED ACTIVATED CARBON

Carbosorb® PAC 18 is a powdered activated carbon chemically manufactured by the phosphoric acid process. It is made of wood. This powdered activated carbon combines a high adsorptive capacity with excellent filtration characteristics. Great performance adsorbing high molecular organics and large color bodies. The Carbosorb® PAC 18 offers excellent adsorption properties and it is recommended for sugar decoloration process, glycerins fat, wax, oil, ester, galvanoplasty, organic products, sodium carbonate.

Product Specifications

Iodine Number mg/g	950 min
Molasses adsorption rate %	100 min
Moisture, % as packed	10 max
Substances soluble in acid %	3 max
Substances soluble in alcohol %	0.5 max
PH	2.0 – 3.5
Iron content, %	0.1 max
Ash content, %	7 max
Particle size	less than 100 mesh = 99 % min less than 200 mesh = 95 % min less than 325 mesh = 75 % min

Analysis Methodologies
ASTM, AWWA, CEFIC, DIM and methodologies of our own. Our activated carbons attend to the FCC (Food Chemical Codex – 3rd – food industry index).

Packaging
Standard package is polyethylene/kraft bags, 20 kg each.
Other packaging is available. Please consult our specialists.

General uses
Decoloration of sugar solutions in the beverage industry.
Decoloration of refined sugar liquors, lactic acid, monosodium glutamate, organic acid, caffeine.
Treatment of intermediate process flows in beer production.
Removal of color bodies in water and waste applications.
Decoloration of alcohols and edible oils.

Safety Message: Wet activated carbon removes oxygen from air. In closed or partially closed containers and vessels, oxygen depletion may reach hazardous levels. If workers are to enter a vessel containing carbon, appropriate sampling and work procedures for potential low-oxygen spaces should be followed.

Doc. 280502
Rev. 04.06.2012

Ficha Técnica del CARBOSORB PAC 19:

**CARBON ACTIVADO EN POLVO CARBOSORB PAC 19**

CARBON ACTIVADO EN POLVO CARBOSORB PAC 19 es un carbón activado en polvo de origen vegetal, activado por el vapor de altas temperaturas. Ofrece excelentes características de absorción.

CARBON ACTIVADO EN POLVO CARBOSORB PAC 19 es recomendado para el tratamiento de agua para el consumo humano.

Especificaciones del producto

Origen	Vegetal
Granulometría	
-Malla 100 mesh,%	99%min
-Malla 200 mesh,%	98%min
-Malla 325 mesh,%	92%min
Índice de Yodo, mg/gr	>500
Humedad %	8% máx.
Densidad Aparente ,g/cc	0.25-0.75 máx.

Aplicación

Uso para tratamiento de agua para el consumo humano, tratamiento de aguas municipales.

Almacenamiento-Empacado

Debe almacenarse en un lugar seco y evitar el contacto del producto con oxidantes fuertes. El producto es envasado en bolsas de 20 Kg.


Salud-Seguridad

El carbón activado húmedo retira el óxido del aire. En recipientes cerrados o parcialmente cerrados, el agotamiento del oxígeno puede alcanzar niveles peligrosos. Si el personal realiza trabajos en lugares cerrados donde se encuentra el carbón se deberá seguir los procedimientos de trabajo para espacios con bajo nivel de oxígeno.


R. 2016/07/27
V.2



Ficha Técnica del CARBOSORB GAC 23:



carbosorb



Magnatrade Corp.

Carbosorb® GAC 23
GRANULAR ACTIVATED CARBON

Carbosorb® GAC 23 is a bituminous coal activated carbon to produce a durable granular product capable of withstanding the abrasion associated with repeated backwashing, air scouring and hydraulic transport for the removal of taste and odor compounds and dissolved organic compounds in potable water treatment.


Product Specifications

Iodine Number	950 mg/g
Moisture, weight %	8 max. %
Screen Size, U.S. Sieve Series, weight %	%
Larger than No. 12	6 max.
Smaller than No. 40	4 max.
Ash, weight %	13 max.
Apparent Density	0.50 g/cc max.
Abrasion Number	80% min.
pH	8-11
Effective Size	0.70 mm
Uniformity Coefficient	1.7 max.
Lead (Pb)	≤ 1 ug/l
Arsenic (As)	≤ 2 ug/l
Copper (Cu)	≤ 25 mg/l
Chlorides (Cl)	≤ 0.53 %
Sulfated Ash % (determined on 1.0g)	≤ 5% max.
Total Ash	≤ 15 % w/w
Total Sulfides % (in water extractable)	≤ 10 mg/kg
Cyanogen Compounds	Pass FCC Test
Extractables water substances	< 3%

Features

- Coal is pulverized and re-agglomerated with suitable binder.
- The activation method for coal based granular activated carbon for potable water is Steam Activation.
- Adsorption capacity allows for effective removal of organic contaminants, taste, and odor.
- Bituminous coal base produces a product with high hardness ensuring excellent resistance to abrasion.
- Product mesh size allows for limited pressure drop.
- Provides filtration and adsorption

Dx: 6010645
Rw 28.09.17





Magnatrade Corp.



General uses

Carbosorb® GAC 23 is used in the following applications:

- Water treatment systems to remove chlorine, dissolved organics and turbidity.
- Is highly efficient dechlorination media.
- Other Industrial applications where removal of organics is required.
- Elimination of Trihalomethanes (THMs) of the water treatment process.
- Because of their superior filtration/adsorption properties, they are applicable for potable and industrial water treatment as well as for municipal and industrial wastewater.

Packaging

Standard package is polyethylene/kraft bags, 25 kg each.

Other packaging is available, Please consult our specialists.

Safety Message: Wet activated carbon removes oxygen from air. In closed or partially closed containers and vessels, oxygen depletion may reach hazardous levels. If workers are to enter a vessel containing carbon, appropriate sampling and work procedures for potential low-oxygen spaces should be followed.

Doc. 601045
Rev 29.09.17



9.4. ANEXO D: COTIZACIÓN DE LOS CARBONES ACTIVADOS EVALUADOS



R.U.C. 20100312736
PROFORMA
N° 45110924

Lima, 22 de junio de 2.019

Sr.(es) CL01977 AQUA & FIRE S.A.C

AV. GERARDO UNGER NRO. 193 INT. 230 URB. INGENIERIA (IFIC. 230, PUENTE DE LA UNI) LIMA SAN MARTIN DE PORRES

Fax:

Att. Sr. Ulises Pillaca Ugarte

Muy señores nuestros

Por medio de la presente nos es grato poner a su consideración la siguiente cotización sujeto a venta previa

PRODUCTO	DESCRIPCIÓN	UM	CANTIDAD	PUNIT	%DESC	PRECIO	SUBTOTAL
2002551	CARBON CARBOSORB PAC 18. Envases: 1.00 BOLSAS X 20 KG	KG	20.00	3.50000		3.50000	70.00
2002552	CARBON CARBOSORB PAC 19. Envases: 1.00 Bolsa x 20kg	KG	20.00	3.50000		3.50000	70.00
2002481	CARBON CARBOSORB GAC 23. Envases: 1.00 BOLSAS X 25 KG	KG	25.00	3.80000		3.80000	95.00
						SUBTOTAL	US\$ 235.00
						I.G.V.	42.30
						TOTAL	US\$ 277.30

Proveedor Item 1y3:

MAGNATRADE CORP.
ORIGEN : CHINA

Proveedor Item 2:

HANGZHOU HRNGXING
ACTIVATED CARBON CO. LTD
ORIGEN : CHINA

Pago: CONTADO

BCO. CREDITO

CTA. CTE. MN: 194-0626375-0-19
CTA. CTE. ME: 194-0730770-1-24

BCO. SCOTIABANK

CTA. CTE. MN: 000-1095315
CTA. CTE. ME: 000-0453535

Entrega: Por la cantidad cotizada en sus Almacenes en Lima

Nota : Gustosamente atenderemos cualquier información adicional sobre el particular y en espera que la presente cotización merezca su aprobación nos reiteramos.

Muy Atentamente

Vendedor: JUAN CASTRO

SILVIA SUMA BADAJOZ
Gerente Comercial Aguas e Industria

Jr. Santorin N. 243, Urb. El Vivero Lima - Peru Santiago de Surco Teléfono: 618-1616 434-2727 Fax: 618-1617

ventas@mercantil.com.pe