

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO
ROMERILLOS, CANTÓN MEJÍA**

**EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LAS OPERACIONES
UNITARIAS**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
AMBIENTE**

JORGE HERNÁN JÁCOME TAMAYO

DIRECTOR: CRISTINA ALEXANDRA TORRES JACOBOWITZ

DMQ, 11 de septiembre del 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Jorge Hernán Jácome Tamayo declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Jorge Jácome

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JORGE HERNÁN JÁCOME TAMAYO, bajo mi supervisión.

Cristina Torres
DIRECTOR

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

NOMBRE_REVISOR1
REVISOR1 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

NOMBRE_REVISOR2
REVISOR2 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Jorge Jácome

Ing. Cristina Torres

NOMBRE_COLABORADOR(ES)

DEDICATORIA

A mi familia por brindarme apoyo incondicional y esperanza durante toda mi vida, a mi madre, pilar fundamental en esta ardua travesía, a mis tíos Luis, Chely, Guille, Angelita que siempre supieron guiarme por el camino del bien. A mis primos, Vero, Luis Felipe, Santy y mi hermana María José por darme ánimos para culminar esta hermosa carrera.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a la vida por presentarme a personas fenomenales a lo largo de mi estadía en tan prestigiosa institución.

A mis amigos Lizbeth, Lisseth, Christian, Joselyn, Emi, por darme la mano cuando más lo necesitaba, agradezco a Dios por nuestra amistad.

A mi compañera de proyecto y amiga, Brenda, por aventurarse junto a mi en la elaboración de este tema.

Un especial agradecimiento a mi tutora, la Ing. Cristina Torres por haberme brindado su apoyo, ánimos, conocimiento y paciencia a lo largo de la elaboración de este proyecto de titulación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN	VI
ABSTRACT.....	VII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Relleno sanitario	5
1.4.2 Etapas de la generación de biogás y composición de los lixiviados.....	9
1.4.3 Características físico químicas de los lixiviados.....	11
1.4.4 Relación de biodegradabilidad	19
1.4.5 Tratamientos biológicos	19
1.4.6 Tratamientos físico químicos	23
1.4.7 Coagulación-floculación	25
1.4.8 Normativa ambiental	31
1.4.9 Filtración por membranas.....	32
2. METODOLOGÍA.....	34
2.1 Caracterización de lixiviados	34
2.2 Prueba de jarras.....	43
2.2.1 Preparación de las soluciones madre o estándar	43
2.2.2 Velocidad angular de la prueba de jarras	43
2.2.3 Réplica de la dosificación del Relleno sanitario de Romerillos	44
2.2.4 Replica dosificación tesis	45
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
3.1 Resultados	52
3.2 Propuestas de mejora.....	59
3.3 Conclusiones.....	61
3.4 Recomendaciones	63
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
5. ANEXOS.....	70

RESUMEN

El relleno Sanitario de Romerillo se encuentra ubicado en el límite divisional entre las provincias de Pichincha y Cotopaxi y es el encargado de recibir 60 toneladas diarias de residuos y desechos provenientes del cantón Mejía para gestionar su disposición final, además de dar tratamiento al lixiviado generado. Actualmente se generan 14 l/min de lixiviados y la planta de tratamiento fue diseñada para tratar únicamente 1.2 l/min, por lo que el exceso es recirculado a los cubetos y piscinas de almacenamiento temporal.

La técnica empleada para el tratamiento de lixiviados es la de coagulación-floculación, que tiene como fin la desestabilización de las cargas electrostáticas superficiales de los contaminantes para su posterior aglutinación y sedimentación. Actualmente el tratamiento es continuo, sin embargo, no se cuenta con un variador de frecuencia que permita regular las revoluciones por minuto (RPM) tanto para la fase de coagulación como en la de floculación, además de incorporar el coagulante y floculante al mismo tiempo. Por esta razón se plantea la necesidad de adquirir un variador de frecuencia y realizar un tratamiento por lotes, ya que el tiempo de retención hidráulico del actual proceso es de 3 semanas para 1 m³, mientras que si el tratamiento es por batch se puede incrementar el volumen de lixiviado tratado.

La dosis ideal determinada a través de pruebas de jarras fue de 4150 mg/l de policloruro de aluminio y de 30 mg/l de polímero aniónico, reflejando una eficiencia del 90.83%.

PALABRAS CLAVE: lixiviado, coagulación, floculación, PAC, polímero aniónico

ABSTRACT

The Romerillo Sanitary Landfill is located on the divisional border between the provinces of Pichincha and Cotopaxi and is responsible for receiving 60 tons of waste per day from the Mejía canton to manage its final disposal, in addition to treating the leachate generated. Currently, 14 l/min of leachate is generated and the treatment plant was designed to treat only 1.2 l/min, so the excess is recirculated to the temporary storage tanks and pools.

The technique used for the treatment of leachate is coagulation-flocculation, which aims to destabilize the surface electrostatic charges of the contaminants for their subsequent agglutination and sedimentation. Currently the treatment is continuous, however, there is no frequency inverter that allows regulating the revolutions per minute (RPM) for both the coagulation and flocculation phases, in addition to incorporating the coagulant and flocculant at the same time. For this reason, there is a need to acquire a frequency variator and to be able to carry out a batch treatment, since the hydraulic retention time of the current process is 3 weeks for 1 m³, while if the treatment is by batches the volume of leachate treated can be increased

The ideal dose determined through jar tests was 4150 mg/l of polyaluminum chloride and 30 mg/l of anionic polymer, reflecting an efficiency of 90.83%.

KEYWORDS: leachate, coagulation, flocculation, PAC, anionic polymer

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El cantón Mejía, perteneciente a la provincia de Pichincha, cuenta con una población de 72.553 habitantes, correspondiente a 14.251 en las parroquias urbanas y 58.302 en las parroquias rurales, los cuales tienen una generación de desechos per cápita de 0,89 kg/hb.día. La recolección de residuos es realizada los lunes, miércoles y viernes por el municipio de la localidad, y tiene como destino final al Relleno Sanitario Romerillos, ubicado a 13 km de Machachi, en el límite entre las provincias de Pichincha y Cotopaxi. [1]

En el presente caso de estudio que se desarrolló en el Relleno sanitario “Romerillos”, se estimó que la generación de residuos es de aproximadamente 60 toneladas diarias, las mismas que se disponen en las instalaciones del relleno mencionado, sin embargo, debido a la descomposición de residuos orgánicos se genera un líquido denominado lixiviado y que debido a su composición presenta contaminantes orgánicos e inorgánicos. [1]

Se conoce al lixiviado, como al líquido, resultado de la descomposición de materia orgánica, que percola a través de los diferentes estratos o capas de residuos sólidos, y debido a sus características, tiene la capacidad de arrastrar en su paso material en suspensión, disuelto e incluso fijo o volátil, por lo cual, la carga orgánica e inorgánica es muy elevada, reportándose hasta 60.000 ppm de DQO, incluyendo metales pesados que debido a las condiciones ambientales se encuentran en solución, a causa de los pH ácidos de este tipo de aguas residuales. [2]

La problemática del tratamiento de lixiviados radica en su variada composición, y es que la generación de lixiviados atraviesa por 5 etapas, el ajuste inicial, fase de transición, fase de acidogénesis, fase de metanogénesis y la fase de maduración, variando sus parámetros, como pH, el cual disminuye a 5 o por debajo de este valor durante la formación de ácidos orgánicos, mientras que, a lo largo de la metanogénesis, se encuentran en el intervalo de 6.8 a 8. Por esta razón el tratamiento de lixiviados es de los más complejos, ya que atraviesa por varias etapas, las cuales presentan diferentes características y de acuerdo a estas, puede emplearse un tratamiento biológico o físico-químico, lo que no sucede con otro tipo de aguas residuales que mantienen constantes sus propiedades, como es el caso de efluentes municipales, industriales, de rastros, entre otros. [2]

La disposición final de residuos sólidos orgánicos e inorgánicos no es eficiente en Latinoamérica, y puntualmente en el Ecuador su gestión es deficiente, llegándose a producir hasta 375 mil toneladas de residuos sólidos urbanos durante el año 2020, de los cuáles, únicamente el 4% era reciclable. [3]

En el presente componente se llevó a cabo la caracterización del afluente e influente; sin embargo, en vista de que no se cuenta con una normativa estandarizada a nivel nacional, que determine el proceso en la toma de muestras de una PTAR (Planta de tratamiento de aguas residuales), nos guiamos de las recomendaciones establecidas por la Dirección General de Salud Ambiental de Perú y del Ministerio de Vivienda de Perú. [4] [5]

De igual manera, se realizó la evaluación de las etapas del tratamiento de lixiviados y de acuerdo con los resultados se presentó una propuesta en lo que respecta al proceso fisicoquímico de coagulación y floculación, específicamente en la velocidad de mezcla rápida y lenta, respectivamente, factor primordial que determina la eficiencia del tratamiento. [6] [7]

1.1 Objetivo general

Determinar la eficiencia de la Planta de tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario de Romerillos, a través de la evaluación de las diferentes operaciones y procesos unitarios que conforman las etapas del tratamiento de lixiviados.

1.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar el lixiviado para determinar la naturaleza y concentración de sus contaminantes.
2. Establecer la dosificación ideal de coagulante y floculante a mediante la realización de pruebas de jarras.
3. Proponer opciones de mejora a las operaciones y procesos unitarios que forman parte de la Planta de tratamiento de lixiviados para lograr una mejor calidad en el efluente.

1.3 Alcance

A través de la caracterización del afluente y efluente, se determinó las concentraciones de los contaminantes presentes en el lixiviado, tanto de carácter orgánico como inorgánico. Es fundamental tomar en cuenta la edad del lixiviado, ya que dependiendo si este es joven, presentará altas concentraciones de DBO, debido a la presencia de ácido

grasos volátiles, por lo cual, la relación de biodegradabilidad DBO5/DQO se hallará entre 0.5 o más; mientras que, un lixiviado maduro, presentará baja DBO, debido al consumo de la materia orgánica en suspensión y solución, además de contar con ácido húmicos y fúlvicos, los mismo que no son fácilmente biodegradables, por lo que la relación DBO5/DQO reflejará valores muy bajos que oscilarán entre 0.05 a 0.2. Así mismo, los denominados parámetros electroquímicos, tales como el pH y conductividad irán variando a lo largo del tiempo, en el caso del pH, al inicio, durante la fase de ajuste inicial, este será neutro y mientras avanza la fase acidogénica, el pH disminuirá por debajo de 5, y finalmente en la fase metanogénica alcanzara valores entre 6.8 a 8, e inclusive se pueden registrar valores por encima de 8, por lo cual, la presencia de metales pesados y conductividad eléctrica reducirá. [2]

Se evaluó la dosificación actual de coagulante y floculante a través de un ensayo de jarras, con el fin de recomendar la modificación de la dosificación con base a los resultados a obtenerse a través de la interpretación de la curva eficiencias vs dosis, de esta manera se involucrará tanto la concentración de contaminantes antes de la adición de químicos, como después de esta.

Se analizó de forma general, el funcionamiento de las operaciones y procesos unitarios que forman parte de la planta de tratamiento de lixiviados (PTL), esta evaluación comprenderá desde el ingreso del lixiviado al tanque de coagulación-floculación, hasta su descarga. Es decir que se deberá revisar el desempeño del mezclador ubicado en el tanque de coagulación-floculación, ya que, la velocidad de rotación determinará una adecuada o inadecuada desestabilización de las cargas electrostáticas superficiales de las partículas suspendidas y coloidales durante la fase de coagulación, y posteriormente en la etapa de floculación, se llevará a cabo la aglutinación de flóculos a través de la adición de floculante mediante una mezcla lenta. Así mismo, se evaluó el tiempo de retención hidráulico en el tanque sedimentador, ya que, de acuerdo al tiempo de retención de flóculos, se generará un correcta sedimentación y arrastre de sólidos, que permitirán obtener una mejor calidad en el clarificado.

Con base en los resultados obtenidos de la evaluación de las operaciones y procesos unitarios, de la caracterización del lixiviado crudo y tratado, análisis de la eficiencia de los diferentes coagulantes mediante el test de jarras y de la dosificación actual de PAC y polímero aniónico, se propuso una dosificación diferente y a su vez, la adquisición e instalación de un variador de frecuencia en el motor del tanque de coagulación floculación que posibilita regular la velocidad de mezcla según la necesidad; y de esta manera se

dará un tratamiento de lixiviados por lotes, lo que permite conseguir una mayor cantidad de lixiviado tratado.

1.4 Marco teórico

El consumismo y crecimiento poblacional desmesurado han sido factores fundamentales que han determinado la generación de residuos y desechos, tanto de carácter orgánico como inorgánico. Es así, que, en el año de 1950, la población mundial se estimaba en aproximadamente 2.600 millones de individuos, teniendo que pasar 37 años para que en 1987 la población casi se duplicase, llegando a los 5.000 millones de habitantes. Y finalizando el siglo XX, en 1999, la cantidad de habitantes del planeta era de alrededor de 7.000 millones. Ya en el año 2011, la población había aumentado a 7.000 millones de habitantes, y para el 2050 se espera aproximadamente 9.700 millones de individuos, con una proyección de 11.200 millones para el año 2100. Este drástico crecimiento poblacional se debe principalmente al incremento de la tasa de fecundidad, el aumento de la esperanza de vida y la migración internacional. [10]

La relación entre el número de pobladores y la generación de residuos es directamente proporcional. Durante el año 2012, la generación de residuos fue de 1.300 millones de toneladas, sin embargo, al transcurrir 4 años, al 2016, la producción de residuos llegó a más de 2.000 millones de toneladas y se espera que para el 2050 subirá hasta los 3.400 millones de toneladas. [10]

La producción media de residuos varía notablemente de un país a otro, ya que la capacidad adquisitiva no es la misma e incluso la cultura puede ser influyente en el consumo de bienes, llegándose a generar desde 0.11 kilogramos por habitante día hasta 4.54 kilogramos por habitante día. Cabe mencionar que la tasa per cápita [kg/hb.día] está sujeta a la realidad de socioeconómica y política de cada país, por ejemplo, en Norteamérica se ronda los 2.2 [kg/hb. día], mientras que, en África Subsahariana, Asia Oriental y Latinoamérica, la generación oscila entre los 0.46 [kg/hb. día], 0.56 [kg/hb. día] y 0.97 [kg/hb. día], respectivamente. [11]

De acuerdo con una publicación del diario El Universo, nuestro país, produce anualmente alrededor de 375 mil toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU), de los cuales, el 57% corresponde a materia orgánica y el 43% a material inorgánico. De la totalidad de residuos generados, el 96% tiene como destino alguno de los sistemas de disposición final, como celdas emergentes (CE), rellenos sanitarios (RS) y botaderos de basura (BB). [3]

En todo el territorio continental se conoce que al año 2020 se encontraban operativos un total de 226 sistemas de disposición final de los cuales se tenía registro. De estos, 90 se encuentran en la región Litoral (22 RS, 25 CE y 43 BB), 97 en la Sierra (50 RS, 33 CE y 14 BB) y 39 en la Amazonía (27 RS, 4 CE y 8 BB). [12]

Sin embargo, acorde al Reglamento del Código Orgánico del Ambiente (RCOA), es competencia de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales y Metropolitanos la gestión de los RSU hasta su disposición final de manera obligatoria en rellenos sanitarios u otras alternativas que cumplan con los requisitos técnicos y operativos aprobados para el efecto, así mismo, deberán cerrar los botaderos vigentes en el cantón, a través de proyectos de cierres técnicos avalados por la Autoridad Ambiental Nacional. [13]

El actual Relleno Sanitario “Romerillos”, encargado de la recepción de residuos sólidos urbanos del cantón Mejía, inició como un botadero a cielo abierto en el año 2006, el cual en ciertas ocasiones funcionaba como incinerador de basura, sin embargo, a partir del año 2009, se obtuvo la licencia ambiental, transformando el botadero en un Relleno Sanitario que cumpla con las especificaciones técnicas. En el año 2020, el cantón Mejía llegó a producir una media de 76.32 toneladas/día. [12] A pesar de que un relleno sanitario, representa actualmente la opción más económica como sistema de disposición final, surge un inconveniente con la generación del líquido percolante, resultante de la descomposición bioquímica de la materia orgánica, el cual presenta generalmente una alta concentración de materia orgánica, nutrientes como fósforo y nitrógeno, sólidos suspendidos totales y metales pesados en bajas concentraciones, denominado lixiviado. Inclusive se han llegado a encontrar hasta 200 compuestos diferentes, algunos de estos tóxicos e incluso cancerígenos. [14]

Debido a que sus parámetros físicos y químicos varían con el tiempo, el tratamiento de estos va acorde a la edad del lixiviado, sin embargo, en nuestro país, esta no es una opción, ya que no contamos con vasta experiencia en tratamientos biológicos, por lo cual, nos hemos apoyado constantemente en tratamientos físico-químicos. [2]

1.4.1 Relleno sanitario

Es una de las técnicas más empleadas en la región latinoamericana en lo que respecta a la disposición final de residuos, tanto de origen orgánico como inorgánico [11]. Al ser enterrada la materia orgánica, se lleva a cabo una digestión anaerobia generando un fluido gaseoso denominado biogás, el cual es compuesto por 50-70% de metano, 30-40% de dióxido de carbono y un $\leq 5\%$ de hidrógeno, ácido sulfúrico y otros gases. [15], así

como un fluido líquido, conocido como lixiviado, definido por [16] como “el líquido que se genera como resultado de la descomposición de residuos urbanos y de la percolación de agua proveniente de distintas fuentes en el vertedero, que, al sobrepasarse la capacidad de campo del suelo, este fluye a través de los desechos, incorporando a su composición, contaminantes disueltos y suspendidos, incrementando la concentración de sustancias que pueden convertirse en una amenaza tanto para la calidad del agua subterránea y superficial, como para el suelo”. La fracción en la que el suelo es capaz de reducir la carga contaminante dependerá de muchos factores, físico químicos, como la capacidad de intercambio iónico (CII), su porosidad, su destreza para adsorber, absorber y precipitar sólidos disueltos, entre otros. Por ejemplo, ciertos contaminantes aniónicos como nitratos y cloruros se infiltran fácilmente a través de la gran mayoría de suelos sin ser retenidos. Contrario a lo que sucede en los tipos de suelos arcillosos y con presencia de humus que debido a la presencia de coloides son capaces de adsorber ciertos contaminantes. [17]

Como se mencionó anteriormente, esta técnica es de las más empleadas a nivel latinoamericano debido a sus ventajas económicas y posible aprovechamiento de subproductos. A continuación, se detallan las ventajas y desventajas de las principales técnicas de tratamiento y disposición final de residuos sólidos urbanos.

Tabla 1. Diferentes técnicas de tratamiento y disposición final, ventajas y desventajas

Técnica	Ventajas	Desventajas
Relleno sanitario	-Consumo energético bajo -Restitución de zonas degradadas -Aprovechamiento del metano para la generación de electricidad -Gasto capital (CAPEX) y gasto operativo (OPEX) bajos	-Extensas extensiones -Emisiones de gases de efecto invernadero -Producción de fluidos líquidos (lixiviado) y gaseosos (biogás) -Generación de malos olores
Compostaje	-Aprovechamiento de residuos orgánicos -Recuperación de nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) a través del ciclo del suelo -Producción de abono orgánico -Reducción del área a emplearse en comparación con un relleno sanitario	-Generación de CO ₂ -Eficiencia baja para compuestos inorgánicos o de difícil biodegradación
Incineración	-Considerable recuperación de energía -Reducción en áreas a emplearse	-Generación de contaminantes primarios y secundarios a la atmósfera -Elevados CAPEX y OPEX

Reciclaje	-Aprovechamiento de papel cartón, vidrio, metales, entre otros -Ahorro energético -Disminución en la generación de desechos	-Riesgos en la clasificación de materiales debido a un poco o pobre cultura de separación en la fuente
-----------	---	--

Fuente: [17]

Como se puede observar de la Tabla 2, la otra alternativa en lugar de los rellenos sanitarios, serían la incineración, sin embargo, esta técnica es muy costosa y su aplicación está orientada tradicionalmente a disposición final de los residuos peligrosos, además que debido a la exorbitante generación de residuos en nuestro país (alrededor de 375 mil toneladas al año) [3], no sería una opción técnica ni económicamente viable.

Es importante mencionar que el relleno sanitario Romerillos cuenta con una planta de reciclaje, la cual, permite una recuperación de material que puede ser aprovechable o se le puede otorgar otro uso. [18]

Para entender la estructura de un relleno sanitario de una forma mucho más dinámica y sencilla, podemos asociarla a las capas de una lasaña, en donde el fondo del recipiente vendría a ser nuestra capa impermeable, la cual tiene como función evitar la percolación de lixiviados, mientras que la carne sería nuestros residuos y finalmente, las capas de lasaña corresponderían a la capa de suelo que se coloca compactamente sobre los desechos. [17]

La forma de apilar nuestras capas sería la siguiente, primero nuestra capa impermeable, posteriormente se recomienda una capa de compostaje o humus, debido a su gran capacidad de adsorción de contaminantes, a continuación, colocaríamos la primera lámina de residuos, y por consiguiente una capa de suelo compactado. Esta secuencia de residuos y suelo compacto, la debemos repetir hasta cumplir con el volumen de diseño del relleno.

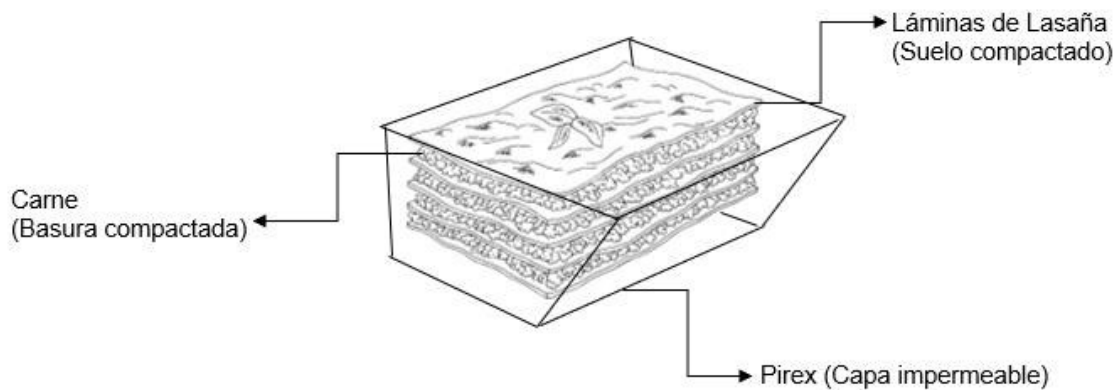


Figura 1. Estructura de un relleno sanitario.

Fuente: Elaboración propia

Este tipo de sistemas de disposición final, presenta ciertas ventajas que hacen catalogarlas como beneficiosas, como por ejemplo la posibilidad de recuperar áreas degradadas por la explotación de agregados para la construcción, minería y terrenos con suelos improductivos, sus Capex son bajos en comparación con otros métodos de disposición final, además, de requerir la contratación de personal operativo con mano de obra no calificada, la posibilidad de aprovechar el metano generado por la digestión anaerobia y transformarlo en energía eléctrica. [17]

Las desventajas surgen cuando no se cuenta con cobertura arbórea alrededor del relleno sanitario, ya que esta actúa como una barrera natural para los malos olores, así mismo una fisura en el geotextil y geomembrana de las piscinas de almacenamiento temporales de lixiviados pueden generar contaminación en los cuerpos de agua superficiales y subterráneos de la zona, es por esta razón, que el coeficiente de permeabilidad de la capa de suelo debe ser muy bajo. [17]

Otros inconvenientes surgen cuando los residuos orgánicos no son separados de los inorgánicos, ya que los orgánicos al descomponerse desprenden el lixiviado, el cual debido a las condiciones del ambiente o entorno presenta características fisicoquímicas muy variables, alterando la estructura de los residuos inorgánicos a tal punto de solubilizar metales pesados. Este es el principal motivo por el cual se debe contar con una compostera en las instalaciones de un relleno sanitario para evitar al máximo la generación de lixiviados y aprovechar la materia orgánica para la obtención de un abono orgánico. [17]

1.4.2 Etapas de la generación de biogás y composición de los lixiviados

1ra Etapa. Ajuste inicial o hidrólisis aerobia: durante esta fase la materia orgánica biodegradable comienza a descomponerse mientras es dispuesta en el relleno, esta degradación se lleva a cabo en condiciones aerobias, debido al oxígeno que ha quedado atrapado. Los principales actores de esta fase son microorganismos aerobios y anaerobios quienes transformaran ciertos hidratos de carbono en azúcares simples tal como la glucosa, anhídrido carbónico y agua. En esta fase, el pH del lixiviado es neutro, tendiendo a ácido, entre 6.5 a 7.5 [2]

2da Etapa. Fermentación o fase de transición: en esta fase comienza a descender el oxígeno hasta el punto de contar con condiciones netamente anaerobias; tanto el sulfato como el nitrato pueden actuar como receptores de electrones que a través de reacciones de conversión biológica generalmente se derivan en nitrógeno elemental y sulfuro de hidrógeno. Una alternativa para supervisar o darse cuenta del inicio de las condiciones anaerobias es midiendo el potencial de óxido-reducción (redox). Es importante mencionar que las condiciones necesarias de reducción del nitrato y sulfato se encuentran en el rango de -50 a -100 milivoltios, mientras que la producción de metano se halla en el intervalo de -150 a -300 milivoltios. A medida de la disminución del potencial de reducción-oxidación, los microorganismos encargados de la conversión del material orgánico producirán ácidos orgánicos y otros subproductos como el CO₂.

Durante esta fase, el pH del lixiviado comenzará a descender, esto a causa de la presencia de ácidos orgánicos y a las altas concentraciones de dióxido de carbono. [2]

3ra Etapa. Acidogénesis: a medida que la actividad microbiana se acelera con la generación de ácidos orgánicos e hidrógeno elemental, el pH del lixiviado disminuirá hasta 5 o inclusive menor a este. Tanto la DBO₅, como la DQO y la conductividad aumentarán significativamente, esto debido a la dilución de ácidos orgánicos en el lixiviado.

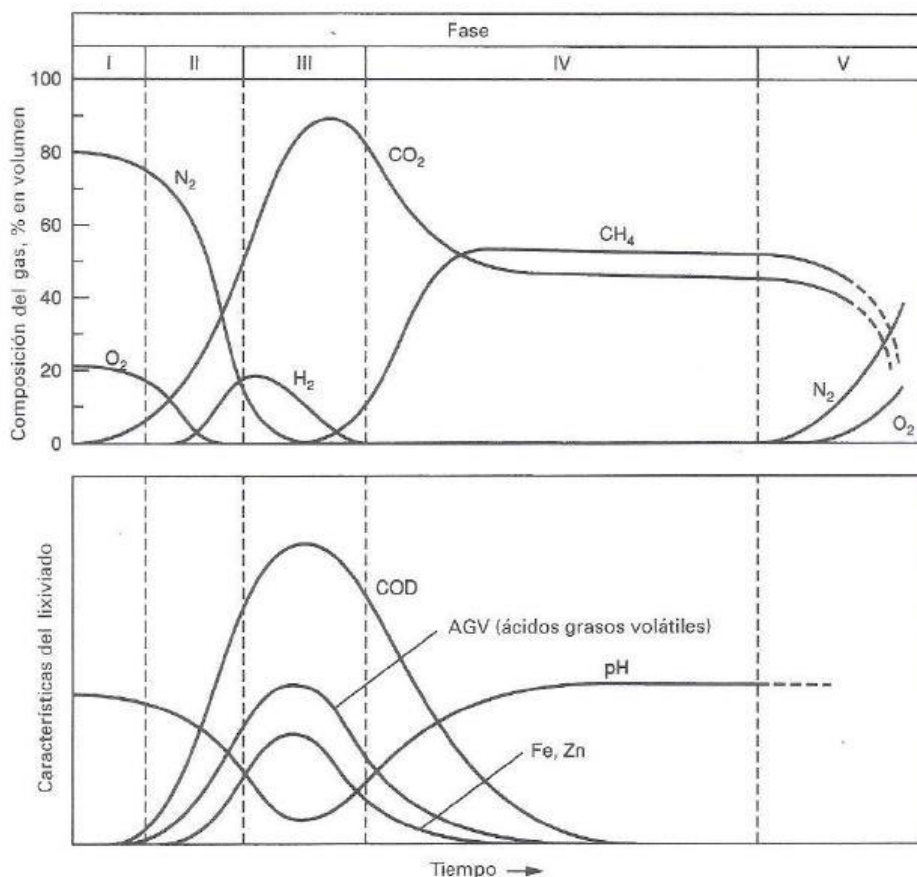
4ta Etapa. Metanogénesis: en esta fase, los microorganismos que se convierten el ácido acético en metano y dióxido de carbono serán predominantes, serán estrictamente anaerobios y se los conocerá como metanogénicos. Tanto la producción de metano como la de CO₂ será simultánea, no obstante, la velocidad con la que se forman los ácidos será considerablemente menor en comparación con la del anhídrido carbónico.

Debido a la conversión de ácidos e hidrogeno elemental en metano y CO₂, el pH tanto dentro del vertedero como del lixiviado incrementará hasta un intervalo de 6.8 a 8, así mismo, disminuirá la concentración de la DBO₅, DQO y conductividad. A medida que aumenta el pH del lixiviado, habrá una menor cantidad de constituyentes inorgánicos que queden en solución, como es el caso de los metales pesados. [2]

5ta Etapa. Maduración: en esta fase final, la velocidad de generación del biogás disminuye considerablemente debido a que los nutrientes han sido separados y formarán parte del lixiviado, además que los sustratos que yacen en el relleno sanitario son de lenta degradación. Los principales gases seguirán siendo el metano y dióxido de carbono, aunque puede haber presencia de nitrógeno elemental y oxígeno en bajas proporciones.

Debido a que el lixiviado contendrá ácidos húmicos y fúlvicos, la relación DBO₅/DQO será baja, debido a que estos compuestos ácidos son de difícil biodegradación.

En la figura 2, se observa un esquema simplificado de las etapas de generación de biogás y de las características del lixiviado a través del tiempo.



Fuente: [19]

Figura 2. Etapas de generación de biogás y de las características del lixiviado

a través del tiempo

Como es posible observar en la figura previa, las características y composición del lixiviado varía constantemente a lo largo del tiempo, es decir que cambia de acorde a la edad de este, llegando a contener incluso compuestos xenobióticos y microorganismos patógenos, por lo cual se ha decidido clasificar a los contaminantes presentes en el lixiviado en 4 grandes grupos. [19]

- 1. Materia orgánica en solución:** usualmente expresado como la demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (COT) o demanda biológica de oxígeno (DBO5), además de incluir a los ácidos grasos volátiles (AGV), metano y compuestos biorecalcitrantes como ácidos húmicos y fúlvicos.
- 2. Macro compuestos inorgánicos:** en esta categoría encontramos a metales como el calcio, magnesio, sodio, hierro, manganeso, metales pesados como cadmio, zinc, níquel, cromo, zinc, entre otros y aniones como cloruros, sulfatos, cloruros, amonio y carbonatos.
- 3. Compuestos orgánicos xenobióticos:** estos pueden incluir a una gran diversidad de compuestos halogenados, alcoholes, fenoles, cetonas, aldehídos, ácidos carboxílicos y demás compuestos de carácter tóxico.
- 4. Compuestos traza:** son componentes encontrados en bajas concentraciones o proporciones como arsénico, litio, cobalto, mercurio, bario y boro.

Muchos de los compuestos orgánicos como fenoles, ftalatos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) y compuestos aromáticos nitrogenados o clorados, han sido registrados en la caracterización del lixiviado, no obstante, no es factible aseverar que los compuestos encontrados en los lixiviados provienen de sustancias presentes en el relleno sanitario o que son originados a través de reacciones de degradación. [19]

Así mismo, no se puede atribuir la toxicidad del lixiviado solamente a los metales pesados, el ion amonio y compuestos recalcitrantes. Por esta razón se debe analizar a los compuestos tóxicos como un todo, ya que es posible que se derive de un efecto sinérgico, es decir, de la interacción entre ellos. [19]

1.4.3 Características físico químicas de los lixiviados

Las características físico químicas de los lixiviados varían considerablemente de acuerdo con su edad (joven, intermediario y maduro) y de la composición de los desechos que ingresan al relleno, por lo cual no podemos inferir o aseverar que la composición de un lixiviado de una región es igual a la de otra región, incluso si estos se encuentran en un mismo país, la variación es notoria. Así mismo su composición dependerá de los

desechos que sean dispuestos en los cubetos, ya que, al contar con una clasificación en la fuente o una planta recicladora en el relleno, la mayoría los desechos que albergue este serán de origen orgánico, es decir que presentarán una mayor concentración de contaminantes orgánicos que inorgánicos. [20]

En la tabla a continuación se puede evidenciar la variabilidad de ciertos parámetros en los lixiviados, establecidos por Tchobanoglous, G, en su libro “Gestión Integral de Residuos Sólidos” del año 1994.

Tabla 2. *Características físico químicas de los lixiviados de acuerdo a la edad, según Tchobanoglous, G*

Edad del relleno	Lixiviado joven < 2 años	Lixiviado intermediario > 2 años	Lixiviado maduro > 10 años
Parámetros	Intervalo	Valor promedio	Rango
DQO	3000-60000	18000	100-500
DBO	2000-30000	10000	100-200
Sales solubles	200-4000	800	100-500
Plomo	1-10	2	0.01-0.5
pH	5-8	6	6.6-7.5

Fuente: [20]

Por otro lado, en la siguiente tabla, se presenta la composición y denominación de la edad de lixiviados de acuerdo con lo expuesto por Renou, S, en su investigación denominada “Tratamiento de lixiviados en vertederos: revisión y oportunidad” del año 2008, quien expone que el lixiviado joven (LJ) es considerado cuando este es menor a 5 años, mientras que el lixiviado intermediario (LI) de 5 a 10 años y finalmente el lixiviado maduro (LM) es mayor a 10 años. [20]

Tabla 3. Características físico químicas de los lixiviados de acuerdo a la edad, según Renou, S

Edad del relleno	Lixiviado joven < 5 años	Lixiviado intermedio > 5-10 años	Lixiviado maduro > 10 años
Parámetros	Intervalo	Intervalo	Intervalo
DQO	>10000 mg/l	4000-10000 mg/l	>4000
DBO5/DQO	>0.3	0.1-0.3	<0.1
NH3-N	>400 mg/l	400 mg/l	<400 mg/l
Metales pesados	>2 mg/l	2 mg/l	<2 mg/l
Compuestos orgánicos	80% ácidos volátiles	5%-30% ácidos volátiles, húmicos y fúlvicos	ácidos húmicos y fúlvicos
pH	<6.5	6.5-7.5	>7.5
Tipo	Sin degradar	Parcialmente degradado o estabilizado	Estabilizado

Fuente: [20]

Es importante hacer hincapié, en que la composición de los lixiviados varía de un autor a otro, de una ciudad a otra y de un año a otro e incluso de un mes a otro, tal cual sucede entre Tchobanoglous y Renou, quienes difieren en conceptos de edad del lixiviado y rango de concentración de contaminantes.

A continuación, se presentará la caracterización de lixiviados de 4 países diferentes y como varía su composición considerablemente. Es preciso mencionar que en Latinoamérica la separación en la fuente es prácticamente nula, por lo cual se espera una alta concentración de compuestos inorgánicos. [21]

Parámetro	País	España	México	Perú				Ecuador	
	Ciudad	Granada	Mérida	Moyobamba				Mejía	Mejía
	Año	2006	2009	Febrero 2017	Abril 2017	Mayo 2017	Junio 2017	2018	2022
Turbiedad	NTU	-	108	432	390	310	420	486.5	163
DBO5	mg/l	5749.79	1098	14678	9120	3150	6520	505	1178
DQO	mg/l	30994.07	5346	30987	12030	8300	13256	2533	5380
RB	-	0.18	0.20	0.47	0.75	0.37	0.49	0.20	0.21
Fósforo total	mg/l	-	37.32	0.88	0.75	0.96	1.23	95.17	23.8
ST	mg/l	35455.72	12545	40553	32956	15982	24563	9126.11	8980
SDT	mg/l	34469.78	-	35927	29574	15842	18327	-	-
SST	mg/l	1058.17	95	10945	8956	5453	8645	79	620
Arsénico	mg/l	-	-	0.438	0.018	0.140	0.085	-	-
Cadmio	mg/l	-	0.0069	0.212	0.008	0.045	0.142	-	-
Hierro	mg/l	-	64.05	0.023	0.034	0.024	0.033	-	-
Plomo	mg/l	-	0.236	0.302	0.042	0.098	0.124	-	-
Zinc	mg/l	-	3.2	1.086	0.584	0.754	0.713	-	-
pH	-	7.96	8.3	4.30	4.14	5	4.53	8.33	8.83
C. totales	NMP/1000 ml	-	-	850	643	795	932	550	-
C. fecales	NMP/1000 ml	-	-	440	548	898	915	-	-
Nitritos	mg/l	-	-	-	-	-	-	445	1.32
Nitratos	mg/l	-	-	-	-	-	-	117.5	10
Nitrógeno amoniacal	mg/l	1602.80	1210	-	-	-	-	1432	2.35
Sulfuros	mg/l	-	405	-	-	-	-	-	0.94
Sulfatos	mg/l	166.70	-	-	-	-	-	35	50
Fosfatos	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	60
Conductividad	μs/cm	32030	17900	-	-	-	-	15180	17800
OD	mg/l	-	0.72	-	-	-	-	-	<0.2

Tabla 4. Caracterización de los lixiviados de 4 países diferentes

Fuente: [22] [23] [24] [25]

De la tabla 4, se puede observar la variación de la concentración de contaminantes de carácter orgánico e inorgánico, es tal la diferencia entre países que, en Granada, España la demanda química de oxígeno (DQO) reportada en el 2008 fue de 30994.07 mg/l mientras que, en Mejía, Ecuador la DQO en el año 2022 fue de 5380 mg/l, es decir 5.76 veces menos.

Como se mencionó anteriormente, la diferencia de concentraciones de parámetros se debe al tipo y cantidad de desechos que son depositados en el relleno sanitario, mientras que el Relleno de Romerillos receipta 720 toneladas anuales de residuos y desechos, la Ecocentral Granda, recibe hasta 355.000 toneladas por año.

Por esta razón es importante tomar en cuenta que tipo de residuos y/o desechos ingresan al relleno sanitario, ya que cada uno de estos presentará diferentes grados de biodegradabilidad, produciendo diferentes subproductos como ácidos grasos, amoniaco, nitritos, nitratos, sulfuros y otros compuestos orgánicos, además, iones mono y divalentes, como lo son el sodio, potasio, cloruros, sulfuros y calcio, magnesio, hierro, manganeso y sulfatos, respectivamente.

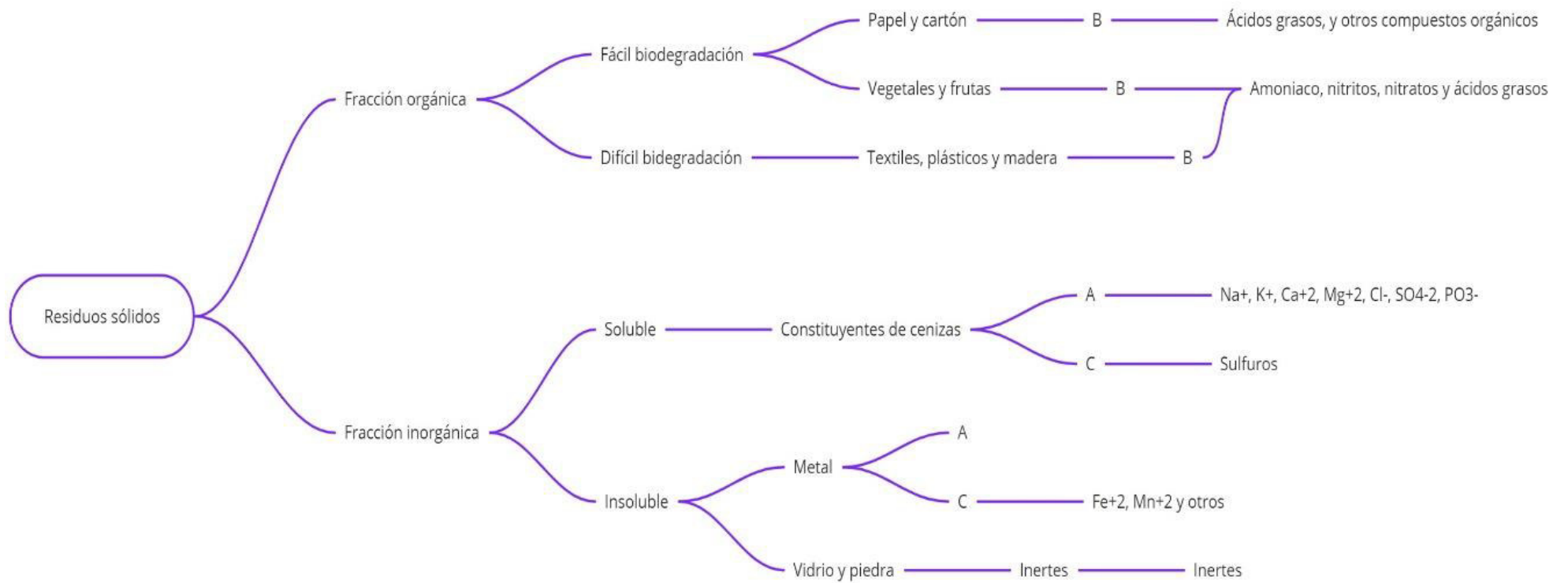


Figura 3. Origen de ciertos compuestos presentes en los lixiviados
Fuente: [24]

De la figura 3, se puede observar la procedencia de ciertos compuestos generados a partir de la degradación de las fracciones orgánicas e inorgánicas, así mismo, se ha determinado que tipo de reacciones suceden en la formación de subproductos. Siendo (A), disoluciones directas de sustancias solubles; (B), la disolución de compuestos solubles generados por biodegradación y (C), la disolución ácida de la forma insoluble a la forma soluble.

Debido a la gran variedad de contaminantes, el tratamiento de los lixiviados dependerá directamente de los parámetros físico químicos como pH, DQO, DBO5, sulfatos, cloruros, nitrógeno Amoniacal, alcalinidad, conductividad y toxicidad, entre los más importantes, así como la relación entre estos, la DBO5/DQO, la misma que hace referencia a la fracción biodegradable de materia orgánica presente en este tipo de agua residual y la relación sulfatos/cloruros que representan el grado de anaerobiosis del lixiviado. Por esta razón es fundamental conocer y entender la variación de ciertos parámetros a lo largo del tiempo, como lo es el pH, conductividad, nitrógeno amoniacal, DBO5/DQO, HAP's, BETEX, entre otros. [26]

En el caso del pH, se ha determinado que este incrementa con la edad del lixiviado, lo que concuerda con la reducción de ácidos grasos volátiles, ya que, en la etapa acidogénica del proceso anaerobio, se desprenden grandes cantidades de AGV, lo que desemboca en valores ácidos de pH, contrario a lo que sucede en lixiviados maduros, en donde durante el inicio y transición de la fase metanogénica, los AGV se transforman en metano y CO₂; este parámetro es fundamental en la elección del tratamiento biológico o fisicoquímico, ya que habrá ciertos microorganismos que no toleren ambientes muy ácidos o básicos, así como compuestos químicos como coagulantes que no funcionen adecuadamente fuera de rangos de pH establecidos por los fabricantes. [16] [26]

La conductividad que está estrechamente relacionada con sólidos disueltos, y con la presencia de iones, va disminuyendo a medida que avanza la edad del lixiviado, ya que disminuye la presencia de iones calcio, magnesio, carbonatos y bicarbonatos, reduciendo la movilidad de iones, lo que se refleja en valores inferiores de conductividad. [26]

En cuanto se refiere al nitrógeno total y amoniacal, se ha establecido que debido a que en relleno jóvenes se llevan a cabo procesos de desaminación de aminoácidos y destrucción de compuestos de carácter orgánico, la variación del nitrógeno en cubetos de distintas edades es alta, al menos durante los primeros 4 años y en los posteriores 8

años esta se estabiliza, presentando una mayor concentración de nitritos y nitratos en lixiviados maduros. [27]

1.4.4 Relación de biodegradabilidad

La relación o grado de biodegradabilidad resulta de la razón de la DBO5/DQO, esta, nos indicará la factibilidad de tratar el agua residual mediante un proceso biológico, ya sea aerobio o anaerobio. A continuación, se presenta los rangos de esta relación y su significado en cuanto se refiere a biodegradabilidad. [28]

Tabla 5. Significado de la relación DBO5/DQO

DBO5/DQO	Carácter
>0.8	Muy biodegradable
0.7-0.8	Biodegradable
0.3-0.7	Poco biodegradable
<0.3	No biodegradable

Fuente: [28]

En la tabla 5, se puede observar los intervalos o rangos de la relación DBO5/DQO, las que nos permitirán establecer el tipo de tratamiento a efectuar con el agua residual a tratar. Lo recomendable es aplicar tratamientos biológicos cuando la relación DBO5/DQO es mayor a 0.7, ya que la fracción biodegradable de la DQO es mayor que la no biodegradable, mientras que, si la relación es menor a 0.3, la fracción no biodegradable es mayor a la biodegradable y por lo tanto un proceso biológico no será lo más adecuado para este tipo de efluentes, en tal caso, lo apropiado será optar por un tratamiento fisicoquímico. En vista de la variabilidad de los parámetros, esencialmente se sugieren 2 tipos de tratamientos, ya sean biológicos o físico químicos, o a su vez un híbrido que convine los tratamientos convencionales con los que impliquen procesos más modernos como oxidación avanzada, filtración por membranas, entre otros.

A continuación, se detallan los principales procesos biológicos aerobios y anaerobios y los tratamientos fisicoquímicos más empleados en el tratamiento de lixiviados, no obstante, se hará énfasis en el proceso de coagulación-floculación, tratamiento empleado en el relleno sanitario de Romerillos.

1.4.5 Tratamientos biológicos

El objetivo o fin del tratamiento biológico en aguas residuales municipales o industriales es la remoción de contaminantes del agua a través del uso de microorganismos. En su gran mayoría, la materia orgánica (MO), tanto soluble como insoluble, así como el fósforo

y nitrógeno, son eliminados a través de la acción microbiana. La eliminación de MO, la aglutinación de colides y la estabilización son realizados por una extensa variedad de microorganismo, en su mayoría bacterias aerobias y anaerobias. [29]

Es fundamental tomar en cuenta ciertos aspectos a la hora de diseñar, como i) las necesidades nutricionales de los microorganismos para el crecimiento celular y obtención de energía, ii) su metabolismo, iii) la tasa de crecimiento microbiano y uso del sustrato, iv) los factores ambientales como temperatura, alcalinidad, pH, oxígeno disuelto que afectarán al desempeño de la micro biota. [29] [30]

A continuación, se describen los sistemas biológicos aerobios y anaerobios que se han empleado en el tratamiento de lixiviados.

Tabla 6. Tratamientos aerobios empleados en la depuración de lixiviados.

Sistema	Tratamiento	Funcionamiento	Estudio	Caracterización del lixiviado		Eficiencia %	Fuente
				DQO inicial (mg/l)	DQO final (mg/l)		
Aerobio	Biodiscos	Consiste en discos que giran de 1 a 2 revoluciones por minuto, sumergido el 40% del área superficial de estos. Los microorganismos se fijan en los biodiscos hasta llegar a un espesor de 2 a 4 milímetros. Durante la rotación la biopelícula absorbe oxígeno del aire y la transfiere al medio. La fricción ejercida sobre la biopelícula al girar los discos permite la remoción del excedente de biomasa	Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario El Guayabal	28250	2285,3	91,91	[30]
	Lodos activados	Se basa en el uso de microorganismos, en su mayoría heterótrofos facultativos que residen en el afluente. Dentro de la microbiota que albergan los lodos activados, podemos encontrar una gran variedad de microorganismos, desde bacterias, nematodos e incluso pequeños crustáceos y, dependiendo de la abundancia de estos, se obtendrá un floculo saludable, de gran tamaño y que sedimente adecuadamente	Estudio preliminar para el tratamiento de lixiviados en un reactor de lodos activados	19125	12250	35,95	[31]
	Reactor biológico secuencial (SBR)	Funciona al igual que el de lodos activados, sin embargo, su diferencia radica en que el tratamiento es por lotes en lugar de continuo, es decir, se introduce cierto volumen de afluente y este es tratado en un cierto periodo de tiempo, así mismo, tanto la aireación como sedimentación se lleva a cabo en un mismo reactor contrario a lo que sucede en un sistema de lodos activados.	Tratamiento anaeróbico/aeróbico de lixiviados de una planta de incineración de residuos sólidos municipales	2162	138	93,62	[32]
	Reactor biológico de membranas (MBR)	Un sistema de lodos activados que cuenta con membranas de filtración, ya sea de micro, ultra o nano filtración, es por esta razón que es considerado como un tratamiento terciario, ya que en el reactor de lodos activados se elimina la materia orgánica soluble y coloidal, mientras que en las membranas se retienen sólidos suspendidos y disueltos, así como bacterias e incluso virus.	Tratamiento de lixiviados de vertederos con tecnología MBR	5000	250	95,00	[33]

Tabla 7. *Tratamientos anaerobios empleados en la depuración de lixiviados.*

Sistema	Tratamiento	Funcionamiento	Estudio	Caracterización del lixiviado		Eficiencia %	Fuente
				DQO inicial (mg/l)	DQO final (mg/l)		
Anaerobio	Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)	Una vez realizados los pretratamientos, el afluente ingresa por la parte inferior, ascendiendo a través de los diferentes lechos de lodo. Generalmente en la parte inferior, denominada como "lecho de lodo" se ubican lodos granulares de alta actividad microbiana y; a menudo que aumenta la altura del reactor, el lodo cada vez es más floculento, disperso y liviano conocido como "manto del lodo".	Tratamiento biológico anaerobio del lixiviado generado en el relleno sanitario El Guayabal	28250	9760,3	65,45	[34]
	Reactor granular de lecho expandido (EGSB)	sistema de tercera generación, muy similar al UASB, sin embargo, en este tipo de tratamientos biológicos, únicamente se tiene lodos granulares en todos los horizontes del reactor. Permite tratar altas cargas orgánicas de hasta 1000 kg/día y un caudal de 480 m ³ /día.	Treatment of Landfill by EGSB	108	45,36	58,00	[33]

Tabla 8. *Eficiencia de sistemas biológicos aerobios y anaerobios en el tratamiento de lixiviados*

Tratamiento biológico	Sistema	DQO afluente mg/l	DQO efluente mg/l	% de eficiencia
Aerobio	Biodiscos	28250	2285.30	91.91
	Lodos activados	19125	12250	35.95
	SBR	2162	138	94
	MBR	5000	250	95
Anaerobio	UASB	28250	9760.30	65.45
	EGSB	108	45.36	58

Fuente: [35]

1.4.6 Tratamientos físico químicos

Los tratamientos físico químicos abarcan un conjunto de operaciones y procesos unitarios destinados a disminuir o de ser el caso eliminar aquellos contaminantes que alteran la calidad de los efluentes tanto de origen doméstico como industrial. [36]

Dentro de la amplia gama de tratamientos que se ofrecen en la actualidad, se cuenta con operaciones y procesos como: sedimentación, filtración por membranas, flotación, evaporación, centrifugación, intercambio iónico, adsorción, destilación, cristalización, electrocoagulación, coagulación-floculación, neutralización, precipitación, oxidación química, entre otros. [36] [37]

A continuación, se presentarán las operaciones y procesos físico químicos más empleados en el tratamiento de lixiviados, no obstante, nos centraremos y enfatizaremos en la coagulación floculación, ya que es la técnica usada en el relleno sanitario de Romerillos.

Tabla 9. Tratamientos físico químicos empleados en la depuración de lixiviados.

Sistema	Tratamiento	Funcionamiento	Estudio	Caracterización del lixiviado		Eficiencia %	Fuente
				DQO inicial (mg/l)	DQO final (mg/l)		
Físico químicos	Adsorción	Las moléculas de compuestos orgánicos en estado líquido o gaseoso son fijadas en la superficie de ciertos materiales mediante contacto con estos. Es, por lo tanto, un proceso netamente superficial en el que intervienen una sustancia a la que denominaremos como “adsorbente” que tiene la capacidad de retener y otra “adsorbato” la cual queda fijada.	Comparación de cuatro tratamientos físicoquímicos de lixiviados	6089	4262,3	30,00	[38]
	Oxidación fenton	A través de una reacción entre un reactivo y un contaminante o contaminantes se lleva a cabo una transferencia de electrones, que a su vez generan una modificación en la estructura de estos compuestos. De tal manera, que un contaminante peligroso, recalcitrante o tóxico es transformado en una sustancia no peligrosa.	Comparación de cuatro tratamientos físicoquímicos de lixiviados	6089	1704,92	72,00	[38]
	Flotación	Técnica empleada para la separación de fases sólido-líquido o líquido-líquido, dependiendo de las propiedades de los compuestos. Emplea burbujas con un tamaño muy reducido el cual oscila entre los 40 a 70 micrómetros de diámetro. Este método únicamente funciona si las burbujas se fijan a las partículas, esto supone que el diámetro de estas debe ser necesariamente inferior al de las partículas a separar.	Comparación de cuatro tratamientos físicoquímicos de lixiviados	6089	3836,07	37,00	[38]
	Coagulación-floculación	El proceso de coagulación-floculación es un conjunto de procesos y operaciones unitarias, conformadas por 2 etapas primordialmente, las mismas que tienen como objetivo la disminución de turbiedad, por lo cual es necesario recordar que este parámetro es únicamente afectado por sólidos suspendidos y coloidales.	Comparación de cuatro tratamientos físicoquímicos de lixiviados	6089	3775,18	38,00	[38]

De la tabla 9, se puede observar bajas remociones de DQO en el efluente al aplicar tratamientos fisicoquímicos, salvo el proceso de oxidación Fenton el cual presenta remociones de hasta el 72% en contraste con el 30%-38% de los otros tratamientos como la adsorción, flotación y coagulación-floculación.

Es importante mencionar que estos procesos no son selectivos, es decir que no distinguen la adsorción, oxidación, flotación o coagulación-floculación de materia orgánica de la inorgánica.

A continuación, se detalla el proceso de coagulación-floculación, su funcionamiento, pros y contras

1.4.7 Coagulación-floculación

La cantidad de sólidos totales es uno de los parámetros más importantes en el tratamiento de aguas residuales. Los sólidos totales están conformados por material flotante, suspendidos, en estado coloidal y disueltos. [39]

A continuación, se muestra el tamaño de cada una de estas fracciones.

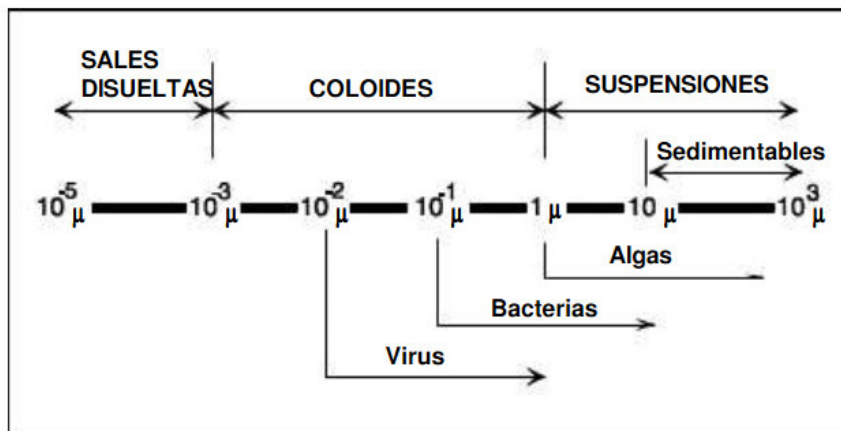


Figura 4. Diámetro de las fracciones que conforman los sólidos totales
Fuente: [39]

La coagulación-floculación es un conjunto de procesos y operaciones unitarias, conformadas por 2 etapas primordialmente, las mismas que tienen como objetivo la disminución de turbiedad, por lo cual es necesario recordar que este parámetro es únicamente afectado por sólidos suspendidos y coloidales. [39] Por lo tanto, para la remoción de materia orgánica soluble, sales y demás compuestos en solución es recomendable emplear sistemas de intercambio iónico o membranas de filtración.

1.4.7.1 Coagulación

La etapa de coagulación es una operación unitaria que permite la desestabilización de las cargas electrostáticas superficiales de las partículas en suspensión o en estado coloidal. Estas cargas suelen ser estables y en muchas ocasiones existe una fuerza de repulsión entre estas fracciones coloidales generando así una dispersión de contaminantes, lo que les impide aglomerarse y por lo tanto su velocidad y tiempo de sedimentación son indefinidos. Usualmente en esta etapa se agrega sales de hierro o aluminio, las cuales aportan cationes, ya sea a través del $\text{Fe}^{+2,3}$ o Al^{+3} , entre las más usadas se tiene al cloruro férrico, sulfato de aluminio, sulfato férrico y policloruro de aluminio, las mismas que presentan una elevada relación carga/masa.

Es importante que la mezcla entre el agua residual y el coagulante sea brusca y rápida, es decir, que se lo debe agregar lo más cerca posible de los agitadores o cerca de un resalto hidráulico a unos 200 a 300 revoluciones por minuto, ya que la mezcla para conseguir una buena desestabilización puede durar de 30 a 180 segundos. [39]

En el proceso de coagulación se presentan dos tipos, las cuales detallaremos a continuación

1.4.7.1.1 Coagulación por adsorción

Esta clase de coagulación se presenta en ciertos casos en donde la concentración de partículas coloidales es alta, por lo cual, al añadirse el coagulante, éste, es adsorbido por los coloides, generando flocs casi de manera instantánea. En este caso no es necesario agregar grandes cantidades de coagulante, ya que, “el agua que presenta mayor suciedad es más fácil de tratar, en comparación con las que reflejan turbidez baja”. [39]

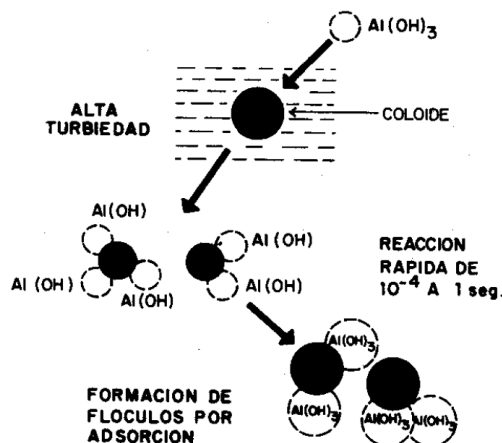


Figura 5. Esquema de coagulación por adsorción
Fuente: [39]

1.4.7.1.2 Coagulación por barrido

La coagulación a través de barrido se lleva a cabo cuando el agua residual presenta una concentración de sólidos suspendidos y coloidales baja. En este caso, los coloides son cubiertos por el coagulante, generando de esta manera una sobresaturación de precipitado. Cuando la turbidez es baja, es necesario añadir una dosis alta de coagulante. [39]

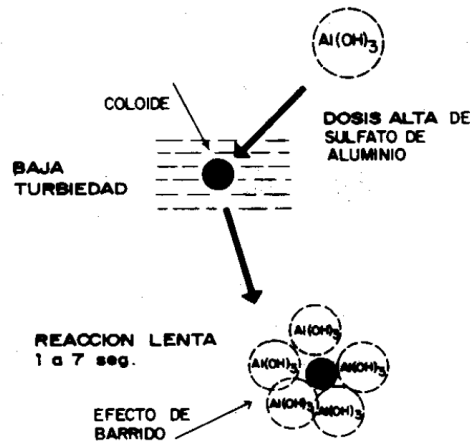


Figura 6. Esquema de coagulación por adsorción
Fuente: [39]

1.4.7.2 Floculación

Esta operación unitaria resulta de la adición de un compuesto químico de elevado peso molecular, conocido como floculante, el cual facilita la aglutinación y sedimentación de flocs. Usualmente los floculantes son de carácter aniónico, catiónico o neutro, cada uno de estos funciona específicamente para ciertas partículas, como las inorgánicas (minerales), orgánicas y mixtas, respectivamente.

Es fundamental considerar la velocidad de la mezcla entre el agua residual y el floculante, esta debe ser lenta, alrededor de 40 a 50 revoluciones por minuto, ya que, si la velocidad es muy alta, los flóculos corren el riesgo de romperse o fragmentarse. Se debe tomar en cuenta que a mayor tamaño del flóculo, mayor será el peso de este y por ende el tiempo de sedimentación será menor. [39]

A continuación, se presenta el Índice de floculación de Wilcomb

Tabla 10. Índice de floculación de Wilcomb

Número del índice	Descripción
0	Flóculo coloidal. Ningún signo de aglutinación
2	Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado
4	Disperso. Flóculo bien formado, pero uniformemente distribuido. (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta)
6	Claro, Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud
8	Bueno, Flóculo que se deposita fácil pero no completamente
10	Excelente. Flóculo que se deposita completamente, dejando el agua cristalina.

Fuente: [39]

Esta clasificación permite calificar la calidad de flóculos, para establecer si la dosis de coagulante y floculante es la ideal.

Al igual que en la coagulación, en el proceso de floculación se cuentan con dos tipos, los cuales detallaremos a continuación

1.4.7.2.1 Floculación pericinética

Consiste en el movimiento de las partículas producido mediante el movimiento browniano, esta etapa influye únicamente en partículas con un tamaño inferior a 1 micrón. [39]

1.4.7.2.2 Floculación ortocinética

Este tipo de floculación se produce a partir del movimiento aleatorio de las partículas, tanto en diferentes direcciones como velocidades, aumentando de esta manera la probabilidad de colisión entre flocs. Esta fase ocurre después de la etapa pericinética. [39]

En vista de que la caracterización de lixiviados varía constantemente, se han llevado numerosos estudios e investigaciones con el fin de determinar la eficiencia, ventajas y desventajas de diferentes técnicas empleadas. Con ese motivo, en el año 2009, Méndez, Castillo, Sauri, Quintanal, Giácoman y Jiménez realizaron un estudio comparativo de 4 tratamiento fisicoquímicos para la depuración de lixiviados. Una de las técnicas

analizadas y evaluadas fue la de coagulación-floculación, en la cual se dosifico 2000 mg/l de sulfato de aluminio. La caracterización del lixiviado previo al tratamiento reportó una DQO de 6089 mg/l, mientras que, en el efluente, se reportaba una remoción del 25 a 38%. [38]

A continuación, se puede observar las dosificaciones de diferentes coagulantes y floculantes empleados en el tratamiento de lixiviados, así como la eficiencia en la remoción de DQO, sólidos suspendidos y turbidez.

Tabla 11. Experiencias en tratamiento de lixiviados mediante coagulación-floculación.

Reactivos		Tratamiento	Lixiviado inicial			Dosis (mg/l)	pH óptimo	Remoción DQO (%)
Coagulantes	Floculantes		DQO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	DBO5/DQO			
Al ₂ (SO ₄) ₃ FeCl ₃	Polímeros: No iónicos Aniónicos Catiónicos	Coagulación-floculación Ósmosis inversa	4100	200	0,05	FeCl ₃ = 2000 Al ₂ (SO ₄) ₃ = 900 Floculantes= 40	FeCl ₃ = 4,9 Al ₂ (SO ₄) ₃ = 5,5	FeCl ₃ = 55% (94% turbidez) Al ₂ (SO ₄) ₃ = 42% (87% turbidez)
FeCl ₃ Al ₂ (SO ₄) ₃ CaO	-	Coagulación-floculación Adsorción Stripping	1141	85	0,07	FeCl ₃ = 800 Al ₂ (SO ₄) ₃ = 400 CaO= 3100	FeCl ₃ = 4,75 Al ₂ (SO ₄) ₃ = 5,6 CaO= 11,5	FeCl ₃ = 56% Al ₂ (SO ₄) ₃ = 39% CaO= 18%
FeCl ₃	-	Lodos activados Coagulación-floculación	1050-2020	50-270	0,05-0,13	FeCl ₃ = 700	FeCl ₃ = 4	FeCl ₃ = 57%
FeCl ₃ Al ₂ (SO ₄) ₃ CaO	-	Coagulación-floculación Stripping T.Biológico	1000-7000	-	-	FeCl ₃ = 3000 Al ₂ (SO ₄) ₃ = 1000 CaO= 1000	FeCl ₃ = 6 Al ₂ (SO ₄) ₃ = 6 CaO= 12	FeCl ₃ = 60% Al ₂ (SO ₄) ₃ = 45% CaO= 45
PAC	Polímero	Coagulación-floculación Electro fenton T.Biológico	2000	-	<0,3	PAC= 200 Polímero/PAC= 100/1	PAC= 5	55%
Al ₂ (SO ₄) ₃	Actipol A-401	Coagulación-floculación Zeolitas	1804 (diluido al 10%)	-	-	Al ₂ (SO ₄) ₃ = 50 Actipol A-401= 11,67	6,82	25%
FeCl ₃ Al ₂ (SO ₄) ₃	-	Coagulación-floculación Carbón activado en polvo	-	-	0,1	FeCl ₃ = 1136 Al ₂ (SO ₄) ₃ = 738	FeCl ₃ = 5,75 Al ₂ (SO ₄) ₃ = 5,75	55%-70% color
FeCl ₃	-	Coagulación-floculación Modificación de pH Filtración Nanofiltración	500-2150	-	0,03-0,1	FeCl ₃ = 1000-1500	FeCl ₃ = 4	(80%-85% SS) (95% Turbidez)
FeCl ₃ x6 H ₂ O	-	Coagulación-floculación Fotooxidación	5800	430	0,07	FeCl ₃ x6 H ₂ O=500	FeCl ₃ x6 H ₂ O=3-8	20%
FeCl ₃	-	Coagulación-floculación	COT: 282-417	-	-	FeCl ₃ = 800-1000	FeCl ₃ = 5	(38%-48% COT)
Al ₂ (SO ₄) ₃	Polielectrolito catiónico Nalco 7128	Coagulación-floculación Stripping	3460	150	0,04	Al ₂ (SO ₄) ₃ = 700 Polielectrolito= 3	Al ₂ (SO ₄) ₃ = 4,5	23%-27% (15%-24% COT) (70% color)
Al ₂ (SO ₄) ₃ FeCl ₃	-	Coagulación-floculación Adsorción Fango activo	2800-4200	1300-1950	-	Al ₂ (SO ₄) ₃ = 3500 FeCl ₃ = 1500	Al ₂ (SO ₄) ₃ = 6 FeCl ₃ = 5	Al ₂ (SO ₄) ₃ = 51,4% (88,7% SST) FeCl ₃ = 60,6% (95,6% SST)
Al ₂ (SO ₄) ₃ FeCl ₃	Polielectrolitos catiónicos Nalco 7128 Nalco 4684	Coagulación-floculación Ozonización Facto activado	2422-3945	106-195	0,03-0,05	Al ₂ (SO ₄) ₃ = 650-700 FeCl ₃ = 700-950 Nalco 7128= 3 Nalco 4684= 3	Al ₂ (SO ₄) ₃ = 4,5-5 FeCl ₃ = 4-5	Al ₂ (SO ₄) ₃ = 40% (25% COD) FeCl ₃ = 40% (31% COD)
Fe ₂ (SO ₄) ₃ PAC	-	Coagulación-floculación Ozonización	4580	-	0,006	Fe ₂ (SO ₄) ₃ = 2400 PAC= 1250	Fe ₂ (SO ₄) ₃ = 4-5 PAC= 5-6	Fe ₂ (SO ₄) ₃ = 67% PAC= 58%

Fuente: [22]

De la tabla 11, se puede observar la dosificación de diferentes coagulantes y floculantes empleados, en el proceso de coagulación-floculación, así como la eficiencia en la remoción de DQO, SST y turbiedad de ser el caso. Es importante recalcar que la DQO y DBO particulada serán las removidas a través de este tratamiento físico químico.

En tanto para la reducción de compuestos que se encuentran en solución, tales como sulfatos, fosfatos, cloruros, nitritos, nitratos, fluoruros, DQO y DBO soluble se debe remover mediante procesos de filtración a través de membranas, las cuales de acuerdo con el diámetro de los poros tienen la capacidad de retener ciertas moléculas y dejar pasar a otras.

1.4.8 Normativa ambiental

Ecuador cuenta con un reglamento ambiental referente a la calidad que deben presentar los efluentes al momento de realizar una descarga, ya sea a cuerpos de agua dulce, mar, alcantarillado e inclusive de acuerdo al uso que se les otorgará como riego, consumo humano, preservación de vida silvestre en aguas dulces, marinas y esteros, fines recreativos, entre otros. El cuerpo legal que contiene estos criterios de calidad es la Reforma del TULSMA, Libro 6, Anexo 1, conocido actualmente como el Acuerdo Ministerial 097-A, abarcado en el Registro Oficial 387. [40]

En el mencionado AM 097-A se presentan las tablas que contienen los límites máximos permisibles, siendo la tabla 8 y tabla 9 las que tomaremos en consideración porque hacen referencia a los límites máximos permisibles de descarga al alcantarillado y cuerpos de agua dulce, sin embargo, haremos énfasis en la tabla 8, porque los criterios de calidad son menos estrictos en comparación con la tabla 9, por lo cual, cumplir estos límites es más factible y debido a que el predio cuenta con el servicio de alcantarillado lo ideal sería, descargar el efluente a través de este sistema.

Ver anexo1 y 2 perteneciente se presenta la tabla 12 y 13.

En vista de que el actual tratamiento físico químico de lixiviados no cumple con los límites máximos permisibles establecidos en la legislación ambiental vigente y la experiencia del Relleno Sanitario El Inga tratando este tipo de aguas residuales a través de un sistema de filtración por membranas, se detalla a continuación el tamaño, rango de poros y contaminantes retenidos por cada uno de los 4 tipos de membrana con los que se cuenta en la actualidad como alternativas de tratamiento.

1.4.9 Filtración por membranas

Es una operación unitaria, que tiene como finalidad la separación de mezclas. Consiste en un medio filtrante por el cual se hace pasar la mezcla a presión, y dependiendo del tamaño del poro, la membrana actuará como una barrera selectiva reteniendo moléculas con pesos moleculares superiores a los del diámetro del poro. Entre los principales procesos de filtración por membranas se cuenta con la microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración e hiperfiltración u ósmosis inversa. Cada una de estas se diferencia de la otra, por el diámetro de los poros presentes en su superficie, además presentan permeabilidad selectiva, la cual está determinada por el tamaño y la forma del soluto a retener, así, como la distribución del tamaño de poros. [45]

Estas 4 membranas emplean la técnica de filtración tangencial, en la cual, el efluente que circula es constante, con una determinada velocidad de circulación a lo largo del área de las membranas. Por ende, la velocidad de circulación, la presión ejercida, el área superficial y el caudal son los parámetros más importantes en el diseño y operación de un sistema de filtración por membranas. [45]

A continuación, se presenta un esquema de filtración por membranas de tubo

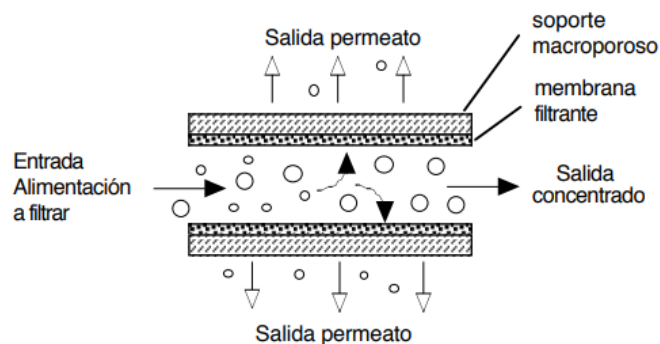


Figura 7. Principio de filtración tangencial en membranas tubulares

Fuente: [45]

De la figura 4 se observan 1 línea de ingreso y 2 líneas de salida. La línea de ingreso es conocida como alimentación, la cual representa el afluente o efluente del cual se desean retirar ciertos contaminantes disueltos. Mientras que en las líneas de salida tenemos al permeado o permeato (efluente libre de contaminantes) y el rechazo o concentrado (efluente cargado del contaminante).

El objetivo de la filtración tangencial es evitar la aglomeración de sólidos suspendidos y coloidales que hayan ingresado al sistema. La experiencia nos sugiere que los efluentes que ingresen a un sistema de filtración por membranas deben presentar una turbidez < 5 NTU, para evitar la pronta saturación de poros y la disminución del caudal de permeado. [46]

1.4.9.1 Microfiltración

Este tipo de membranas tiene la capacidad de retener partículas que se encuentran en el rango de $0,1 \mu\text{m}$ a $10 \mu\text{m}$. Por lo general, no permite el paso de sustancias en suspensión, logrando filtra un alto porcentaje de: coloides grandes, macromoléculas, bacterias, microorganismos e incluso virus. Las membranas pueden trabajar a presión atmosférica o a altas presiones (max 25 PSI), sin embargo, por lo general se operan a presiones bajas, de 6 a 8 PSI. [45]

1.4.9.2 Ultrafiltración

El sistema de ultrafiltración emplea presión para forzar el paso del agua a través de la membrana semipermeable. Son capaces de remover compuestos que presentan pesos moleculares desde 20.000 a >500.000 Dalton, así, como la retención de organismos resistentes a la cloración, bacterias, virus, antibióticos, compuestos orgánicos en solución como proteínas, azúcares cuyo tamaño se encuentre en el intervalo de $0,01 \mu\text{m}$ a $0,1 \mu\text{m}$. [45]

1.4.9.3 Nanofiltración

La nanofiltración es un tipo de filtración que emplea membranas nanoporosas aplicadas en el tratamiento de aguas con sólidos disueltos bajos, cuyo principal objetivo es la remoción de iones polivalentes, bacterias, herbicidas, dureza, olor, color, proteínas, grasas, polipéptidos y compuestos orgánicos en solución. [45]

Los tamaños de los contaminantes retenidos por los poros se encuentran en el rango de $0,001 \mu\text{m}$ a $0,01 \mu\text{m}$ y cuyos pesos moleculares estén comprendidos en el intervalo de 200 a 20.000 Dalton. Su principal función es la remoción de iones multivalentes, con una eficacia mayor al 99%, no obstante, su eficiencia disminuye al 70% en el caso de iones monovalentes al igual que en la aprehensión de sólidos disueltos. La presión de trabajo suele ser entre 70 a 75 PSI, mucho menor que la del sistema de ósmosis inversa, que oscila entre los 150 PSI. [45]

1.4.9.4 Ósmosis inversa

La ósmosis inversa es un tipo de filtración a través de una membrana semipermeable en la cual se ejerce una fuerza de empuje superior a la de la presión osmótica. De esta manera, se separan las sustancias que yacen de un lado de la membrana hasta igualar la concentración en ambos lados. [45]

Los poros de las membranas tienen un diámetro que oscila los 0,0001 μm a 0,001 μm y son capaces de tener contaminantes con pesos moleculares que se encuentran en el rango de <100 hasta 200 Dalton. Entre los principales contaminantes removidos se hallan iones monovalentes, sales disueltas como cloruros, sulfatos, fluoruros, nitritos, nitratos, fosfatos e incluso el color, por lo cual, el único compuesto que atravesará las membranas es agua. [45]

La filtración por membranas es una técnica que se emplea para la remoción de sólidos disueltos, iones multivalentes, compuestos orgánicos, proteínas, azúcares, bacterias, virus, sales, etc. Por lo cual el efluente proveniente de este proceso presentaría una calidad adecuada para la descarga en cuerpos de agua dulce o alcantarillado, tal cual se establece en la normativa ambiental vigente.

2. METODOLOGÍA

Se realizó una visita guiada por el Relleno Sanitario de Romerillos con el fin de conocer el predio, la planta de tratamiento de lixiviados (PTL) y las piscinas de almacenamiento temporal de lixiviados y de esta manera determinar los puntos para la toma de muestras.

2.1 Caracterización de lixiviados

La caracterización del efluente es fundamental para determinar la presencia o ausencia de contaminantes que se encuentran suspendidos, coloidales o en solución y de esta manera seleccionar un tratamiento idóneo para la remoción de estos. En el presente caso, se prioriza la determinación de sólidos en suspensión y en estado coloidal, debido a que el actual tratamiento físico químico de coagulación-floculación se enfoca en la remoción de estos contaminantes. Tomando en cuenta el tipo de residuos que ingresan al relleno sanitario y de acuerdo con la información brindada por el personal técnico del establecimiento se procedió a seleccionar los parámetros que se iban a analizar en laboratorio, los cuales fueron:

- pH
- Conductividad
- Turbiedad

- OD
- DBO5
- DQO
- Nitrógeno amoniacal
- Nitritos
- Nitratos
- Fósforo total
- Sulfatos
- Fosfatos
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Sólidos totales (ST)
- Sulfuros
- Cromo hexavalente

Como se puede observar, la gran mayoría de parámetros seleccionados involucran contaminantes de carácter orgánico como DBO5, DQO, fosforo, fosfatos y nitrógeno con todas sus especies. Mientras que parámetros como la conductividad y turbidez nos bosquejan una idea de la cantidad de sólidos disueltos y sólidos suspendidos inmersos en el lixiviado. Y por otro lado tenemos al oxígeno disuelto que hace referencia indirectamente de la cantidad de materia orgánica e inorgánica que requiere de O₂ para degradarse.

De acuerdo a lo mencionado por el personal técnico del Relleno, se cuenta con un centro de reciclaje, el cual se encuentra ubicado en su predio, por lo que la recuperación de plásticos, llantas, electrodomésticos y demás desechos de difícil degradación es bastante alta, además es necesario considerar y enfatizar que diariamente ingresan alrededor de 60 toneladas de residuos, la mayoría de origen orgánico, por lo que gran parte de los constituyentes del lixiviado serán de este carácter y, al no contar con un tratamiento biológico, no es posible la remoción de estos contaminantes.

Es fundamental mencionar que el Relleno de Romerillos no realiza ningún tipo de descarga de lixiviado tratado al sistema de alcantarillado o en algún cuerpo de agua dulce, esto, se debe a que la caracterización del efluente proveniente del tratamiento de coagulación-floculación no cumple con lo establecido en la normativa ambiental vigente. En vista de lo antes mencionado, se determinó la ubicación de los puntos de muestreo.

Actualmente se generan 14 l/min de lixiviado provenientes de 4 cubetos abiertos y 1 cerrado, sin embargo, en épocas de lluvia, esta producción puede incrementarse hasta 35 l/min. En el

2009, se diseñó la PTL con un caudal estimado de 1.2 l/min, ya que esa era la generación de lixiviados, de acuerdo a información brindada por el personal técnico del Relleno. No obstante, en la actualidad no se tiene la capacidad para tratar el vigente caudal, por lo que, 72 l/min son recirculados a las diferentes piscinas de almacenamiento. Es preciso mencionar que, desde la obtención de la licencia ambiental en el año 2009, no se ha podido realizar ninguna descarga de lixiviados, por lo que el pasivo ambiental ha ido incrementando con el pasar de los años.

Tabla 14. *Ubicación de los puntos de muestreo*

Ubicación	Descripción	Zona	Coordenada en X	Coordenada en Y
PTL (ingreso a la planta)	Lixiviado crudo	17 S	766776,4	9933230,9
PTL (salida de la planta)	Lixiviado tratado	17 S	766780,1	9933238,5
Piscina de almacenamiento temporal	Lixiviado tratado	17 S	766810,5	9933395,2

Fuente: Elaboración propia

Cabe recalcar la diferencia entre preservación y conservación, siendo la primera, referente a la adición de cierto compuesto químico que permitirá mantener un valor casi constante de cierto parámetro, mientras que, la segunda hace alusión a la temperatura a la cual se debe almacenar temporalmente y transportar la muestra hasta llegar al laboratorio. [41]

A continuación, se presentan el volumen recolectado, preservantes utilizados, su conservación y recipientes empleados para los parámetros analizados.

Tabla 15. *Volumen recolectado, preservación, conservación y recipientes empleados.*

Parámetro	Volumen	Preservación	Conservación	Recipiente
OD	300 ml	Sulfato manganoso Álcali-yoduro-azida Ácido sulfúrico	4°C	Winkler vidrio
pH Conductividad Turbiedad SST ST	100 ml por cada parámetro	No aplica	4°C	Polietileno de alta densidad
DBO5 DQO Nitrógeno	100 ml por cada parámetro	No aplica	4°C	Polietileno de alta densidad

amoniacal Fósforo total Sulfuros Cromo hexavalente				
Nitritos Nitratos Sulfatos Fosfatos	125 ml por cada parámetro	No aplica	4°C	Polietileno de alta densidad estéril

Fuente: Elaboración propia

Es importante precisar que la muestra recolectada fue de carácter simple integrada, es decir que se tomó en un lugar específico, pero a diferentes profundidades, por lo que fue necesario homogenizarla, de acuerdo con lo estipulado por la Dirección General de Salud Ambiental de Perú y del Ministerio de Vivienda de Perú al momento de muestrear en esta clase de efluentes. [4] [5]

Como se mencionó anteriormente, se emplearon métodos estandarizados para el análisis de diferentes parámetros electroquímicos, físico químicos, orgánicos e inorgánicos, esto para garantizar los resultados, además ciertos parámetros como es el caso de DQO, DBO5, fósforo total y sulfuros fueron realizados en un laboratorio acreditado el “Centro de Investigaciones y Control Ambiental” (CICAM).

A continuación, se detallan los métodos empleados para el análisis de los parámetros previamente establecidos.

Tabla 16. Métodos empleados para el análisis de parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Método	Tipo	Equipo/Reactivos	Resumen del procedimiento	Observaciones	Fuente
Conductividad	SM 2510 B	Electrométrico	Conductivímetro Celda estándar Solución patrón	<ol style="list-style-type: none"> 1. Calibrar el equipo con la solución patrón. 2. Homogenizar la muestra. 3. Tomar una alícuota de 10 ml. 4. Colocarla en la celda. 5. Presionar "Medición" y anotar el resultado. 	Analizado en LDIA	[42]
pH	SM 4500-H+B	Electrométrico	pH metro Electrodo Soluciones buffer de pH 4, 7 y 10	<ol style="list-style-type: none"> 1. Calibrar el equipo con la solución buffer. 2. Con la ayuda de una piseta, lavar el electrodo con agua destilada. 3. Acercar una servilleta para que absorba el agua. 4. Ingresar el electrodo en la solución acuosa a medir. 	Analizado en LDIA	[42]
Turbidez	SM 2130 B	Nefelométrico	Turbidímetro Celda estándar Soluciones patrones	<ol style="list-style-type: none"> 1. Calibrar el equipo con las soluciones patrones. 2. Homogenizar la muestra. 3. Tomar una alícuota de 10 ml. 4. Colocarla en la celda. 5. Presionar "Medición" y anotar el resultado. 	Analizado en LDIA	[42]
Oxígeno disuelto	SM 4500-OB	Yodométrico	Frascos Winkler de 300 ml Erlenmeyer de 250 ml Probeta Solución de sulfato manganoso Solución álcali-yoduro-azida Ácido sulfúrico Solución del almidón Tiosulfato de sodio 0.025N	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tomar la muestra con el frasco Winkler, de tal manera que no ingrese oxígeno al medio o que se formen burbujas y tapanla. 2. Destapar el frasco y añadir 1ml de la solución de sulfato de manganeso y 1 ml de álcali-yoduro-azida, en el orden mencionado y tapanla. 3. Invertir la botella varias veces para lograr una mezcla homogénea, y cuando el precipitado haya decantado, agregar 1 ml de ácido sulfúrico, tapar e invertir hasta mezclarlo. 5. Tomar una alícuota de 100 ml de la muestra y titularla con tiosulfato de sodio. 6. Calcular el OD. 	Analizado en LDIA	[42]

Parámetro	Método	Tipo	Equipo/Reactivos	Resumen del procedimiento	Observaciones	Fuente
Sólidos totales suspendidos	SM 2540 D	Gravimétrico	Horno Balanza analítica Bomba de vacío Sistema de filtración Agitador magnético Desecador Crisoles Pinzas Filtros	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarar los crisoles. 2. Colocar el filtro en el sistema de filtración al vacío. 3. Agregar 25 a 50 ml de la muestra. 4. Encender la bomba y esperar hasta que se haya filtrado. 5. Retirar el filtro con la pinza y colocarlo en el crisol. 6. Secar el conjunto en el horno por 1 hora. 7. Dejarlo en el desecador hasta enfriar. 8. Pesar el conjunto en la balanza. 9. Calcular los SST. 	Analizado en LDIA	[42]
DBO5	SM 5210B	Manométrico	Oxytop Incubadora Probeta Inhibidor de nitrificación Pastilla magnética Pastillas de hidróxido de sodio	<ol style="list-style-type: none"> 1. Homogenizar la muestra. 2. Tomar una alícuota de 22,7 ml de la muestra. 3. Colocarla en la botella oxytop. 4. Agregar 2 gotas de inhibidor de nitrificación. 5. Introducir la pastilla magnética. 6. Introducir el capuchón con 2 pastillas de hidróxido de sodio. 7. Cerrar la botella con el cabezal. 8. Presionar durante 3 segundos los botones de S y M. 9. Introducirla en la incubadora a una temperatura de 25°C. 	Analizado en laboratorio acreditado CICAM	[42]
DQO	SM 5220D	Espectrofotometría VIS	Reactor Viales Pipeta/Micro pipeta Espectrofotómetro	<ol style="list-style-type: none"> 1. Homogenizar la muestra. 2. Encender el digestor y programarlo a 150°C 3. Sostener el vial a 45 grados y colocar 0.2 ml de la muestra y cerrar. 4. Invertir el vial para lograr una mezcla completa. 5. Colocar el vial en el digestor cuando haya sonado la alarma que indique que se haya llegado a 150°C y esperar 2 horas. 6. Dejar enfriar el vial. 7. Medir la DQO en el espectrofotómetro. 	Analizado en laboratorio acreditado CICAM	[42]
Fósforo total	SM 4500-P	Espectrofotometría VIS	Espectrofotómetro Balanza analítica Equipo de filtración al vacío Agua ultra pura Ácido sulfúrico 5N	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar la curva de calibración. 2. Filtrar las muestras con un filtro de 0,45 µm. 3. Corregir por turbidez o color. 4. Fortificar la muestra y el duplicado. 5. Procesar la muestra. 	Analizado en laboratorio acreditado CICAM	[42]

Parámetro	Método	Tipo	Equipo/Reactivos	Resumen del procedimiento	Observaciones	Fuente
Nitrógeno amoniacal	Hach 8030	Espectrofotometría	Espectrofotómetro Probetas de 50 ml Celda estándar Estabilizador mineral Reactivo Nessler Agua destilada	<ol style="list-style-type: none"> 1. Llenar la probeta con 25 ml de la muestra. 2. Llenar otra probeta con 25 ml de agua destilada. 3. Agregar 3 gotas de estabilizador mineral a cada probeta e invertir para mezclar. 4. Agregar 3 gotas del agente de dispersión de alcohol polivinílico e invertir hasta mezclar. 5. Esperar 1 minuto. 6. Verter la solución de cada probeta en una celda. 7. Encerar el equipo con el blanco. 8. Medir la concentración de la muestra. 	Analizado en LDIA	[43]
Nitritos	Hach 8507	Espectrofotometría	Espectrofotómetro Probetas de 50 ml Celda estándar Reactivo NitraVer 3 Agua destilada	<ol style="list-style-type: none"> 1. Llenar una celda con 10 ml de la muestra. 2. Agregar el contenido de la bolsa de NitraVer 5. 3. Tapa la celda y agitar energéticamente. 4. Esperar 20 minutos 5. Llense la otra celda con agua destilada. 6. Encerar el equipo. 7. Medir la concentración de la muestra. 	Analizado en LDIA	[43]
Nitratos	Hach 8039	Espectrofotometría	Espectrofotómetro Probetas de 50 ml Celda estándar Reactivo NitraVer 5 Agua destilada	<ol style="list-style-type: none"> 1. Llenar una celda con 25 ml de la muestra. 2. Agregar el contenido de la bolsa de NitraVer 5. 3. Tapa la celda y agitar energéticamente durante 5 minutos. 4. Llense la otra celda con agua destilada. 5. Encerar el equipo. 6. Medir la concentración de la muestra. 	Analizado en LDIA	[43]
Fosfatos	Hach 8048	Espectrofotometría	Espectrofotómetro Celda estándar Reactivo FosfaVer 3 Agua destilada	<ol style="list-style-type: none"> 1. Llenar una celda con 10 ml de la muestra. 2. Agregar el contenido de la bolsa de PhoVer 3 3. Tapa la celda y agitar energéticamente por 30 segundos. 4. Esperar 2 minutos 5. Llense la otra celda con agua destilada. 6. Encerar el equipo. 7. Medir la concentración de la muestra. 	Analizado en LDIA	[43]

Parámetro	Método	Tipo	Equipo/Reactivos	Resumen del procedimiento	Observaciones	Fuente
Sulfatos	Hach 8051	Espectrofotometría	Espectrofotómetro Probetas de 50 ml Celda estándar Reactivo SulfaVer 4 Agua destilada	<ol style="list-style-type: none"> 1. Llenar una celda con 25 ml de la muestra. 2. Agregar el contenido de la bolsa de SulfaVer 4. 3. Tapa la celda y agitar energéticamente. 4. Esperar 20 minutos 5. Llène la otra celda con agua destilada. 6. Encerar el equipo. 7. Medir la concentración de la muestra. 	Analizado en LDIA	[43]
Sulfuros	4500 S-2 D	Espectrofotometría	Tubos de ensayos Cuenta gotas Espectrofotómetro Fotómetro de filtro Filtro de 600 nm Solución de ácido amino sulfúrico Solución de azul de metileno Reactivo de ácido amino sulfúrico Solución de cloruro férrico Solución de ácido sulfúrico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Transferir 7.5 ml de la muestra a dos tubos de ensayos. 2. Añadir 0.5 ml de ácido amino sulfúrico y 3 gotas de cloruro férrico al tubo A y mezclar por inversión lenta. 3. Añadir 0.5 ml de ácido sulfúrico y 3 gotas de cloruro férrico al tubo B. 4. El desarrollo de color demora entre 3 a 5 minutos. 5. Agregar 1.6 ml de (NH₄)₂HPO₄ a cada tubo y esperar de 3 a 15 minutos. 6. Comparar el color. 7. Añadir azul de metileno en el tubo B, hasta que la tonalidad de los tubos sea la misma que la del tubo A. 8. Medir la concentración de la muestra, previo encerado del espectrofotómetro. 	Analizado en laboratorio acreditado CICAM	[42]
Cromo hexavalente	Hach 8023	Espectrofotometría	Espectrofotómetro Probetas de 50 ml Celda estándar Reactivo ChromaVer 3 Agua destilada	<ol style="list-style-type: none"> 1. Llenar una celda con 10 ml de la muestra. 2. Agregar el contenido de la bolsa de ChromaVer 3. 3. Tapa la celda y agitar. 4. Esperar 5 minutos 5. Llène la otra celda con agua destilada. 6. Encerar el equipo. 7. Medir la concentración de la muestra. 	Analizado en LDIA	[43]

Con los resultados de la caracterización del lixiviado crudo, se analizó el grado de contaminación de los lixiviados, lo que permitió establecer el aporte de constituyentes en suspensión, mismos que serían removidos a través del proceso de coagulación-floculación.

2.2 Prueba de jarras

Para poder determinar la dosificación ideal de coagulante y floculante, es necesario realizar pruebas de jarras de tal manera que vaya variando tanto la dosis de PAC como de polímero aniónico, alícuotas, que serán provenientes de una solución madre y deberán ser calculadas a través de la ecuación de la dilución, que se presenta en la siguiente sección.

2.2.1 Preparación de las soluciones madre o estándar

En el caso del coagulante se preparó una solución madre de 60 000 mg/l, es decir que se pesó 60 gramos de PAC y se agregó en un balón de 1 litro, se lo aforó y con la ayuda de una pastilla magnética y la plancha de agitación se logró una correcta homogenización. Mientras que, debido a la viscosidad del floculante fue necesario llevar a punto de ebullición al agua, posteriormente se pesó 3 gramos y se fue añadiendo paulatinamente en un vaso de precipitación de 1 litro hasta lograr una correcta incorporación del polímero aniónico.

Se empleó la siguiente fórmula para determinar la alícuota de coagulante y floculante necesario de acuerdo con la concentración deseada.

$$C1.V1 = C2.V2$$

Ecuación 1. Fórmula de dilución

De donde,

C1= Concentración de la solución madre (mg/l)

C2= Concentración deseada (mg/l)

V2= Volumen de las jarras (ml)

V1= Alícuota a tomar (ml)

2.2.2 Velocidad angular de la prueba de jarras

Como se mencionó en el apartado 1.4.7.1 y 1.4.7.2, la velocidad angular de las paletas es fundamental para lograr una correcta homogenización de la muestra y de los reactivos. Por lo tanto, en la fase de coagulación se estableció en 200 RPM durante 3 minutos, mientras que en la etapa de floculación se fijó en 50 RPM por 20 minutos y se dejó sedimentar durante 20 minutos.

2.2.3 Réplica de la dosificación del Relleno sanitario de Romerillos

Se replicó la dosificación de coagulante y floculante empleado en el Relleno sanitario de Romerillos, para ello se agregó 11 ppm de PAC y 44 ppm de floculante aniónico. Cabe recalcar que el tiempo de retención hidráulico en la PTL es de 3 semanas por cada m³ de lixiviado que ingresa al sistema, esto se debe a que, al no contar con un variador de frecuencia no es posible regular las revoluciones del motor, manejándose actualmente 50 RPM. Por ende, al no efectuarse adecuadamente la coagulación y floculación, el tiempo para lograr una adecuada sedimentación incrementa considerablemente ya que no se lleva a cabo la desestabilización y aglutinación de partículas, por lo cual, los floculos formados son de tipo arenosos, es decir, muy pequeños, no se agrupan y consecuentemente se demoran mucho en sedimentar, requiriendo altos TRH.

La alícuota a tomar para la obtención de una concentración de 10 ppm de coagulante a partir de la solución madre de 60 000 ppm fue de 0.166 ml, la misma que fue tomada con una micropipeta digital. Este volumen fue determinado aplicando la ecuación 1.

$$C1.V1 = C2.V2$$

Despejando V1, que hace referencia al volumen a tomar

$$V1 = \frac{C2.V2}{C1}$$

Remplazando datos, obtenemos:

$$V1 = \frac{11 \text{ ppm} \times 1000 \text{ ml}}{60\,000 \text{ ppm}}$$

$$V1 = 0.183 \text{ ml}$$

De igual manera, la alícuota a tomar para la obtención de una concentración de 40 ppm de floculante a partir de la solución madre de 3 000 ppm fue de 13.33 ml. Este volumen fue calculado de la misma manera que en el apartado superior.

En vista de que la prueba de jarras dispone de 6 recipientes de 2000 ml cada uno, no era factible emplear únicamente 2 de ellos, por lo cual se usó la totalidad de estos, y bajo criterio propio se decidió variar la concentración de coagulante y mantener constante la de floculante para observar el comportamiento de los flóculos. Por lo cual se llenaron con 1000 ml de lixiviado crudo, se etiquetó cada envase con el número y dosificación de coagulante y floculante como se muestra a continuación.

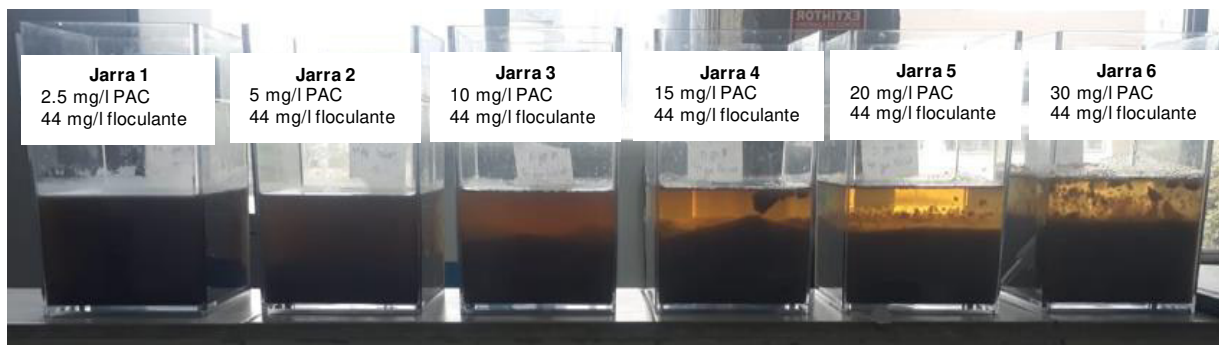


Figura 9. Ensayo de jarras N°1.

Debido a que los flóculos obtenidos de la prueba de jarras N°1 eran de aspecto arenoso, no sedimentaban adecuadamente y el clarificado ocupaba menos de $\frac{3}{4}$ del volumen de la jarra. Consecuentemente, se decidió probar nuevas dosificaciones tanto del coagulante como floculante, para lo cual se revisó bibliografía y a partir de la tesis denominada “Métodos alternativos para el tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario del cantón Mejía, Pichincha, Ecuador” realizado por María José Anrango Pavón, se resolvió replicar su propuesta para el tratamiento de lixiviados mediante coagulación floculación la cual consistía en dosificar 6000 mg/l de PAC y 1400 mg/l de floculante aniónico. [44]

2.2.4 Replica dosificación tesis

La prueba de jarras N°2, consistió en replicar la dosificación propuesta por María Anrango. Se inició con una dosis de coagulante y floculante de 6000 ppm y 1400 ppm, respectivamente, correspondiente a la Jarra 2. Sin embargo, se incrementó y disminuyó en 1000 ppm de coagulante y 200 ppm de floculante (Jarra 1 con 5000 ppm de PAC y 1200 de floculante, Jarra 3 con 7000 ppm de PAC y 1600 de floculante), esto con el fin de observar cual era el mejor resultado, y partir de este para las futuras dosificaciones.

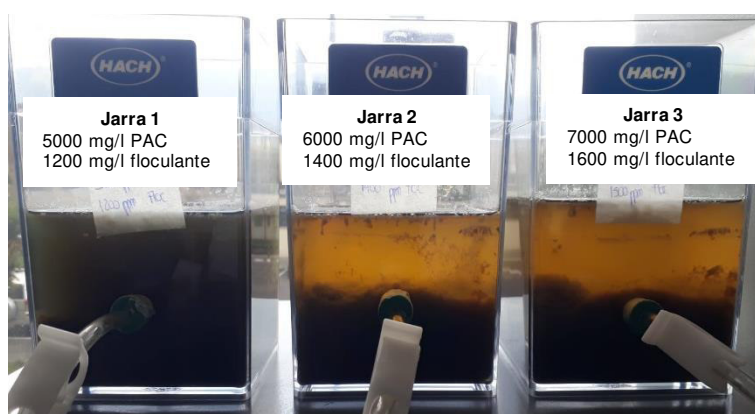


Figura 10. Ensayo de jarras N°2.

La prueba de jarras N°2 presentaba flóculos de alrededor de 1 cm, se aglutinaban rápidamente y el clarificado ocupaba entre un 50% a 60% del volumen del recipiente. Sin embargo, al levantar las paletas se pudo observar la presencia de floculante, debido a su alta viscosidad no se incorporó bien a la muestra, lo que sugiere que se llegó al punto de sobresaturación, por lo cual se procedió a mantener la concentración de coagulante constante en 6000 mg/l y variar la de floculante.

En la prueba de jarras N°3, se mantuvo constante la dosificación de coagulante en 6000 mg/l y la variable a modificar fue la dosis de floculante. El objetivo de esta variación fue el de observar hasta que concentración de floculante se obtenían flóculos de buen tamaño, que se aglutinen y sedimenten rápidamente. Se comenzó con una concentración de 800 mg/ hasta llegar a 100 mg/l.



Figura 11. Ensayo de jarras N°3.

El aspecto visual de la prueba N°3 no era muy alentadora, debido a que aún se observaba una sobresaturación de la mezcla, y a pesar de que los flóculos eran de 1 cm, estos flotaban, lo que indicaba que la dosificación de floculante todavía era muy alta, por lo cual se continuó disminuyendo la dosis.

La prueba de jarras N°4, fue una continuación de la prueba N°3, esta inició con una dosificación de 90 mg/l de floculante y se disminuyó en 10 mg/l hasta llegar a 40 mg/l, de esta manera, logramos abarcar un mayor rango de análisis del comportamiento de la saturación de la mezcla.



Figura 12. Ensayo de jarras Nº4.

La prueba de jarras Nº4, sugería que aparentemente se había determinado la dosis ideal, no se presenciaba una remanente de floculante, es decir que la mezcla era completa, además de que sus flóculos eran grandes, se aglutinaban fácilmente y sedimentaba rápidamente.

A pesar de la buena apariencia de la flocs de la prueba Nº4, decidimos verificar que la concentración de 40 mg/l de floculante era la idónea, por lo que realizamos otra prueba variando la dosis de floculante desde 30 mg/l hasta los 10 mg/l.

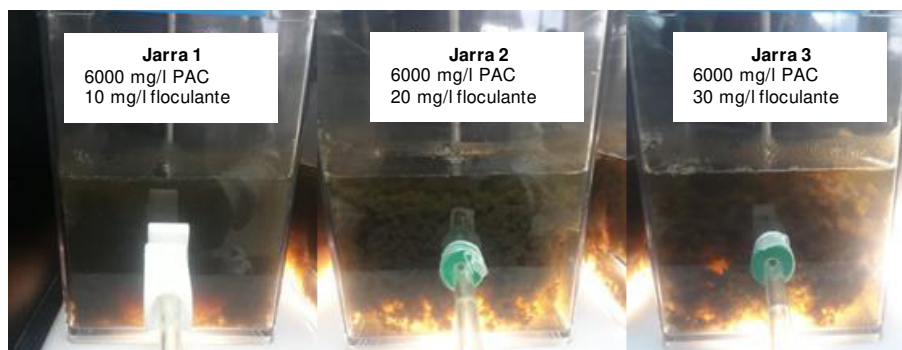


Figura 13. Ensayo de jarras Nº5

En la prueba de jarras Nº5, se pudo observar que la jarra 1 reflejaba lodos muy finos y pequeños, y a pesar de que los flóculos de las jarras 2 presentaban un buen aspecto, la mayor eficiencia se reflejaba con 30 mg/l de floculante, por lo cual, se decidió en mantener este valor constante y comenzar a variar la dosificación de coagulante.

De esta manera, se encontró la dosificación óptima de floculante, sin embargo, faltaba variara la dosis de coagulante, para lo cual, iniciamos con 6000 mg/l de PAC, y fuimos disminuyendo en 1000 mg/l, hasta llegar a los 1000 mg/l.

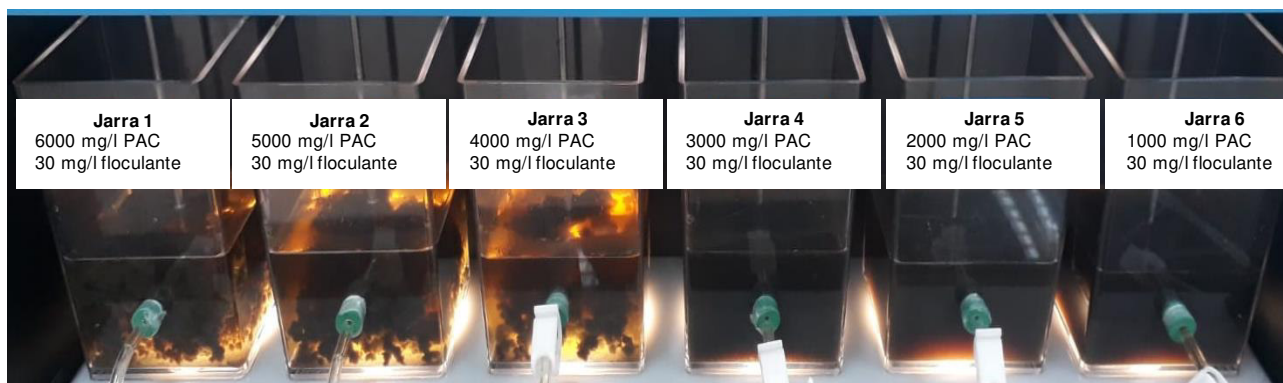


Figura 14. Ensayo de jarras N°6

De la prueba de jarras N°6 se obtuvieron 3 jarras con flóculos compactos, la jarra 1, 2 y 3, mientras que las que contenían menor dosificación de coagulante como la jarra 4, 5 y 6, no presentaban flóculos de gran tamaño, al contrario, eran de aspecto arenoso, muy finos, pequeños y no se aglutinaban. Al parecer se había encontrado el rango en el cual, tanto el coagulante como floculante funcionaban correctamente, sin embargo, decidimos profundizar un poco más, y realizar otra prueba de jarras, para establecer cuál sería la dosificación ideal de coagulante, ya que se pensaría que la diferencia de 1000 mg/l no interfiere en el proceso, no obstante, al traducirla en la cantidad que se emplearía en 1 m³ ya representa un gasto adicional.

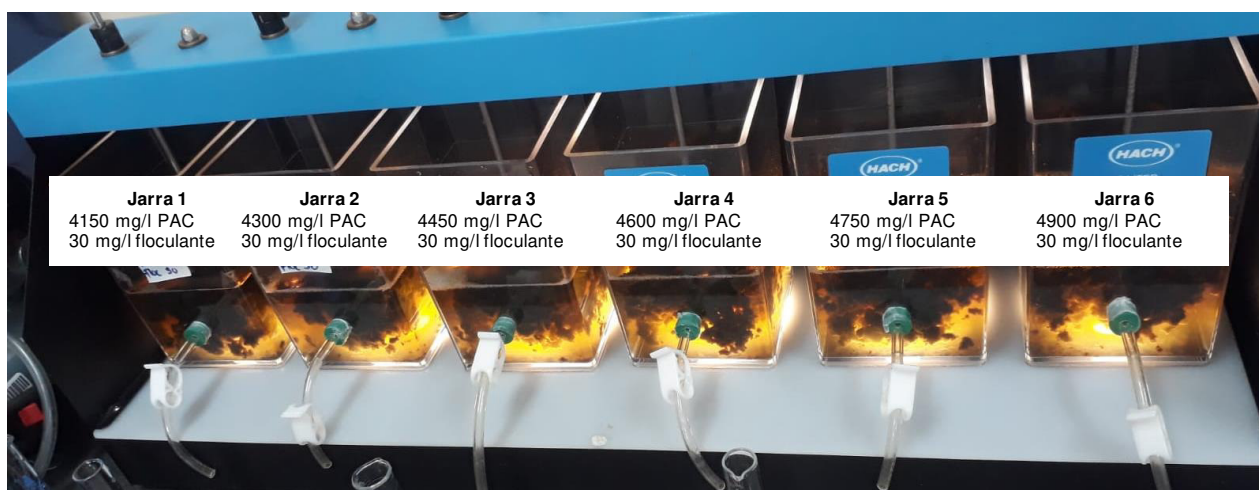


Figura 15. Ensayo de jarras N°7

En el ensayo de jarras N°7, se varió la dosificación de coagulante, iniciando con 4150 mg/l e incrementado en 150 mg/l hasta llegar a los 4900 mg/l. El floculante se mantuvo constante en 30 mg/l, la agitación al igual que en las anteriores jarras fue de 200 RPM durante 3 minutos para el coagulante y 40 RPM por 20 minutos para el floculante y posteriormente se esperó 20 minutos para la sedimentación y extracción del clarificado.



Figura 16. Ensayo de jarras N°7

Después del tiempo de espera de 20 minutos, en el que los flóculos sedimentaron, dejando al clarificado en la parte superior y los lodos decantados, se pudo observar que en las jarras 1, 3 y 5 los flocs no flotaban, contrario a lo que sucedió con las jarras 2, 4 y 6. Este fue uno de los motivos por el cual, se estableció que la jarra 1, con dosificación de 4150 mg/l de coagulante y 30 mg/l de floculante es la mejor dosis para el tratamiento de lixiviados.

A continuación, se presenta el cuadro resumen, con los diferentes arreglos de coagulante y floculante, velocidades angulares empleadas, entre otros.

Tabla 17. Resumen de dosificaciones empleadas en las diferentes pruebas de jarras realizadas

Prueba de jarras	Coagulante empleado	Floculante empleado	Jarra	Alícuota de coagulante	Alícuota de floculante	Dosis coagulante	Dosis de floculante	RPM coagulante	Tiempo de mezcla	RPM floculante	Tiempo de mezcla	Tiempo de sedimentación
N°1	PAC	Polímero aniónico	1	0.041 ml	14.66 ml	2.5 mg/l	44 mg/l	200	3 minutos	50	20 minutos	20 minutos
			2	0.083 ml	14.66 ml	5 mg/l	44 mg/l					
			3	0.16 ml	14.66 ml	10 mg/l	44 mg/l					
			4	0.25 ml	14.66 ml	15 mg/l	44 mg/l					
			5	0.33 ml	14.66 ml	20 mg/l	44 mg/l					
			6	0.5 ml	14.66 ml	30 mg/l	44 mg/l					
N°2	PAC	Polímero aniónico	1	83.33 ml	400 ml	5000 mg/l	1200 mg/l	200	3 minutos	50	20 minutos	20 minutos
			2	100 ml	466.66 ml	6000 mg/l	1400 mg/l					
			3	116.66 ml	533.33 ml	7000 mg/l	1600 mg/l					
N°3	PAC	Polímero aniónico	1	100 ml	133.33 ml	6000 mg/l	400 mg/l	200	3 minutos	50	20 minutos	20 minutos
			2	100 ml	166.66 ml	6000 mg/l	500 mg/l					
			3	100 ml	200 ml	6000 mg/l	600 mg/l					
			4	100 ml	233.33 ml	6000 mg/l	700 mg/l					
			5	100 ml	266.66 ml	6000 mg/l	800 mg/l					
			6	100 ml	33.33 ml	6000 mg/l	100 mg/l					
N°4	PAC	Polímero aniónico	1	100 ml	13.33 ml	6000 mg/l	40 mg/l	200	3 minutos	50	20 minutos	20 minutos
			2	100 ml	16.66 ml	6000 mg/l	50 mg/l					
			3	100 ml	20 ml	6000 mg/l	60 mg/l					
			4	100 ml	23.33 ml	6000 mg/l	70 mg/l					
			5	100 ml	26.66 ml	6000 mg/l	80 mg/l					
				100 ml	30 ml	6000 mg/l	90 mg/l					

Fuente: Elaboración propia

Prueba de jarras	Coagulante empleado	Floculante empleado	Jarra	Alícuota de coagulante	Alícuota de floculante	Dosis coagulante	Dosis de floculante	RPM coagulante	Tiempo de mezcla	RPM floculante	Tiempo de mezcla	Tiempo de sedimentación
N°5	PAC	Polímero aniónico	1	100 ml	3.33 ml	6000 mg/l	10 mg/l	200	3 minutos	50	20 minutos	20 minutos
			2	100 ml	6.66 ml	6000 mg/l	20 mg/l					
			3	100 ml	10 ml	6000 mg/l	30 mg/l					
N°6	PAC	Polímero aniónico	1	100 ml	10 ml	6000 mg/l	30 mg/l	200	3 minutos	50	20 minutos	20 minutos
			2	83.33 ml	10 ml	5000 mg/l	30 mg/l					
			3	66.66 ml	10 ml	4000 mg/l	30 mg/l					
			4	50 ml	10 ml	3000 mg/l	30 mg/l					
			5	33.33 ml	10 ml	2000 mg/l	30 mg/l					
			6	16.66 ml	10 ml	1000 mg/l	30 mg/l					
N°7	PAC	Polímero aniónico	1	69.16 ml	10 ml	4150 mg/l	30 mg/l	200	3 minutos	50	20 minutos	20 minutos
			2	71.66 ml	10 ml	4300 mg/l	30 mg/l					
			3	74.16 ml	10 ml	4450 mg/l	30 mg/l					
			4	76.66 ml	10 ml	4600 mg/l	30 mg/l					
			5	79.16 ml	10 ml	4750 mg/l	30 mg/l					
			6	81.66 ml	10 ml	4900 mg/l	30 mg/l					

En la tabla 16, podemos observar las dosificaciones empleadas en las diferentes pruebas de jarras, así como las alícuotas tomadas de las soluciones madres de 60 000 ppm de coagulante y 3 000 ppm de floculante, las velocidades y tiempos de mezcla e intervalos de decantación. Las alícuotas fueron calculadas empleando la ecuación 1 denominada "Fórmula de dilución".

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Para determinar la eficiencia del actual tratamiento de coagulación-floculación, velocidad de mezcla y tiempos de retención hidráulico, se llevó a cabo la evaluación de las operaciones y procesos unitarios que forman parte del tratamiento primario.

Cabe mencionar que la planta de tratamiento cuenta con un reactor de mezcla, un tanque de sedimentación y otro de almacenamiento temporal de lixiviado tratado. El reactor de mezcla de 1m³, tiene como finalidad la homogenización de PAC y polímero aniónico, cuya dosis actual es de 10 mg/l de PAC y 44 mg/l, respectivamente. Sin embargo, al no contar con un variador de frecuencia, no es posible modificar la velocidad de acuerdo a las necesidades de cada etapa, manteniéndose 40 RPM constantes durante todo el proceso de coagulación-floculación. Adicionalmente las fases antes mencionadas se llevan a cabo al mismo tiempo, ya que el coagulante y floculante son agregados a través de bombas dosificadoras automáticas, por lo que no se lleva a cabo la desestabilización de las cargas electrostáticas superficiales de las partículas generado durante las altas velocidad de la coagulación, por lo cual, esto debe compensarse con un alto tiempo de retención hidráulico de 3 semanas en el sedimentador para poder tratar 1m³. El TRH del actual tratamiento es considerablemente alto debido a que los flóculos formados son pequeños y de muy bajo peso, por lo cual se demoran en precipitar.

Con el fin de poder determinar cuál es la eficiencia de la dosificación actual y de la propuesta, se realizó la caracterización del lixiviado crudo, tratado in situ y tratado ex situ mediante el ensayo de jarras.

A continuación, se detallan los resultados obtenidos de la caracterización del lixiviado del Relleno Sanitario de Romerillos, mismos que nos permitirán establecer la concentración de contaminantes presentes tanto en el lixiviado crudo y en el lixiviado tratado con la actual dosificación que se maneja y con la dosificación propuesta.

Tabla 18. Resultados análisis de parámetros físico químicos del lixiviado pre y post tratamiento.

Parámetro	Lixiviado Crudo	Tratamiento actual	Tratamiento propuesto	Límite descarga alcantarillado	Límite descarga cuerpos agua dulce
Conductividad	17800	1684	1081	-	-
Turbiedad	163	186	15.5	-	-
OD	<0.2	<0.2	<0.2	-	-
DBO5	1178	493	601	250	100
DQO	5380	2290	2616	500	200
DBO5/DQO	0.21	0.21	0.23	-	-
Nitrógeno Amoniacal	2.35	0.75	0.54	-	30

Nitritos	1.32	0.17	0.11	-	-
Nitratos	10	28.5	16.9	-	-
Fósforo total	23.8	2.4	<0.10	15	10
Sulfatos	50	155	109	400	1000
Fosfatos	60	33	24	-	-
Sólidos suspendidos totales	620	112	15	220	130
Sólidos totales	8980	3815	1508	1600	1600
Sulfuros	0.94	0.33	0.13	1.00	0.50
Cromo hexavalente	0.98	0.91	0.76	0.50	0.50
(-) Significa que no está normado en el reglamento ambiental vigente					

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 18, se puede observar las diferencias entre la dosificación actual y la propuesta, llamando la atención el incremento de la turbidez del tratamiento actual con respecto al lixiviado crudo, es decir, que la turbiedad aumentó de 163 a 186 con la adición del coagulante y floculante, reflejándose una eficiencia negativa de -14.11%, mientras que, con el tratamiento establecido a través de pruebas de jarras, la eficiencia es del 90.83%.

Se puede evidenciar la reducción de la concentración de contaminantes que se encuentran relacionados con elementos en suspensión y en estado coloidal. De tal manera que la turbiedad decreció considerablemente, específicamente en un 90%. Así mismo, se observa una pequeña disminución de la DBO5, lo que hace referencia a que la mayoría de materia orgánica se encuentra en solución y un porcentaje minoritario se halla en estado particulado.

Lo que se refiere a parámetros de carácter orgánico como fósforo total, sulfatos, sulfuros, nitritos, nitratos, nitrógeno amoniacal y cromo hexavalente, se refleja una pequeña disminución, la cual es atribuida a procesos biológicos de carácter anaerobio que se desarrollan en ausencia de oxígeno. El motivo por el cual hacemos esta aclaración se debe a que el tratamiento que estamos empleando no tiene la capacidad para reducir la concentración de nutrientes, ni de sales, únicamente actúa sobre elementos que se encuentran en suspensión.

En cuanto se refiere a fósforo total, sulfatos, sólidos suspendidos totales, sólidos totales, sulfuro, se puede observar que la concentración de estos, cumple con los límites máximos permisibles tanto para descarga a alcantarillado como a un cuerpo de agua dulce. Sin embargo, tanto la DBO5, DQO y cromo hexavalente, no cumplen los límites, por lo que se sugiere removerlos a través de un sistema de filtración por membras. El motivo por el cual no

es factible remover la DBO5 a través de un sistema tratamiento biológico se debe a que la relación de biodegradabilidad del lixiviado crudo es de 0.21, lo cual nos indica que su biodegradabilidad es muy baja, es decir, que contiene una mayor cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos de difícil degradación por medios biológicos mencionado en el apartado 1.4.4.

Es importante comentar cuál es el motivo por el que la DBO5 y DQO del actual tratamiento es inferior a la del tratamiento propuesto. Este fenómeno es debido al alto TRH de 3 semanas, ya que mientras mayor sea este, la materia orgánica e inorgánica tiene mayor tiempo para biodegradarse, contrario a lo que sucede con el tratamiento con lotes cuyo tiempo de retención hidráulico en las jarras fue de 45 minutos.

A continuación, se presentan las figuras dosis vs turbiedad, las cuales permiten establecer la dosificación ideal de coagulante y floculante que se debe añadir. Es importante mencionar que el punto más bajo de la curva representa la cantidad idónea de PAC y polímero aniónico, sin embargo, se debe considerar los siguientes criterios antes de tomar una decisión:

1. Que, al agregar una dosis excesiva de PAC, las cargas electrostáticas de las partículas en suspensión y en estado coloidal se estabilizan, es decir que toman la carga inicial y vuelven a repelerse, por lo que la turbiedad incrementa.
2. Que, al añadir demasiada cantidad de polímero, se tiende a producir flóculos arenosos, casi imperceptibles a la vista, que prácticamente no sedimentan por lo cual la turbiedad incrementa. [39]

Prueba de jarras N°1

Tabla 19. Dosificación de la prueba de jarras N°1

N. Jarra	Coagulante (PAC)	Floculante (Aniónico)	Turbiedad inicial	Turbiedad final	Eficiencia %	Índice de Wilcomb
Jarra 1	2.5 mg/l	44 mg/l	163	183	-12.27	0
Jarra 2	5 mg/l	44 mg/l	163	174	-6.75	0
Jarra 3	10 mg/l	44 mg/l	163	123	24.54	0
Jarra 4	15 mg/l	44 mg/l	163	78	52.14	2
Jarra 5	20 mg/l	44 mg/l	163	88	46.01	2
Jarra 6	30 mg/l	44 mg/l	163	76	53.37	2

De la tabla 19, se puede observar la dosificación empleada en la prueba de jarras N°1, considerando el tamaño, compactación y sedimentación del floc se lo ha calificado de acuerdo con el índice de Wilcomb (IW), descrito en el apartado 1.4.7.2. Y en vista de la eficiencia del tratamiento, se estimó la necesidad de variar las dosis de PAC y polímero aniónico hasta lograr un buen resultado.

A través de la figura 17 se puede determinar cuál es la turbidez final de cada dosificación, siendo el punto más bajo el ideal a ser replicado. Sin embargo, el rango de turbiedad final tuvo un valor máximo en 73 y un mínimo en 183, lo cual refleja una deficiencia en el tratamiento.

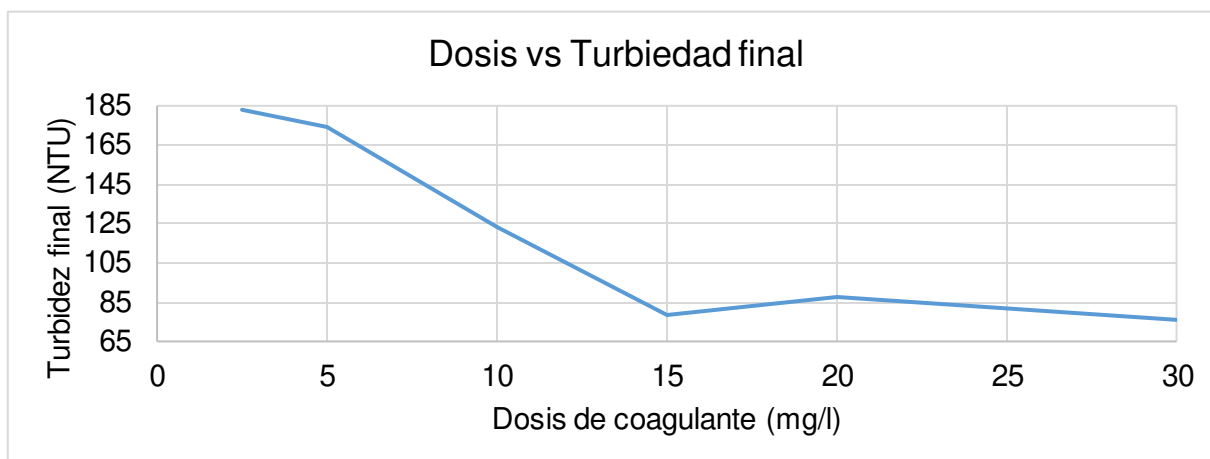


Figura 17. Curva Dosis vs Turbiedad final de la jarra N°1

Prueba de jarras N°3

Tabla 20. Dosificación de la prueba de jarras N°3

N. Jarra	Coagulante (PAC)	Floculante (Aniónico)	Turbiedad inicial	Turbiedad final	Eficiencia %	Índice de Wilcomb
Jarra 1	6000 mg/l	100	293	46	84.30	6
Jarra 2	6000 mg/l	400	293	21	92.83	6
Jarra 3	6000 mg/l	500	293	23	92.15	6
Jarra 4	6000 mg/l	600	293	27	90.78	6
Jarra 5	6000 mg/l	700	293	24	91.81	6
Jarra 6	6000 mg/l	800	293	21	92.83	6

En la tabla 20, se puede observar la dosificación empleada en el test de jarras N°3, la turbiedad inicial y final, la eficiencia del tratamiento y el índice de Wilcomb, que a diferencia del ensayo anterior (IW= 0 y 2), la apariencia, tamaño y sedimentación de los flocs del presente ensayo era buena (IW= 6). Sin embargo, al levantar las paletas, el polímero era visible, no se incorporaba correctamente. Lo que sugirió que se llegó al punto de sobresaturación de la mezcla, debido a la excesiva dosis añadida, por lo cual, se comenzó a disminuir la concentración de floculante y mantener constante la de PAC.

En la figura 19 se puede observar la variación de la curva a lo largo de las diferentes dosificaciones de floculante. Es posible observar que la dosis de 400 mg/l presenta una turbiedad de 21 NTU, y posterior a esta, mientras se sigue incrementando la cantidad de

polímero aniónico, la turbidez aumenta (600 mg/l), y luego disminuye (800 mg/l), tal como se describe en el apartado 3.1, criterio 2.

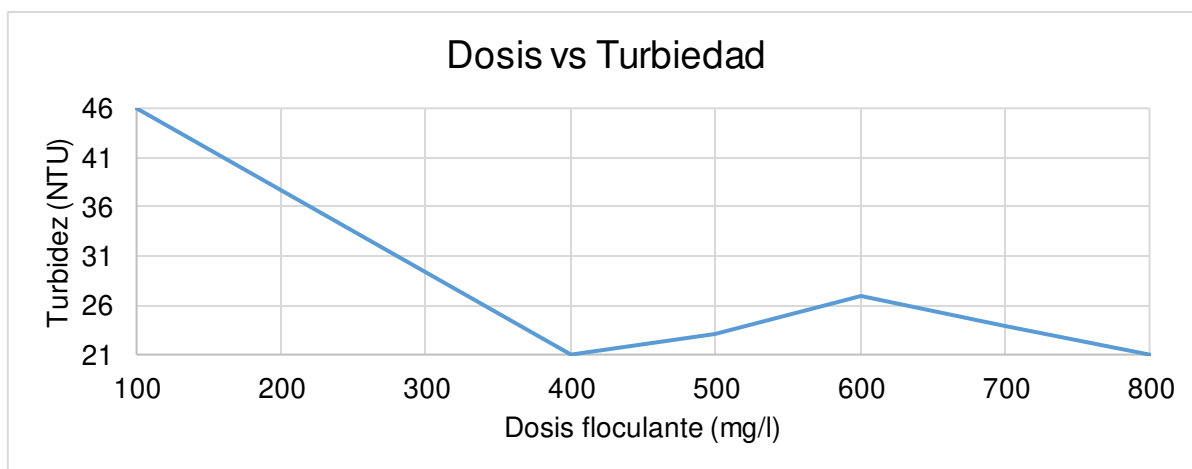


Figura 19. Curva Dosis vs Turbiedad final de la jarra N°3

Prueba de jarras N°4 y 5

Tabla 21. Dosificación de la prueba de jarras N°4 y 5

N. Jarra	Coagulante (PAC)	Floculante (Aniónico)	Turbiedad inicial	Turbiedad final	Eficiencia %	Índice de Wilcomb
Jarra 6	6000 mg/l	90 mg/l	254	13.8	94.57	8
Jarra 5	6000 mg/l	80 mg/l	254	15.5	93.90	8
Jarra 4	6000 mg/l	70 mg/l	254	12.9	94.92	8
Jarra 3	6000 mg/l	60 mg/l	254	17.2	93.23	8
Jarra 2	6000 mg/l	50 mg/l	254	13.3	94.76	8
Jarra 1	6000 mg/l	40 mg/l	254	11.3	95.55	8
Jarra 3	6000 mg/l	30 mg/l	254	13.3	94.76	8
Jarra 2	6000 mg/l	20 mg/l	254	14	94.49	2
Jarra 1	6000 mg/l	10 mg/l	254	28	88.98	0

De la tabla 21, se puede observar la dosificación empleada en el test de jarras N° 4 y 5, la turbiedad inicial y final, la eficiencia del tratamiento y el índice de Wilcomb, que a diferencia del ensayo anterior (IW= 6), los flóculos del ensayo presentaban signos de mayor aglutinación, su tamaño era de aproximadamente 1.5 cm de diámetro y su sedimentación era más rápida (IW=8); el polímero ya no era visible al levantar las paletas, su incorporación había sido correcta.

A través de la figura 21 se puede observar la variación de la curva a lo largo de las diferentes dosificaciones de floculante. Es posible observar que la dosis de 40 mg/l presenta una

turbidez de 11.3 NTU, y, a medida que incrementa la dosis del polímero la turbiedad aumenta y progresivamente disminuye.

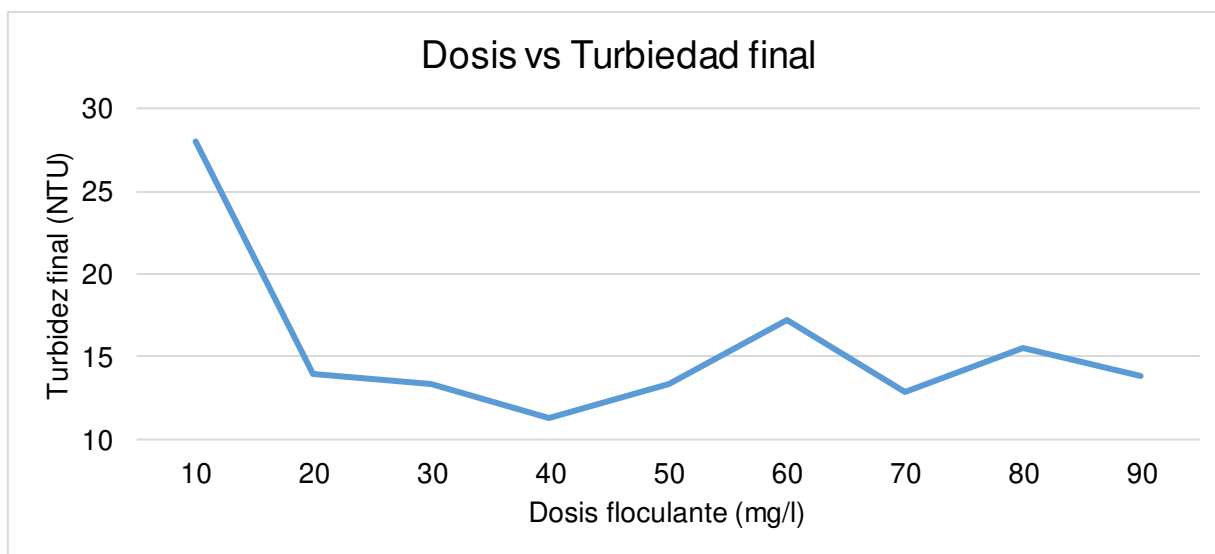


Figura 21. Curva Dosis vs Turbiedad final de la jarra N°4 y 5

Prueba de jarras N°6

Tabla 22. Dosificación de la prueba de jarras N°6

N. Jarra	Coagulante (PAC)	Floculante (Aniónico)	Turbiedad inicial	Turbiedad final	Eficiencia %	Índice de Wilcomb
Jarra 1	6000 mg/l	30	141	6.59	95.33	10
Jarra 2	5000 mg/l	30	141	14.2	89.93	10
Jarra 3	4000 mg/l	30	141	25.5	81.91	10
Jarra 4	3000 mg/l	30	141	82	41.84	2
Jarra 5	2000 mg/l	30	141	113	19.86	2
Jarra 6	1000 mg/l	30	141	121	14.18	2

De la tabla 22, se puede observar la dosificación empleada en el test de jarras N° 6, la turbiedad inicial y final, la eficiencia del tratamiento y el índice de Wilcomb, que, a diferencia de los ensayos anteriores, la variable a modificar era la dosificación de PAC, en lugar del floculante, por lo que las características visuales de los flocs variarían considerablemente, presentando en las jarras 4,5 y 6 un IW=2, mientras que los envases con mayor dosis reflejaban IW de 10.

De la figura 23 se puede observar la variación de la curva a lo largo de las diferentes dosificaciones de coagulante. Es posible observar que la dosis de 6000 mg/l presenta una turbidez de 6.59 NTU, sin embargo, la turbiedad que reflejaban las jarras que contaban con

4000 mg/l y 5000 mg/l no era muy alejada, contando con 25.5 NTU y 14.2 NTU, respectivamente. Por lo cual se decidió ampliar el rango entre estas dosis.

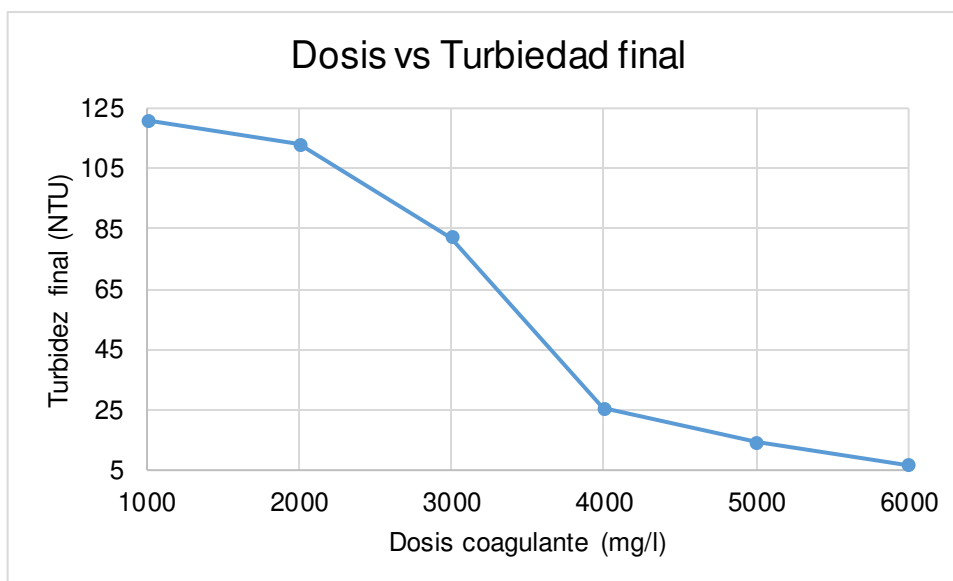


Figura 23. Curva Dosis vs Turbiedad final de la jarra N°6

Prueba de jarras N°7

Tabla 23. Dosificación de la prueba de jarras N°7

N. Jarra	Coagulante (PAC)	Floculante (Aniónico)	Turbiedad inicial	Turbiedad final	Eficiencia %	Índice de Wilcomb
Jarra 1	4150	30	169	15.5	90.83	10
Jarra 2	4300	30	169	16.5	90.24	8
Jarra 3	4450	30	169	13.9	91.78	10
Jarra 4	4600	30	169	12.8	92.43	8
Jarra 5	4750	30	169	10.6	93.73	10
Jarra 6	4900	30	169	8.76	94.82	8

En la tabla 23, se puede observar la dosificación empleada en el test de jarras N° 7, la turbiedad inicial y final, la eficiencia del tratamiento y el índice de Wilcomb (IW). Este ensayo permitió ampliar el rango de acción del PAC, lo cual favoreció en la determinación ideal de coagulante. El tamaño, facilidad de aglutinación y sedimentación de los flocs fue muy buena, sin embargo, en las jarras con IW=8, se observaba pocos flóculos que no sedimentaban, mientras que los de IW=10, reflejaban flóculos grandes de aproximadamente 1.5 cm, con buenos signos de aglutinación y con sedimentación perfecta.

De la figura 24 se puede observar la variación de la curva a lo largo de las diferentes dosificaciones de coagulante. Es posible observar que la dosis de 4900 mg/l presenta una turbiedad de 8.76 NTU, sin embargo, la turbiedad que reflejaba las jarras que contaba con

4150 mg/l no era muy lejana, con 15.5 NTU, por lo que debido a la diferencia de 750 mg/l se decidió que la dosis ideal de coagulante era de 4150 mg/l. Además, se observa como incrementa la turbidez con 4300 mg/l y luego disminuye, tal como se describe en el apartado 3.1, criterio 1.

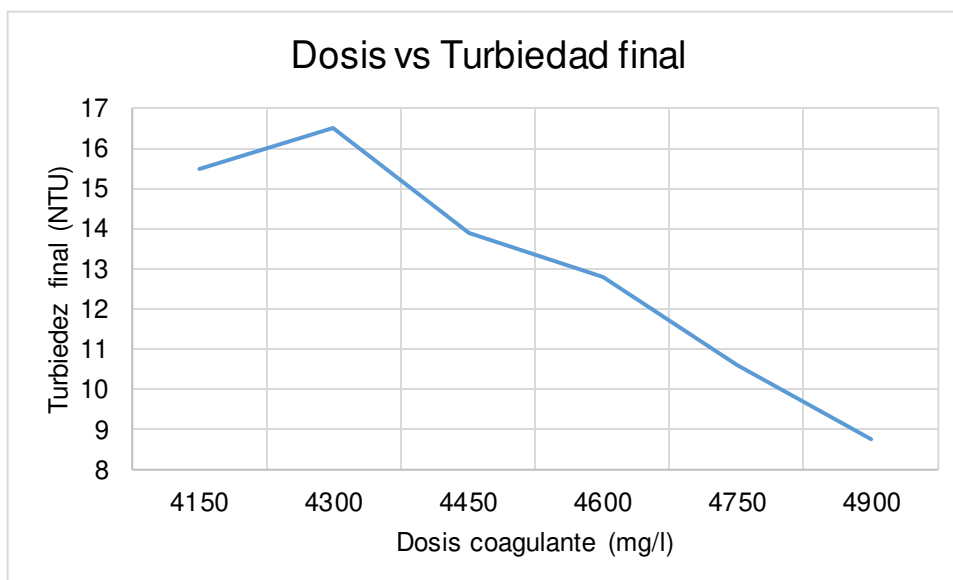


Figura 24. Curva Dosis vs Turbiedad final de la jarra N°7

3.2 Propuestas de mejora

De la prueba de jarras N°7 se determinó que la dosis ideal de PAC y floculante, adicionada a una velocidad de 200 RPM y 40 RPM durante un tiempo de 3 min y 20 min, respectivamente es de 4150 mg/l de coagulante y 30 mg/l de polímero aniónico y posteriormente el tiempo de sedimentación es de 20 minutos.

Convirtiendo las unidades al volumen a tratarse de 1 m³, tenemos que se deben adicionar 4.15 kg de PAC en 1 m³ de lixiviado tratado, sin embargo, se recomienda hacer una solución patrón concentrada de 415000 ppm obtenida a partir de la mezcla de 20.75 kg de PAC en 50 litros de agua, siendo la alícuota de 10 litros a añadir al lixiviado crudo, sobrando 40 litros que alcanzarían para 4 lotes más. En el caso del polímero aniónico la solución estándar sería de 300000 ppm, generada a través de la mezcla de 300 g en 10 litros de agua, requiriendo agregar una alícuota de 100 mililitros. Se sugiere que el tiempo de retención en el tanque de sedimentación sea de 2 a 3 horas para la obtención de un buen clarificado.

No obstante, como se mencionó en el apartado 1.4.7, el tratamiento de coagulación floculación únicamente remueve sólidos en suspensión y en estado coloidal, por lo que la

reducción de contaminantes en solución se debe realizar a través de otra técnica. En este caso sugerimos emplear filtración por membranas en serie detallada en el apartado 1.4.9, es decir primero microfiltración y posteriormente ósmosis inversa. El motivo por el cual se recomienda la microfiltración se debe a que, en esta etapa, se removerán los sólidos coloidales que han quedado evitando la saturación temprana de los poros del sistema de ósmosis inversa, la cual tendrá como función la remoción de sales, metales pesados, materia orgánica en solución, virus y bacterias

Con el fin de comprender las diferencias de diámetros de los poros de cada una de las membranas, se presenta la figura 5, en la cual se observa las variaciones y rangos del tamaño de los poros. [45]

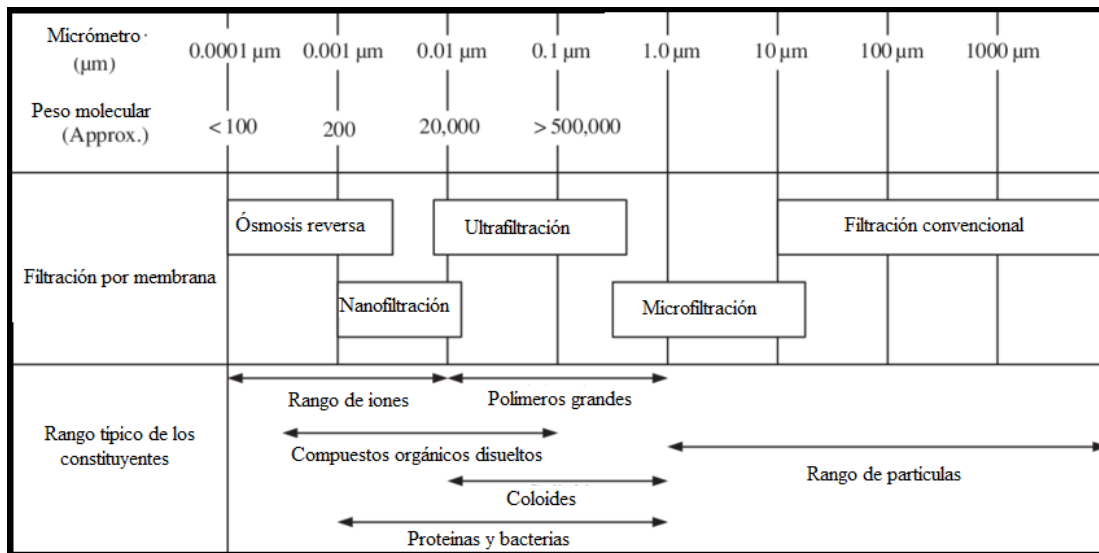


Figura 8. Principio de filtración tangencial en membranas de tipo tubular

Fuente: [45]

En la figura 5, se observan los intervalos de tamaño típicos de ciertas constituyentes como iones, coloides, proteínas, bacterias, polímeros grandes, entre otros, y de igual manera, se deduce brevemente el rango de acción de cada membrana.

De tal manera que el tratamiento de lixiviados propuesto tendría la capacidad de tratar la totalidad de los 20.832 m³/día de lixiviados generados actualmente, la misma que contaría con las siguientes etapas:

- Tanque de mezcla de 25 m³ con variador de frecuencia para realizar la coagulación-floculación. El volumen del tanque considera la generación actual de 14 l/min
- Tanque de sedimentación para la obtención de un buen clarificado

- c) Sistema de microfiltración para la eliminación de partículas suspendidas y coloidales residuales, proteínas y bacterias. Durante esta etapa el lixiviado previamente tratado a través de coagulación-floculación ingresaría a una bomba que presurizará el efluente a unas 6 a 8 PSI.
- d) Sistema de ósmosis inversa para la retención de iones mono y divalentes (sales, aniones y cationes (metales pesados como cromo hexavalente), compuestos orgánicos disueltos (DBO5 soluble). Finalmente, en esta etapa, el efluente será presurizado a 150 PSI.

En condiciones de funcionamiento óptimas se puede tratar hasta 8 m³/h en el sistema de filtración por membranas, siempre y cuando estas reciban un mantenimiento periódico y se inyecte un antiincrustante para evitar la formación de sólidos en las membranas.

Es importante mencionar que se analizaron otras técnicas para el tratamiento de los lixiviados, como es el caso de la precipitación química para la remoción de metales pesados, sin embargo, debido a que se debería agregar una base al lixiviado crudo, el pH de este, incrementaría hasta el rango en el cual, el metal a remover se transforme de solución a un hidróxido metálico, el mismo que sedimentará. Y como resultado, el metal al no estar en estado líquido, dejaría de ser un contaminante del efluente. No obstante, al agregar una sal básica, se incrementa la conductividad ya que se está incorporando sólidos disueltos al agua residual, los mismos que necesitarían ser removidos, es decir que reduciríamos la concentración de un parámetro, pero incrementaríamos el de otro, lo cual no conviene en términos de costo-beneficio.

De igual manera, se evaluó la posibilidad de emplear resinas de intercambio iónico, sin embargo, estas, actúan removiendo cationes (metales pesados, calcio, bario, zinc, entre otros) y aniones (sulfatos, fosfatos, nitritos, nitratos, cloruros, sulfuros), pero, no disminuyen la materia orgánica soluble, uno de los parámetros que se requiere disminuir.

3.3 Conclusiones

La caracterización de lixiviados provenientes del relleno sanitario de Romerillos refleja una gran cantidad de materia orgánica e inorgánica en solución, esto debido a que la concentración de la DBO5 y DQO es de 1178 mg/l y 5380 mg/l, respectivamente. Además, al realizar la relación DBO5/DQO se obtiene 0.21 lo que nos indica que la mayor cantidad de contaminantes inmersos en este efluente no son de fácil biodegradabilidad, por lo que la aplicación de un tratamiento biológico no sería lo adecuado, más bien, se debe plantear un tratamiento físico químico para la remoción de sólidos suspendidos y disueltos. En el caso de

los sólidos suspendidos se ha determinado una presencia de 620 mg/l, la cual influye directamente en la turbiedad, ya que esta última está relacionada con la presencia de sólidos en suspensión y en estado coloidal, la cual fue reportada con un valor de 163 NTU. Por otro lado, la conductividad que es asociada a los sólidos disueltos fue de 17800 $\mu\text{s}/\text{cm}$, lo sugiere que se cuenta con sales en solución, iones ya sean aniones o cationes. En cuanto se refiere a nutrientes la concentración de fósforo total fue de 23.8 mg/l, nitrógeno amoniacal con 2.35 mg/l, es importante recalcar que, en el caso de querer aplicar un tratamiento biológico, se debe mantener la relación DBO5:N:P de 100:5:1.

La composición de lixiviados de un relleno sanitario, con respecto a otro varía rotundamente, por lo cual no es factible aseverar que la concentración de contaminantes será igual, ya que esto, dependerá directamente del tipo de residuos, su origen y cantidad, además, el clima afectará la generación de lixiviados, ya que en épocas de mayor precipitación el volumen producido aumentará, contrario a lo que sucederá en meses de estiaje. En la temporada de alta pluviosidad se presenta una dilución debido al aporte de agua lluvia, mientras que en las de baja precipitación, se concentran los contaminantes.

Al realizar las pruebas de jarras se pudo observar claramente una modificación en el color aparente del lixiviado. Presentando, el lixiviado crudo un tono negro, mientras que, al agregar el PAC, este otorga un color ámbar claro, sin embargo, al no estar normado el color real en la normativa para descarga al alcantarillado no supone un problema, mientras que, si se llegará a cumplir con los límites máximos permisibles para la descarga en cuerpos de agua dulce, se debe remover el color, ya sea a través de torres de adsorción de carbón activado o mediante las membranas de filtración.

Las múltiples pruebas de jarras realizadas permitieron determinar cuál sería la dosis ideal de coagulante y floculante, no obstante, para establecerla, fue necesario mantener la dosificación de floculante constante e ir variando la de coagulante, esto, con la finalidad de visualizar cual era el rango de acción del coagulante, cuando era la variable dependiente, y de igual manera, al mantener variable la cantidad de PAC y constante la del polímero aniónico. De esta manera se logró descartar varios arreglos de estos compuestos hasta lograr que los flóculos formados sean de un gran tamaño, de rápida aglutinación y sedimentación, lo cual fue obtenido a través de la adición de 4150 mg/l de policloruro de aluminio y de 30 mg/l de polímero aniónico. Es importante recalcar que la velocidad y tiempo de mezcla fueron determinantes para la obtención de los resultados, siendo 200 RPM y 3 minutos de mezcla para la coagulación y 50 RPM y 20 minutos de mezcla en la floculación y 20 minutos de sedimentación. Al realizar un tratamiento por batch en lugar de continuo, se obtiene una mayor cantidad de lixiviado tratado, tomando en cuenta que el tiempo de retención actual de 1 m^3 es de 3 semanas, frente a 2 o 3 horas que se demoraría en sedimentar, resulta

conveniente establecer este tipo de tratamiento, por lo que la adquisición de un variador de frecuencia es necesario para poder regular la revoluciones por minutos de acuerdo con la necesidad de cada etapa.

La preparación del coagulante y floculante es fundamental, por lo que el dominio de la ecuación de la dilución es importante, ya que esta nos permitirá determinar con gran exactitud cuál es la dosis ideal de PAC y polímero. Para un mayor precisión y exactitud las alícuotas que presentaban decimales fueron extraídas con micropipetas y pipetas automáticas de volumen variable, de esta manera se garantiza que la pérdida de las soluciones es muy baja, contrario a lo que sucede en los balones aforados y probetas, ya que, en estos instrumentos, las soluciones se quedan adheridas en las paredes del recipiente.

Se analizaron otras técnicas físico químicas para el tratamiento de lixiviados, como el caso de la precipitación química y las resinas de intercambio iónico, sin embargo, estas removían ciertos parámetros, como metales pesados, sulfatos, sulfuros, nitritos, nitratos, cloruros, fosfatos, entre otros, no obstante, la materia orgánica soluble no era retenida en ninguna etapa, requiriendo de una fase adicional exclusiva para la disminución de este parámetro, lo que a su vez se traduce en un mayor gasto en el tratamiento, motivo por el cual, se descartó el uso de los procedimientos previamente descritos, ya que, el tratamiento de coagulación-floculación, seguido de microfiltración y ósmosis inversa garantiza una reducción de todos los contaminantes en suspensión o en solución, que se encuentran fuera de la norma para descarga en cauces o sistemas de alcantarillado.

El tratamiento físico químico propuesto de coagulación floculación tiene la capacidad de remover sólidos suspendidos y coloidales, sin embargo, no puedo disminuir la concentración de sólido disueltos, materia orgánica e inorgánica soluble, parámetros que exceden los límites máximos permisibles tanto para la descarga en alcantarillado y cuerpos de agua dulce, por lo que, la aplicación de un sistema de filtración mediante membranas con poros de diferentes diámetros permitirá la reducción de la concentración de estos contaminantes en el efluente. El tratamiento propuesto sugiere contar con un sistema de microfiltración para la remoción de sólidos suspendidos y coloidales remanentes de la etapa de coagulación floculación, y un sistema de ósmosis inversa, cuya función será mermar la presencia de sales disueltas, materia orgánica e inorgánica soluble, virus y bacterias.

3.4 Recomendaciones

Es fundamental tomar en cuenta que la composición del lixiviado varía categóricamente de un relleno sanitario a otro, ya que esto depende del tipo de residuos que ingresan, por lo cual, la dosificación ideal establecida en un lugar no necesariamente funcionará en otro

relleno. Por esta razón, es indispensable realizar la caracterización de este efluente y así poder determinar el tipo de contaminantes que se encuentran inmersos, lo que a su vez nos permitirá establecer el tratamiento idónea a aplicar, ya sea de carácter físico químico o biológico, este último siempre y cuando no existan sustancias que inhiban el metabolismo de los microorganismos y que el índice de biodegradabilidad sea superior a 0.6.

Considerar que al seleccionar el tratamiento de coagulación floculación, la remoción de contaminantes está directamente enfocada en los sólidos suspendidos y coloidales, más no en aniones, cationes y materia orgánica soluble, esto debido a que esta técnica desestabiliza la carga superficial electrostática de las partículas para su posterior aglutinación y sedimentación, del tal manera, que el efluente proveniente de este proceso presente una turbidez baja, por lo cual lo pudiéramos considerarlo como un pretratamiento, que tiene como fin la remoción de materia suspendida, para que en las etapas posteriores no se saturen rápidamente las resinas de intercambio iónico o las membranas de filtración.

Al realizar las pruebas de jarras se sugiere iniciar con una dosificación constante de alguno de los dos reactivos, ya sea el coagulante o el floculante y mantener el otro variable. De esta manera se logrará observar el comportamiento de los compuestos frente a la dosis del otro, y cuando ya se observe la formación de flóculos grandes, compactos y que sedimentan completa y rápidamente se deberá mantener un reactivo fijo e iniciar la variación del otro. Esta variación siempre será descendente ya que la idea es optimizar los compuestos y observar cual es la dosificación más baja a la que se obtiene una alta eficiencia.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. I. Salazar Cotugno y D. A. Centeno Chacón, «Repositorio digital Universidad Tecnológica Indoamérica,» “Evaluación de la gestión integral de residuos sólidos en el Cantón Mejía para la elaboración de una propuesta metodológica que permita una optimización en los procesos”, 31 Julio 2020. [En línea]. Available: <http://repositorio.uti.edu.ec/handle/123456789/1889>.
- [2] W. M. Chávez Montes, «Centro de investigación en materiales avanzados : Tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario de la Cd. de Chihuahua, Méx,» Noviembre 2011. [En línea]. Available: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/858/1/Wendy%20Margarita%20Ch%C3%A1vez%20Montes%20MCTA.pdf>.
- [3] El Universo, «Ecuador genera 375 mil toneladas de residuos sólidos urbanos al año, pero solo recicla el 4% de estos desechos,» *Ecuador genera 375 mil toneladas de residuos sólidos urbanos al año, pero solo recicla el 4% de estos desechos*, 30 diciembre 2020.
- [4] D. G. d. S. A. d. Perú, «Dirección General de Salud Ambiental del Perú,» Protocolo de monitoreo de calidad sanitaria de los recursos hídricos superficiales, 11 Septiembre 2007. [En línea]. Available: [http://www.digesa.minsa.gob.pe/depa/informes_tecnicos/PROTOCOLO-MONITOREO-CALIDAD-RECURSOS-HIDRICOS-SUPERFICIALES-\(CONTINENTALES\).pdf](http://www.digesa.minsa.gob.pe/depa/informes_tecnicos/PROTOCOLO-MONITOREO-CALIDAD-RECURSOS-HIDRICOS-SUPERFICIALES-(CONTINENTALES).pdf).
- [5] C. y. S. d. P. Ministerio de Vivienda, «Sistema Nacional de Información Ambiental del Perú,» PROTOCOLO DE MONITOREO DE LA CALIDAD DE LOS EFLUENTES DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS O MUNICIPALES, 14 Abril 2014. [En línea]. Available: <http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/1057.pdf>.
- [6] J. Bratby, «Coagulation and Flocculation in Water and Waste water,» de *Coagulation and Flocculation in Water and Waste water*, Londres, IWA Publishing, 2016, pp. 388-390.
- [7] L. d. Vargas, «Tratamiento de agua para consumo humano, Plantas de filtración rápida,» de *Tratamiento de agua para consumo humano, Plantas de filtración rápida*, Lima, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS, 2004, p. 596.
- [8] C. Alvarado, H. Pérez y C. Saba, «EVALUACIÓN DEL USO DEL POLICLORURO DE ALUMINIO EN CONJUNTO CON SULFATO DE ALUMINIO EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN DE UNA PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE AGUA EN EL

ESTADO CARABOBO.,» *Ingeniería y Sociedad*, pp. 40-41, 2014.

- [9] A. S.A, «ARQUIMIA S.A.» Policloruro de Aluminio, 3 Mayo 2012. [En línea]. Available:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjN4I3a9531AhVTVTABHXuFCk0QFnoECCYQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.arquimiasa.com.ar%2Fdescargar_archivoB.php%3Fid%3D19&usg=AOvVaw05PwYXjK5J2id376G56ztF.
- [10] Naciones Unidas, «Nacionaes Unidas,» s/f. [En línea]. Available:
<https://www.un.org/es/global-issues/population>.
- [11] CEPAL, «Comisión Económica para América Latina y el Caribe,» octubre 2021. [En línea]. Available:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjBsLCW5Nz1AhVySTABHXQmCUgQFnoECAIQAQ&url=https%3A%2F%2Frepositorio.cepal.org%2Fbitstream%2Fhandle%2F11362%2F47309%2F1%2FS2100423_es.pdf&usg=AOvVaw02QJFT0ida_YGNc_tTAZ.
- [12] M. F. Solíz Torres, J. S. Durango Cordero, J. L. Solano Peláez y M. A. Yépez Fuentes, *Cartografía de los residuos sólidos en Ecuador 2020*, Quito: Universidad Andina Simón Bolívar, 2020.
- [13] Ministerio del Ambiente, «Ministerios del Ambiente,» 12 junio 2019. [En línea]. Available:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjdsdPD_t71AhUGaDABHdomAxwQFnoECACQAQ&url=http%3A%2F%2Fgobiernoabierto.quito.gob.ec%2FArchivos%2FTransparencia%2F2017%2F07julio%2FA2%2FANEXOS%2FPROCU_CODIGO_ORGANICO_A.
- [14] EMGIRS, «Empresa Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos,» s/f. [En línea]. Available: <https://emgirs.gob.ec/index.php/zentools/zentools-slideshow/zentools-carousel>.
- [15] I. p. I. D. y. A. d. I. Energía, «Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía,» *Biomasa: Digestores anaerobios*, octubre 2007. [En línea]. Available:
https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737_biomasa_digestores_anaerobios_a2007_0d62926d.pdf.
- [16] G. Tchobanoglous, H. Theisen y S. Vigil, *Gestión integral de residuos sólidos urbanos*, Madrid: McGraw-Hill, 1994.
- [17] J. Ullca, «LOS RELLENOS SANITARIOS,» *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, nº 4, pp. 2-17, 2005.

- [18] M. d. C. Mejía, «Consortio de gobiernos autónomos provinciales del Ecuador,» *GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL CANTÓN MEJÍA*, 2014. [En línea]. Available: <http://www.congope.gob.ec/wp-content/uploads/2017/04/04am07-1704-p.pdf>.
- [19] D. Prato García, «Repositorio de la Universidad Iberoamericana de la Ciudad de México,» *Tratamiento de aguas residuales industriales fenólicas sintéticas mediante procesos avanzados de oxidación*, 2007. [En línea]. Available: <http://www.bib.uia.mx/tesis/pdf/014876/014876.pdf>.
- [20] S. Renou, J. Givaudan, S. Poulain, F. Dirassouyan y P. Moulin, «Landfill leachate treatment: Review and opportunity,» *ELSEVIER*, vol. 150, nº 3, pp. 468-493, 2008.
- [21] ONU, «Organización de las Naciones Unidas,» *Un tercio de los residuos de América Latina y el Caribe*, 9 octubre 2018. [En línea]. Available: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/un-tercio-de-los-residuos-de-america-latina-y-el-caribe>.
- [22] A. Gálvez Pérez, «APLICABILIDAD DE PROCESOS DE COAGULACION FLOCULACION Y DE SISTEMA DE BIOPELICULA EN EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE VERTEDERO DE RESIDUOS URBANOS,» Editorial de la Universidad de Granada, Granada, 2008.
- [23] R. Méndez, E. Castillo, R. Sauri, C. Quintal, G. Giacomán y B. Jiménez, «COMPARACIÓN DE CUATRO TRATAMIENTOS FISICOQUÍMICOS DE LIXIVIADOS,» *Contaminación Ambiental*, vol. 25, nº 3, pp. 133-145, 2009.
- [24] S. Irigoín Vásquez y J. Zaldiviar Díaz, «Clarificación fisicoquímica de lixiviados mediante procesos de coagulación, floculación y sedimentación del botadero municipal de la provincia de Moyobamba,» Editorial de la Universidad de San Martín, Moyobamba, 2018.
- [25] M. J. Anrango Pavon, «METODOS ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DEL CANTON MEJIA, PICHINCHA, ECUADOR,» UISEK, Quito, 2018.
- [26] P. Torres Lozada, L. E. Barba Ho, C. Ojeda, J. Martínez y Y. Castaño, «INFLUENCIA DE LA EDAD DE LIXIVIADOS SOBRE SU COMPOSICIÓN FÍSICO-QUÍMICA Y SU POTENCIAL DE TOXICIDAD,» *Scielo*, vol. 17, nº 1, 2014.
- [27] L. ZIYANG, Z. YOUCAI, Y. TAO, S. YU, C. HUILI y Z. NAN- WEN, «Natural attenuation and characterization of contaminants composition in landfill leachate under different disposing ages,» nº 407, pp. 3385-3391, 2009.
- [28] A. Ardila Arias, E. Arriola, J. Reyes Calle, E. Berrio Mesa y G. Fuentes Zurita, «Mineralización de etilenglicol por foto-fenton asistido con ferrioxalato,» *Revista*

internacional de contaminación ambiental, vol. 32, nº 2, 2016.

- [29] G. Buitrón, C. Reino y J. Carrera, «Manual técnico sobre tecnologías biológicas aerobias y anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales,» 15 Junio 2009. [En línea]. Available: https://www.cytod.org/sites/default/files/tratamiento_aerobio_de_aguas_residuales.pdf.
- [30] A. Deloya Martínez, «Biodiscos: una alternativa de tratamiento biológico para aguas residuales cuando no se dispone de grandes extensiones de terreno,» *TECNOLOGÍA EN MARCHA*, vol. 13, nº 3, p. 3, 2017.
- [31] A. Álvarez y J. Suárez , «Tratamiento Biológico Del Lixiviado Generado En El Relleno Sanitario 'El Guayabal' de La Ciudad San José de Cúcuta,» Universidad del Norte, Cúcuta, 2006.
- [32] N. X. RIVERA OCAMPO y N. C. VALENCIA ÁNGEL , «ESTUDIO PRELIMINAR PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN UN REACTOR DE LODOS ACTIVADOS,» Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2003.
- [33] F. A. A. A. Y.-P. C. Z.-P. L. X. G. J. Fang, «Anaerobic/Aerobic/Coagulation Treatment of Leachate from a Municipal Solid Wastes Incineration Plant,» *Environmental Technology*, 2014.
- [34] K. L. L. F. T. D. W. Wang, «Treatment of landfill,» 2018.
- [35] B. A. Morales Coloma, «ESTUDIO COMPARATIVO BIBLIOGRÁFICO DE TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS ANAERÓBICO, AERÓBICO Y ANÓXICO APLICADOS EN LIXIVIADOS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE BIORREACTORES,» UNACH, Riobamba, 2021.
- [36] A. Fernández, P. Letón, R. Rosal, M. Dorado, S. Villar y J. Sanz, *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*, Madrid: Elecé Industria Gráfica, 2006.
- [37] R. Méndez, R. García, R. Castillo y M. Sauri, «Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton,» *Scielo*, vol. 30, nº 1, 2010.
- [38] I. Méndez, E. Castillo, M. Sauri, C. Quintal, G. Giácoman y B. Jiménez, «Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados,» *Scielo*, vol. 25, nº 3, 2009.
- [39] D. Benítez, «Academia.edu,» COAGULACION Y FLOCULACION: DEFINICION, TIPOS Y FACTORES, junio 2016. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/43472225/COAGULACION_Y_FLOCULACION_DEFINICION_TIPOS_Y_FACTORES.

- [40] M. d. Ambiente, «Ministerio del Ambiente,» Registro Oficial 387, 4 noviembre 2015. [En línea]. Available: https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_Registro-Oficial-No-387-04-noviembre-2015_0.pdf.
- [41] J. García Palomo, «"Preservación y conservación de muestras biológicas: mucho más que almacenamiento",» *ResearchGate*, p. 48, 2016.
- [42] A. Eaton, E. Rice y R. Baird, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Washington: APHA, AWWA, WEF, 2017.
- [43] Hach, *Manual de análisis de agua*, Loveland: Hach Company, 2000.
- [44] M. J. Anrango Pavón, «Métodos alternativos para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario del Cantón Mejía, Pichincha, Ecuador,» 26 febrero 2018. [En línea]. Available: <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2882/5/TESIS%20ANRANGO%20PAVON%20MARIA%20JOSE.pdf>.
- [45] C. Guizard, «Técnicas membranarios de filtración de líquidos: Micro, ultra, nanofiltración y Ósmosis inversa,» 1999. [En línea]. Available: <https://es.firp-ula.org/wp-content/uploads/2019/07/S451B.pdf>.
- [46] Ecoionics, «Ecoionics S.A.,» Índice de densidad de ensuciamiento, 18 junio 2019. [En línea]. Available: <https://ecoionics.com/#!/-sdi-indice-densidad-ensuciamiento/>.
- [47] L. Carvajal, *Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado*, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.
- [48] J. F. Muñoz Paredes¹ y M. Ramos Ramos, «REACTORES DISCONTINUOS SECUENCIALES: UNA TECNOLOGÍA VERSÁTIL EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES,» Universidad militar Nueva Granada, Granada, 2014.

5. ANEXOS

ANEXO I

Tabla 12. Límites para descarga a alcantarillado

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y grasas	Sust. solubles en hexano	mg/l	70,00
Explosivos o inflamables	Sustancias	mg/l	Cero
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aluminio	Al	mg/l	5,00
Arsénico total	As	mg/l	0,10
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	Cn	mg/l	1,00
Cinc	Zn	mg/l	10,00
Cloro activo	Cl	mg/l	0,50
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo	mg/l	1,00
Cobalto total	Co	mg/l	0,50
Cobre	Cu	mg/l	1,00
Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	mg/l	0,20
Compuestos organoclorados	Organoclorados totales	mg/l	0,05
Cromo hexavalente	Cr+6	mg/l	0,50
DBO5	DBO5	mg/l	250,00
DQO	DQO	mg/l	500,00
Dicloroetileno	Dicloroetileno	mg/l	1,00
Fósforo total	P	mg/l	15,00
HTP's	TPH	mg/l	20,00
Hierro total	Fe	mg/l	25,00
Manganeso total	Mn	mg/l	10,00
mercurio total	Hg	mg/l	0,01
Niquel	Ni	mg/l	2,00
Nitrógeno total Kjeldahl	N	mg/l	60,00
Organofosfatados	Especies totales	mg/l	0,10
Plata	Ag	mg/l	0,50
Plomo	Pb		0,50
pH	pH		6-9
Selenio	Se	mg/l	0,50
Sólidos sedimentables	SD	mg/l	20,00
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	220,00
Sólidos totales	ST		1600,00
Sulfatos	SO4-2	mg/l	400,00
Sulfuros	S	mg/l	1,00
Temperatura	°C		<40
Tensoactivos	Sust. Activas al azul de metileno	mg/l	2,00
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,00
Tricloroetileno	Tricloroetileno	mg/l	1,00

ANEXO II

Tabla 13. Límites para descarga a un cuerpo de agua dulce

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y grasas	Sust. solubles en hexano	mg/l	30,00
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aluminio	Al	mg/l	5,00
Arsénico total	As	mg/l	0,10
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	Cn	mg/l	0,1
Cinc	Zn	mg/l	5,00
Cloro activo	Cl	mg/l	0,50
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo	mg/l	0,10
Cloruros	Cl	mg/l	1000
Cobalto	Co	mg/l	0,50
Cobre	Cu	mg/l	1,00
Coliformes fecales	NMP	NMP/100 ml	2000
Color real	Color real	Unidades de color	Inapreciable en dilución 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,20
Cromo hexavalente	Cr+6	mg/l	0,50
DBO5	DBO5	mg/l	100
DQO	DQO	mg/l	200
Estaño	Sn	mg/l	5,00
Fluoruros	F	mg/l	5,00
Fósforo total	P	mg/l	10,00
Hierro total	Fe	mg/l	25,00
HTP's	TPH	mg/l	20,00
Manganeso total	Mn	mg/l	2,00
Material flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Niquel	Ni	mg/l	2,00
Nitrógeno Amoniacal	N	mg/l	30,00
Nitrógeno total Kjeldahl	N	mg/l	50,00
Organofosfatados	Especies totales	mg/l	0,05
Plata	Ag	mg/l	0,10
Plomo	Pb		0,20
pH	pH		6-9
Selenio	Se	mg/l	0,10
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	130,00
Sólidos totales	ST		1600,00
Sulfatos	SO4-2	mg/l	1000,00
Sulfuros	S	mg/l	0,50
Temperatura	°C		Condi natural +/-3
Tensoactivos	Sust. Activas al azul de metileno	mg/l	0,50
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,00