Biblioteca Digital
F C E N - U B A

BIBLIOTECA CENTRAL LUIS F LELOIR
BIBLIOTECA CENTRAL LELOIR
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES UBA

Tesis de Maestría

Evaluación de alternativas para el tratamiento de lixiviados en el relleno sanitario Antanas del Municipio de San Juan de Pasto en Colombia

Arango Romero, Paola Andrea

2013

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:
Arango Romero, Paola Andrea. (2013). Evaluación de alternativas para el tratamiento de lixiviados en el relleno sanitario Antanas del Municipio de San Juan de Pasto en Colombia. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Cita tipo Chicago:
Arango Romero, Paola Andrea. "Evaluación de alternativas para el tratamiento de lixiviados en el relleno sanitario Antanas del Municipio de San Juan de Pasto en Colombia". Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 2013.

EXACTAS UBA
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

UBA
Universidad de Buenos Aires

Dirección: Biblioteca Central Dr. Luis F. Leloir, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Intendente Güiraldes 2160 - C1428EGA - Tel. (++54 +11) 4789-9293

Contacto: digital@bl.fcen.uba.ar

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO ANTANAS DEL MUNICIPIO DE SAN JUAN DE PASTO EN COLOMBIA

Tesis presentada para optar al título de Magíster de la Universidad de Buenos Aires en Ciencia Ambientales

Paola Andrea Arango Romero

Director de tesis: Msc Estela Santalla

Codirectora: Msc. Raquel Victoria Dabas

Buenos Aires, Abril de 2013

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO ANTANAS DEL MUNICIPIO DE SAN JUAN DE PASTO EN COLOMBIA

RESUMEN

El agua es uno de los recursos naturales más íntimamente unido a la vida, se encuentra de forma abundante en la Tierra, por ello este recurso se ha convertido en tema de discusión a nivel mundial, por la importancia y la necesidad de abogar la gestión sostenible sobre todo de los recursos de agua dulce.

En los países en desarrollo, el consumo de agua y la generación de residuos sólidos está en aumento; el tema de la gestión de residuos resulta un problema complejo en el cual se integran conceptos ambientales, económicos, institucionales y sociales. Por todo esto la legislación ambiental en Colombia ha cambiado su normativa para regular el vertimiento a los cuerpos de aguas continentales superficiales, buscando disminuir la contaminación. Las empresas encargadas de el manejo y disposición final de los residuos sólidos urbanos cada día deben implementar metodologías más eficientes para la remoción de los parámetros presentes en los lixiviados.

Por tal motivo, la presente investigación tiene como objetivo principal evaluar el actual proceso de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Antanas, con respecto al cumplimiento de la normativa ambiental decreto aplicado hasta el momento y la nueva reglamentación; 1594/84 y el 3930/10 respectivamente, determinar el grado de eficiencia de los procesos de remoción, evaluar tecnologías complementarias alternativas para asegurar el cumplimiento de la nueva normativa ambiental y, desarrollar una evaluación multicriterial que posibilita la participación de distintos actores involucrados en el tema de los residuos sólidos, a través de la elección de criterios que compone las dimensiones técnico-económica, social, ambiental y político institucional, en un marco de calificación directa de las distintas alternativas de tratamiento.

Este trabajo se realizó en base a los datos suministrados por la empresa Metropolitana de Aseo de Pasto EMAS S.A. E.S.P para analizar el funcionamiento y eficiencia de la planta de tratamiento de lixiviados, la revisión de material bibliográfico, la comparación de los resultados obtenidos en las pruebas piloto utilizando las tecnologías alternativas de membranas y los humedales como tecnología complementaria al tren de tratamiento de lixiviados, y la aplicación de la metodología de análisis multicriterio.

Al analizar los resultados obtenidos durante los monitoreos se logró establecer que el actual tratamiento de lixiviados resulta eficiente en el cumplimiento de la anterior normativa, decreto 1594 de 1984, con los parámetros DQO, DBO_5 y sulfatos, donde se obtuvieron remociones al final del monitoreo (marzo del 2012) del 99 y 100% para DQO y DBO5 respectivamente. Los parámetros más críticos resultaron grasas y

aceites y sólidos totales con remociones relativamente bajas que no alcanzan a cumplir con la normativa ambiental. Con respecto a DQO, nitrógeno y fósforo se requieren ajustes que permitan mejorar la eficiencia para alcanzar el límite máximo permitido. En el caso de los sólidos suspendidos totales el rendimiento del proceso actual no es eficiente, se esperaría que la mayor remoción de SST ocurra en el reactor de lodos activados y en la planta físico-química, por lo que se requiere implementar acciones de mejora en estos procesos. Un análisis más exhaustivo sobre estas dos etapas del TTL será necesario realizar con la finalidad de identificar el funcionamiento del reactor de lodos, la eficiencia de los coagulantes/floculantes utilizados, la capacidad del sistema en relación a los tiempos de retención y los caudales de efluente utilizados en estas etapas parciales del TTL. También habría que considerar el ingreso del lixiviado del Vaso I en la planta físico-química que podría estar alterando la capacidad de la planta.

Del análisis comparativo de las eficiencias de los procesos evaluados para remover los principales componentes de los lixiviados en el marco de las normativas ambientales, tanto en el escenario anterior (decreto 1594 del 84) como con el actual (decreto 3930 de 2010), se observa que las tecnologías de membranas acopladas resultan eficientes y cumplen con la actual normativa (que es más rigurosa que la anterior) aunque no resuelven totalmente el tratamiento ya que generan concentrados con alta carga de materia orgánica que requiere un tratamiento posterior. La tecnología de membranas VSEP por sí misma no mejora significativamente la eficiencia de remoción que tiene el proceso convencional TTL. La tecnología complementaria (TTL+ Humedal) resulta beneficiosa para la remoción de los contaminantes aunque requiere algunos ajustes para alcanzar un mayor nivel de remoción de los SST.

Como se observa del análisis de los resultados de la evaluación multicriterial, la tecnología mejor ponderada es el sistema de membranas que claramente en los resultados de las pruebas piloto mostró alta eficiencia en la remoción de los contaminantes, aunque no queda reflejado el aspecto relacionado a los altos costos económicos que su implementación y mantenimiento implica. De igual forma se observa una mayor aceptación a la implementación de sistemas de evaporación, aunque también aspectos vinculados a la calidad del aire y del agua han sido considerados como desfavorables por la mayoría de los actores.

Si bien la tecnología complementaria de humedales no fue ponderada favorablemente desde las diferentes dimensiones se identificó como altamente probable de implementar dada su compatibilidad con las políticas, el marco legal y la normativa ambiental existente.

Palabras claves: Lixiviados, Tratamiento de lixiviados, Normativa ambiental Colombiana.

ACRÓNIMOS

AIDIS: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS)
AIDIS: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
ALC: América Latina y el Caribe
AMC: análisis multicriterio
BID: Banco Interamericano de Desarrollo
CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
COVs: compuestos orgánicos volatiles
DAP: difosfato de Amonio
DIRSA: Dirección Técnica de Manejo de Residuos Sólidos Urbanos
G y A: Grasas y Aceites
GEIs: Gases de efecto invernadero
Humedal SSF: humedal artificial de flujo subsuperficial
MOFBD: materia orgánica fácilmente biodegradable
OPS: Organización Panamericana de la Salud
PGIR: política para la gestión integral de residuos sólidos
R.S.A: relleno sanitario Antanas
RSD: residuos sólidos domiciliarios
RSU: residuos sólidos urbanos
SEA: Servicio de Evaluación Ambiental – Gobierno de Chile.
SRB: bacterias sulfato reductoras
SSPD: Superintendencia de servicios públicos domiciliarios
TTL: tren de tratamiento de lixiviados
VSEP: proceso realzado de cizalla vibratorio

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimiento a**:**

Mi directora de tesis, la Msc Estela Santalla, por su aprecio, orientación y supervisión durante todo el proceso de investigación.

A la Empresa Metropolitana de Aseo de Pasto. S.A E.S.P por abrirme sus puertas para realizar esta investigación.

La Msc Raquel Victoria Dabas y el Dr. Ricardo Benitez Benitez, por sus apreciaciones y sugerencias que contribuyeron positivamente en el desarrollo de la investigación.

A mis compañeros de la Maestría en Ciencias Ambientales de la Universidad de Buenos Aires.

Mis amigos por su compañía, cariño y apoyo constante.

Finalmente quiero agradecer a mis padres, hermanos y sobrinos por el apoyo incondicional, por caminar junto a mi y llenarme de motivos para ser feliz y aprovechar cada oportunidad que la vida me entrega.

CONTENIDO

INDICE DE TABLAS ..... **vi**

INDICE DE FIGURAS ..... **vi**

CAPITULO I **1**

1. INTRODUCCIÓN **1**

1.1 OBJETIVOS 4

1.2 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN 5

1.3 MARCO TEÓRICO 6

1.4. MARCO LEGAL 20

1.5 ANÁLISIS MULTICRITERIO 23

CAPITULO II **25**

2. METODOLOGÍA **25**

2.1 DISEÑO METODOLÓGICO 26

2.2 FUENTES PRINCIPALES 29

2.3. ANÁLISIS MULTICRITERIO 31

CAPITULO III **34**

3. RESULTADOS **34**

3.1 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS 34

3.2 SÍNTESIS DE LA EVALUACIÓN DEL PROCESO EN TÉRMINOS DE LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES 44

3.3 INCORPORACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS 47

3.4 EVALUACIÓN COMPARATIVA DE TECNOLOGÍAS EN EL MARCO DE LA NUEVA NORMATIVA AMBIENTAL 50

3.5 ANÁLISIS DE LA EVALUACIÓN MULTICRITERIO 56

CAPITULO IV **62**

4. DISCUSIÓN **62**

4.1 RECOMENDACIONES **66**

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades Físico-químicas de los lixiviados en estado crudo. 7
Tabla 1.2. Eficiencia de los Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales en la Remoción de distintos Contaminantes. 13
Tabla 1.3. Reducción típica del porcentaje y concentración de parámetros contaminantes en humedales de SSF. 14
Tabla 1.4. Manejo de características problemáticas de los lixiviados. 17
Tabla 1.5. Complejidad Tecnológica. 17
Tabla 1.6. Rendimiento en remoción de parámetros. 18
Tabla 1.7. Algunos parámetros que exige cumplir la norma 1594/84. 21
Tabla 1.8. Valores límite máximos permisibles que se deben cumplir según Decreto 3930 del 2010. 22
Tabla 2.1. Técnicas y Métodos utilizadas – Análisis de Muestras 29
Tabla 2.2. Cronograma del monitoreo al Tren de Tratamiento de Lixiviados 30
Tabla 3.1. Porcentajes de remoción promedio del TTL en el Punto 3 44

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Tren de Tratamiento de Lixiviados 10
Figura 2.1. Puntos de muestreo para el diagnóstico del TTL. 26
Figura 2.2. Sistema VSEP. 27
Figura 2.3. Ósmosis Inversa 28
Figura 3.1. Variación de DQO en el TTL 35
Figura 3.2. Variación de DBO_5 en el TTL 36
Figura 3.3. Variación de Nitrógeno en el TTL 37
Figura 3.4. Variación de Sólidos Suspendidos Totales en el TTL 39
Figura 3.5. Variación de Fósforo Total en el TT 40
Figura 3.6. Variación de Grasas y Aceites en el TTL 41
Figura 3.7. Variación de Sulfatos en el TTL 42
Figura 3.8. Variación de pH en el TTL 43
Figura 3.9. Porcentajes de Remoción de los Puntos Monitoreados 46
Figura 3.10. Remoción de parámetros en el proceso 1 (TTL) 47
Figura 3.11. Remoción de parámetros proceso 2 48
Figura 3.12. Remoción de parámetros proceso 3 48
Figura 3.13. remoción de parámetros proceso 4 49
Figura 3.14. Eficiencia en la remoción de DQO de las tecnologías evaluadas. 50
Figura 3.15. Eficiencia en la remoción de DBO_5 de las tecnologías evaluadas. 51
Figura 3.16. Eficiencia en la remoción de SST de las tecnologías evaluadas. 52
Figura 3.17. Eficiencia en la remoción de fósforo de las tecnologías evaluadas. 53
Figura 3.18. Eficiencia en la remoción de sulfatos de las tecnologías evaluadas. 54
Figura 3.19. Variación de pH de las tecnologías evaluadas. 54
Figura 3.20. Valoración de la dimensión técnico/económica 58
Figura 3.21. Valoración de la dimensión técnico-económica 59
Figura 3.22. Valoración de la dimensión social 59
Figura 3.23. Valoración de la dimensión ambiental 60
Figura 3.24. Valoración de la dimensión político/institucional 60

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos naturales perpetuos o permanentes son aquellos que la sociedad utiliza pero cuya existencia es tan grande y su renovación tan constante que son en la práctica inagotables. Entre ellos se puede ubicar la luz solar, la radiación de la tierra, el agua en sus distintas formas (vapor, hielo, liquida), el aire o el viento. Estos recursos no son solo perpetuos sino que también muchos son indispensables para la propia vida y por eso algunos los llaman recursos básicos (Reboratti, 2000).

En los últimos años los avances tecno-científicos han sido impactantes, el hombre se ha enfrentado a las limitaciones en el conocimiento, y a la inmensa dificultad para aprovechar las posibilidades ofrecidas por la naturaleza para un mejor vivir individual y colectivo. En el presente la demanda sin precedentes a la que el rápido crecimiento de la población humana, y el desarrollo tecnológico someten al medio ambiente, está produciendo un deterioro cada vez más acelerado en su calidad, por ello el pensar en la protección del medio ambiente se ha convertido en una prioridad, en una necesidad de primer orden para garantizar el desarrollo económico y social, pensando en la salud, vida y desarrollo del hombre en el planeta. Hemos modificado substancialmente el paisaje terrestre, cambiado las ciudades en las que vivimos, los campos de los que obtenemos nuestros alimentos han removido a los ecosistemas originales, secado lagos y ríos y las consecuencias de nuestros actos se estas manifestando; las estamos sintiendo y los cambios se ven claramente en los eventos hidro-meteorológicos extremos, como periodos prolongados de sequías, extremas inundaciones, entre muchos otros.

En el caso del agua, el hombre difícilmente puede interrumpir su ciclo gracias a su gran capacidad de purificación. Pero sí puede y lo hace con mucha frecuencia, interferir en la calidad y cantidad de este compuesto, como sucede con la contaminación de ríos (Reboratti, 2000); y han sido los ríos, lagos y mares quienes recogen desde hace mucho las “basuras” producidas por la actividad humana. La capacidad de regeneración del agua y su abundancia la han hecho susceptible a ser el vertedero habitual en el que arrojamos los residuos producidos a diario, y hoy en día encontramos que muchos cuerpos de aguas están tan contaminados que afectan directamente la vida de diferentes especies, incluyendo la especie humana.

En los países en desarrollo, el consumo de agua y la generación de residuos sólidos está en aumento; el tema de la gestión de residuos resulta un problema complejo en el cual se integran conceptos ambientales, económicos, institucionales y sociales. En la cantidad y calidad de los residuos que se generan diariamente intervienen

fundamentalmente tres variables: la condición socioeconómica de la población; siendo por lo general los sectores de mayor poder adquisitivo de la misma los generadores de mayor cantidad de residuos, la cantidad de habitantes que conforman ese ejido urbano, su distribución y la planificación del uso del suelo, y los diferentes hábitos de consumo y sistemas de producción. Estas variables se mantienen en el tiempo como se menciona en Jaramillo J. 1999 y Rollandi R. 2012.

La organización Panamericana de la Salud (OPS), la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS) y el BID realizaron por segunda vez la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010 (EVAL 2010); la primera evaluación de este estilo fue realizada en el año 2002 y se denominó EVAL 2002. Entre los principales resultados de este informe se encuentra la información sobre generación de residuos en los países de ALC, analizando la relación existente entre Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD) – Residuos sólidos Urbanos (RSU)[1] y PIB per cápita, donde se evidencia la relación directamente proporcional entre el nivel de actividad económica y la tasa de generación de RSD y RSU. La EVAL estimó que la generación per cápita de RSD en América Latina y el Caribe llega a 0,63 kg/hab/día, mientras que la de RSU asciende a 0,93 kg/hab/día, cifra elevada si se piensa que sólo en Colombia se está cerca de 47 millones de habitantes (Banco Mundial, 2013), lo que a priori determinaría una generación cercana a 44 mil toneladas por día de residuos sólidos urbanos.

Colombia no es indiferente a esta problemática ambiental de los residuos sólidos; durante los últimos años ha tomado más fuerza y se ha reglamentado a través del tiempo su recolección, transporte, tratamiento y disposición final. La política para la gestión de los residuos sólidos tiene su fundamento en la Constitución política de Colombia, y desde entonces se viene regulando a través de resoluciones y decretos, que han servido para establecer el marco normativo correspondiente a la estructuración de una metodología, con la cual se diseñan planes para el manejo de residuos sólidos (PGIRS) generados en el país (Noguera, et al. 2010).

En Colombia los RSU están compuestos principalmente por residuos de carácter orgánico, plásticos, vidrio, papel y cartón. Sin embargo estas características varían de acuerdo con las condiciones geográficas y económicas de la población, con tendencia al aumento de la fracción orgánica en las poblaciones de menores recursos y aquellas distantes a las capitales departamentales (Arrienta, 2008).

En la ciudad de Pasto, al sur de Colombia, se encuentra el relleno Sanitario Antanas (RSA) ubicado a 13 kilómetros de la ciudad; este sitio inició su operación en abril de 2001, y recibe 266 toneladas diarias de residuos sólidos provenientes de Pasto y de 7 municipios más. Dicho relleno cuenta en la actualidad con un permiso de vertimiento de lixiviados, autorizado por la Corporación Regional de Nariño - Corponariño y con vigencia hasta 2013. Los procesos que utiliza el relleno para

[1] RSD: Residuos sólidos o semisólidos de origen exclusivamente residencial, generados por la actividad humana dentro de la vivienda.
RSU: Residuos sólidos o semisólidos provenientes de las actividades propias de los núcleos poblacionales en general.

tratar los lixiviados tienen como objetivo alcanzar el cumplimiento del decreto 1594 del año 1984, que reglamenta el uso de agua y residuos líquidos basado en el establecimiento de porcentaje de remoción y no en valores absolutos de los parámetros. A partir de Octubre del 2010 el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial a través del decreto 3930 establece las normas y los valores límites máximos permisibles de parámetros en vertimientos puntuales a sistemas de alcantarillado público y a cuerpos de agua continentales superficiales de generadores que desarrollen actividades industriales, comerciales o de servicio. Esto ha resultado en una modificación a la normativa anterior y plantea un escenario nuevo que exige un nuevo marco de análisis sobre el proceso de tratamiento de lixiviados para alcanzar el cumplimiento de los parámetros por debajo establecidos para esta nueva reglamentación.

En función de este cambio de normativa, el presente estudio pretende ofrecer una herramienta para ayudar a la toma de decisiones con la finalidad de mejorar el proceso existente para alcanzar el cumplimiento de los límites de vertido.

1.1 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el actual proceso de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Antanas con respecto al cumplimiento de la normativa ambiental decreto aplicado hasta el momento y la nueva reglamentación; 1594/84 y el 3930/10 respectivamente, determinar el grado de eficiencia de los procesos de remoción, evaluar tecnologías complementarias alternativas para asegurar el cumplimiento de la nueva normativa ambiental y, desarrollar una evaluación multicriterial que permita sugerir la mejor tecnología que debería incorporarse al proceso actual, incluyendo en esta la ponderación de aspectos técnicos y económicos pero también sociales, ambientales e institucionales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar y evaluar el proceso que se lleva a cabo en el RSA en la remoción de los contaminantes presentes en el lixiviado en función de los cambios de la normativa ambiental.

- Analizar los resultados de la aplicación de tecnologías complementarias y alternativas en la remoción de los contaminantes presentes en el lixiviado, buscando el mejoramiento del tratamiento y el cumplimiento de la nueva normativa ambiental.

- Investigar otras tecnologías alternativas que pueden contribuir a mejorar la eficiencia del tratamiento de lixiviados en el RSA.

- Diseñar una matriz multicriterial definiendo previamente las dimensiones a evaluar y los criterios de ponderación de cada dimensión con la finalidad de incorporar una nueva tecnología al proceso actual de tratamiento de lixiviados en el R.S.A, considerando cualitativa y cuantitativamente las dimensiones técnico-económica, ambiental, social y político-institucional.

- Evaluar los resultados de los análisis realizados y efectuar las recomendaciones que permitan optimizar el sistema de tratamiento actual de lixiviados en el R.S.A en aras del cumplimiento de la nueva normativa.

1.2 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio pretende ofrecer una herramienta de decisión sobre la base de un desarrollo sistemático del conocimiento, utilizando información real generada a campo y aplicando una metodología multicriterial que permita incorporar la ponderación de criterios multidimensionales para la selección de la mejor tecnología complementaria o alternativa que optimice el tratamiento de lixiviados en el RSA y permita alcanzar los estándares establecidos por la nueva normativa.

La evaluación de tecnologías alternativas que se incorporen o sustituyan al tratamiento de lixiviados existente en el RSA, se realiza con base en pruebas piloto y la aplicación de criterios multidimensionales diseñados específicamente para el proyecto, contando con la participación de expertos de diferentes sectores (industrial, institucional, educacional y político) en la evaluación multicriterial, constituyen aspectos innovadores de este trabajo de tesis que pueden ser incorporados en la evaluación de aquellos proyectos que tienen alto impacto en los factores del ambiente. La herramienta desarrollada en este estudio permite además promover el fortalecimiento de la participación ciudadana y actuar como disparador del mejoramiento de la educación ambiental con la finalidad de garantizar un desarrollo sostenible.

1.3 MARCO TEÓRICO

Uno de los aspectos más difíciles de manejar en la gestión integral de un vertedero de residuos sólidos urbanos o una instalación de tratamiento de los mismos, es el lixiviado. El lixiviado se puede definir como el líquido que se filtra a través de los residuos sólidos y que extrae materiales disueltos o en suspensión (EPA, 1999). En la mayoría de los vertederos el lixiviado está formado por el líquido que entra en el vertedero desde fuentes externas (drenaje superficial, lluvia, aguas subterráneas, aguas de manantiales subterráneos), y en su caso el líquido producido por la descomposición de los residuos (Tchobanoglous et al., 1994), aumentando su caudal a medida que aumenta el volumen de residuos. Su aspecto es negro, de olor fuerte y penetrante, fluido y en zonas de acumulación y estancamiento presenta una capa superficial de varios centímetros de espuma. La composición media de los lixiviados varía considerablemente según áreas geográficas, edad del vertedero y tipo de residuo depositado en el mismo, pero todos coinciden en una alta carga orgánica en términos de demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) como su principal factor contaminante. Otros compuestos que lo caracterizan son la concentración de sólidos suspendidos y disueltos, fosfatos y nitratos, las grasas y aceites, entre otros.

Antiguamente los lixiviados eran vertidos a los causes de los ríos sin ningún tipo de control o tratamiento previo; afortunadamente las reglamentaciones han contribuido a que esta práctica que va en contra del medio ambiente y la salud de las comunidades, esté disminuyendo. Actualmente, en Colombia la nueva normativa ambiental establece parámetros con máximos permisibles que lleva a realizar un mayor control y establecer tratamientos eficientes en la remoción de los contaminantes presentes en los lixiviados, antes de ser vertidos a cuerpos de aguas continentales superficiales. Se debe aclarar que el control no sólo se debe hacer en las aguas continentales superficiales, sino también en los acuíferos que con el paso del tiempo serán los grandes afectados de los tratamientos inadecuados en el manejo de los residuos sólidos.

1.3.1 Los Lixiviados

Existen numerosos parámetros de los lixiviados que resaltan su alto poder contaminante, su carga orgánica, las sales disueltas, las grasas y aceites, nutrientes como nitrógeno o fósforo, tóxicos como metales pesados y sustancias de interés sanitario (Tchobanoglous, et al. 1994). Estas características son importantes al momento de establecer cuáles componentes deben ser removidos durante su tratamiento. Para la selección de la tecnología que se debe utilizar en el tren de tratamiento de los lixiviados (TTL) se deben tener en cuenta otros componentes que

además de contaminantes, afectan el funcionamiento de los procesos, como el caso de los sólidos totales y los sulfatos.

1.3.1.1 Calidad de los Lixiviados

La calidad de los lixiviados varia en el tiempo en un relleno sanitario. De igual forma se encuentra diferencia entre los lixiviados de los países desarrollados con los de los países en vía de desarrollo. Los lixiviados de los países en desarrollo presentan concentraciones mayores de DBO, amoníaco, metales y sustancias precipitables a los lixiviados de los países desarrollados (Noeggerath, 2011). Estas características tienen implicaciones para la operatividad y el rendimiento de los procesos de tratamiento y se debe tener en cuenta al seleccionar la tecnología que se debe aplicar.

Los residuos sólidos de los países en desarrollo, como Colombia, tienen altos contenidos de materia orgánica fácilmente biodegradable (MOFBD), que a su vez aporta alto contenido de humedad y por su proceso de descomposición produce altas concentraciones de ácidos grasos volátiles y de amoníaco. Estos ácidos se diluyen fácilmente en el lixiviado del relleno sanitario, le bajan el pH y contribuyen a la solubilización de los metales presentes en los residuos dispuestos en el relleno. El lixiviado joven es más contaminante que el lixiviado viejo, donde las concentraciones de las sustancias disminuyen continuamente en el tiempo. Un relleno siempre va a tener una parte que aporta lixiviado joven (la que se esta rellenando en ese momento) otra parte que tiene lixiviado maduro (las que tienen unos años) y otras lixiviado viejo (las que tienen más de cinco años) (Noeggerath, 2011).

La Tabla 1.1 muestra cómo varía la concentración de los principales parámetros de los lixiviados a lo largo del tiempo.

Tabla 1.1. Propiedades Físico-químicas de los lixiviados en estado crudo.

Parámetro	Unidad	Lixiviado Joven (<5 años)	Lixiviado Viejo (>10 años)
Color aparente	-	Negro	Marrón
DBO	mg/L	2000-30000	100-200
DQO	mg/L	3000-60000	100-500
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	200-2000	100-400
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	100-800	20-40
Fósforo Total	mg/L	5-100	5-10
Sulfatos	mg/L	50-1000	20-50
Grasas y Aceites	mg/L	48	7
pH	-	4,5-7,5	6,6-7,5
Capacidad de intercambio catiónico	Meq/100ml	12.3	10.3

(Fuente: Emenike, et al. 2012; Tchobanoglous, et al. 1994).

Es claro que el problema del tratamiento de los lixiviados joven y viejo es muy diferente. Las concentraciones de sales disueltas, y metales pesados son mucho mayores en un lixiviado joven, generando problemas de toxicidad en el caso de que

se quieran utilizar procesos biológicos para la remoción de la DBO. Las concentraciones de agentes incrustantes como el hierro, el calcio y el magnesio, generan grandes problemas prácticos pues taponan la mayoría de los conductos, tuberías, accesorios, válvulas, membranas, tanques, etc. (Giraldo, 2002). El bajo pH puede interferir en el funcionamiento de muchas tecnologías y algunos procedimientos como la nitrificación o la oxidación del hierro.

La remoción del DBO se ve afectada por la toxicidad que generan los metales, pero la remoción de metales, incluyendo incrustantes como el hierro, se ve interferida por la presencia de la DBO que sirve como agente complejante que mantiene los metales en solución, dificultando y limitando la remoción. Por todo esto es evidente que los lixiviados presentan numerosos problemas que deben tenerse en cuenta al momento de seleccionar la tecnología de tratamiento (Giraldo, 2002).

1.3.1.2 Cantidad de Lixiviados

La cantidad de lixiviados depende de tres variables principales: el área rellenada, la cantidad de infiltración y el sistema de drenaje e impermeabilización. El área rellenada afecta porque es a través de ella que se realiza la entrada y el contacto del agua de infiltración con los residuos. Al aumentar el área rellenada, aumenta paralelamente la cantidad de lixiviados. La cantidad de infiltración depende de numerosas variables como: la operación que se le dé al relleno, como la desviación de aguas de escorrentía, la cantidad de precipitación directa que se tenga en la zona, y la presencia de infiltraciones subterráneas. Por ultimo los sistemas de drenaje e impermeabilización son importantes por que son los que permiten que los lixiviados no contaminen los suelos y las aguas subterráneas, y el lixiviado que se produce se pueda recolectar para ser adecuadamente tratado. De igual forma, cuando se realiza el cerramiento de las diferentes áreas de los rellenos, los caudales de infiltración disminuyen notablemente, generando una caída abrupta en la cantidad de lixiviado (Noeggerath, 2011).

El potencial de formación del lixiviado puede valorarse mediante la preparación de un balance hídrico en el relleno sanitario. El balance hídrico implica la suma de todas las cantidades de agua que entran en el relleno y la sustracción de las cantidades de agua consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua. La cantidad potencial del lixiviado es la cantidad de agua en exceso sobre la capacidad de retención de humedad por parte del relleno sanitario (Tchobanoglous et al., 1994). La movilidad del agua dentro del relleno sanitario complica el cálculo del balance hídrico, y debido a la no uniformidad en la composición del residuo se producen caminos preferenciales que son más frecuentes en rellenos jóvenes y que disminuyen considerablemente con la edad del relleno por el efecto de compactación de los residuos (Fenn, et al., 1975; Borzacconi,1996; Orta et al., 2002; Fornieles, 2011; Pantini y Schroeder, 2012). Con la finalidad de estimar la generación de lixiviados han surgido varios modelos basados en balances hídricos, entre los más conocidos están el modelo HELP (EPA)

y el MODUELO (Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria-España).

Numerosos trabajos han avanzado en el conocimiento sobre la caracterización de los lixiviados que se generan en los rellenos sanitarios, la mayoría de ellos se han focalizado en la descripción de las tecnologías de tratamiento, destacando la capacidad de remoción de contaminantes y comparando la eficiencia de las tecnologías estudiadas (Noeggerath, et al., 2011; López, 2008: Giraldo, 2002).

Entre muchos otros estudios que se han realizado sobre este tema, la particularidad del presente estudio esta en la comparación de tecnologías complementarias o alternativas que mejoren la remoción de contaminantes del lixiviado del relleno sanitario Antanas, evaluando resultados de pruebas in situ en tiempo real y en forma integral y basándose la aplicación de una tecnología multicriterial que involucra diferentes actores.

1.3.2. Tratamiento de Lixiviados

Las variables más importantes de considerar en el diseño de una planta de tratamiento de lixiviados corresponden al caudal y composición del afluente y los requerimientos finales para la disposición del efluente ya tratado.

Numerosas referencias bibliográficas han sido consultadas para analizar el TTL del relleno sanitario Antanas y las posibles tecnologías complementarias o alternativas que se pueden implementar con la finalidad de mejorar el proceso (Robinson, et al. 2005; EPA 1993, 1995, 2007; Last et al., 2004; ISWA 2008; Munawar et al., 2013).

En esta sección se describe el funcionamiento de la planta de tratamiento de lixiviados en el relleno sanitario Antanas, con los procesos y equipos actualmente implementados y algunas técnicas alternativas que podrían servir para combinar o reemplazar este proceso.

1.3.2.1 Descripción del TTL en el Relleno Sanitario Antanas

A continuación se describe el diseño actual de la planta de tratamiento de lixiviados del RSA con sus procesos e instalaciones vinculadas.

El RSA, cuenta con un TTL compuesto por cinco unidades que corresponden a tratamientos biológicos y una unidad de tratamiento fisicoquímico; tal como se observa en la figura 1.1, los componentes principales son un reactor UASB, una laguna de igualación, una laguna facultativa aireada, la planta fisicoquímica, un reactor sulfidogénico y una laguna de maduración.

Adicionalmente se cuenta con unidades de almacenamiento, pre-tratamiento y regulación: como una estación de bombeo, un tanque regulador de caudal, un

desarenador, la laguna de excesos vaso I y laguna de almacenamiento de excesos del vaso II.

En la Figura 1.1 se representa el TTL (Hernández, 2011); inicia el proceso cuando el lixiviado que se produce en el vaso II, es conducido por gravedad al reactor UASB (punto 1) y es en la caja afluente a esta unidad donde se adiciona DAP para tener una relación adecuada de DBO_5/N/P; en este reactor la operación se sucede de manera ascendente, entrando el lixiviado crudo que proviene del vaso II al fondo del reactor a través de cuatro tubos, donde es recibido por una capa de lodo compuesta por bacterias metanogénicas, que son las encargadas de remover una parte de la materia orgánica presente dentro del lixiviado; a medida que el lixiviado asciende, se forman moléculas de gas (metano y dióxido de carbono) que se adhieren a las moléculas liquidas (lixiviado) y sólidas (sólidos suspendidos) que al chocar con la campana de separación, que está ubicada en la parte superior del reactor se separan, quedando los sólidos dentro del reactor; el liquido con menor carga contaminante sale de la unidad de reacción y el gas se descarga a la atmósfera a través del interior de la campana. El lixiviado tratado (efluente) fluye al tanque de almacenamiento de lixiviados y de éste al tanque de bombeo, para posteriormente ser impulsado al tanque regulador de caudal (punto 2) en el cual se acondiciona el caudal de lixiviado a entregar al TTL a un máximo de 2 L/s.

De este tanque regulador el lixiviado fluye al desarenador (punto 3) unidad que contribuye a reducir la formación de depósitos pesados en las tuberías y conductos de la TTL. Este equipo cuenta con dos canales idénticos, los cuales se relevan entre sí, es decir, mientras se le hace mantenimiento a una unidad entra en funcionamiento la otra.

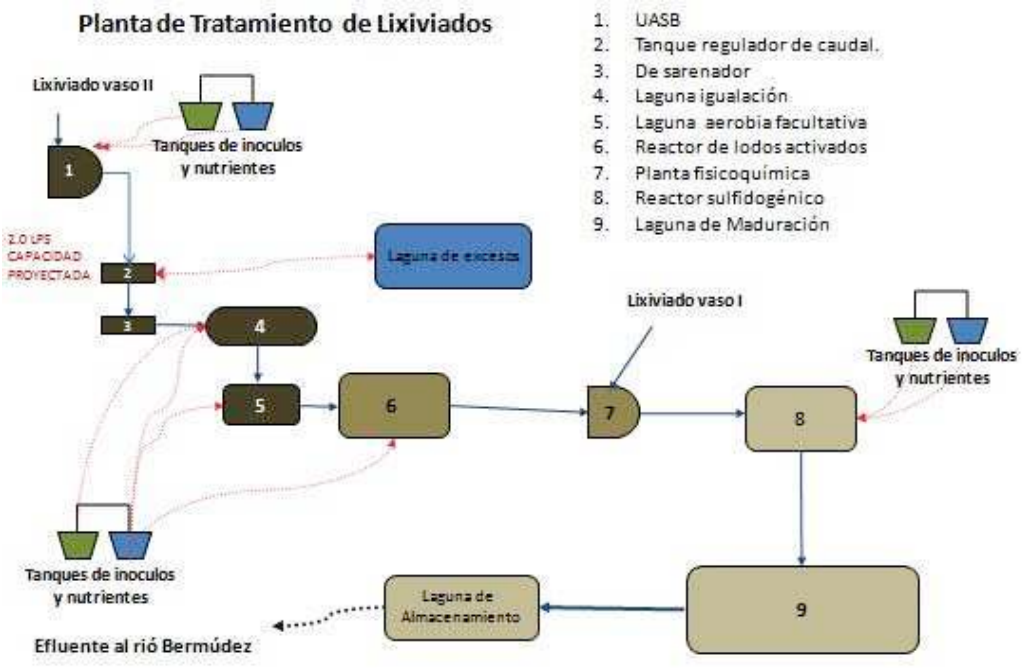


Figura 1.1. Tren de Tratamiento de Lixiviados

Cabe anotar que si el caudal de lixiviado tratado proveniente del reactor UASB supera los 2 L/s, el caudal excedente es desviado e ingresa a la laguna de excesos, la cual se utiliza para almacenar los excesos de lixiviado tratado proveniente del reactor UASB. Estos lixiviados son almacenados, principalmente en época de lluvia, es decir cuando se supera el caudal máximo de diseño del TTL, hasta tanto las condiciones de caudal y estado climatológico se estabilicen y permitan inyectar los lixiviados paulatinamente en el TTL.

El lixiviado tratado proveniente del reactor UASB y que ha pasado por el desarenador fluye por gravedad hacia la laguna de igualación (punto 4). Esta laguna funciona como un reactor anaerobio que opera con una concentración baja de microorganismos. La transformación biológica que aquí ocurre depende del tiempo de retención y de la temperatura del lixiviado. En caso de ser necesario, se realizan las correcciones de pH y dosificaciones de nutrientes con influencia directa a las subsiguientes etapas del TTL. El lixiviado proveniente de la laguna de igualación continua por gravedad a la fase siguiente de tratamiento en el tren, que es la laguna aireada facultativa (punto 5), la cual propicia una mayor área superficial de oxigenación. Esta laguna cuenta con una capa aerobia superficial, una zona facultativa intermedia y una capa anaerobia en el fondo donde los procesos de oxidación bacteriana convierten el material orgánico en CO_2, amonio y fosfatos.

Al salir de la laguna aireada facultativa el lixiviado fluye hacia el reactor de lodos activados (punto 6), que consta de un reactor llamado tanque de aireación, un tanque de sedimentación, (el reciclado de sólidos al tanque de aireación procedente del tanque de sedimentación) y una línea de purga del lodo. El tanque de aireación es un reactor de crecimiento en suspensión que contiene conjuntos microbianos o flóculos de microorganismos denominados lodo activo; allí se mezclan los organismos y el lixiviado con gran cantidad de aire. Bajo estas condiciones los organismos oxidan una parte del desecho orgánico a dióxido de carbono y agua, sintetizan la otra parte en forma de células microbianas nuevas, utilizando la energía obtenida de la oxidación. Luego la mezcla entra en el tanque de sedimentación, donde los microorganismos floculantes se asientan y son removidos de la corriente efluente. Los microorganismos sedimentados, o el lodo activado, se recirculan hacía el inicio del tanque de aireación, para mezclarlos de nuevo con el lixiviado. En este proceso se producen en forma continua, lodos activados nuevos, de cuyo exceso es necesario deshacerse (lodos activados de desecho y/o purga), los cuales son dispuestos en los lechos de secado.

Continuando con el tratamiento, el lixiviado efluente tratado en el reactor de lodos activados más el lixiviado crudo (punto 7) y maduro proveniente del vaso I, es sometido a un tratamiento primario en la planta fisicoquímica, tratamiento que tiene como finalidad la separación de sólidos y la remoción de color, a través de la técnica de desestabilización de coloides (coagulación) aglutinamiento de partículas (floculación) y recuperación de sólidos por gravedad (sedimentación).

El lixiviado proveniente del sistema de tratamiento primario (planta fisicoquímica) ingresa al reactor sulfidogénico (punto 8) donde la materia orgánica es removida por bacterias sulfatoreductoras (SRB) en un ambiente anaeróbico, buscando una máxima reducción de sulfato. Este reactor sulfidogénico está conformado por tres secciones A, B y C compuestas por una serie de pantallas o bafles (geomembrana), que permiten un flujo del lixiviado de manera vertical y recurrente, ocasionando una sedimentación y desarrollo de biomasa (bacterias anaerobias sulfato reductoras), provocada por la secuencia de flujos descendentes y ascendentes. El lixiviado efluente que fluye del reactor sulfidogénico ingresa a la laguna de maduración (punto 9). Esta laguna es considerada a la fecha, la última etapa TTL en el relleno sanitario Antanas, tiene una estructura simple que básicamente almacena el lixiviado tratado proveniente del reactor sulfidogénico, su función es similar a las lagunas facultativas, no acumulan lodos y uno de sus principales objetivos es reducir el número de organismos patógenos (coliformes fecales), la población de algas y la DBO_5 contenidos en el lixiviado.

Finalmente, el lixiviado que ha pasado por el TTL fluye a una razón máxima de 1,92 L/s por la red de conducción (10,2 km) hasta el punto de descarga final, ubicado en el cruce del río Bermúdez y la Quebrada Robles. En el efluente de laguna de maduración se ha instalado un caudalímetro electromagnético que permite verificar instantáneamente el caudal de descarga de lixiviados tratados. (Mayor detalle del funcionamiento de cada proceso y los equipos vinculados en el TTL se encuentra en el Anexo 1).

1.3.2.2 Otras Tecnologías para el Tratamiento de Lixiviados

Como ya lo hemos visto existen diferentes tecnologías para el tratamiento de lixiviados que han sido estudiadas a través de los años con miras a encontrar una solución aplicable, económicamente viable y sostenible para el medio ambiente. (Corena. 2008; Álvarez et al. 2006).

En muchos casos la remoción de los distintos contaminantes presentes en los lixiviados, DQO, DBO5, COVs, SST, amonio y metales pesados, hace necesario emplear combinaciones de los tratamientos habitualmente empleados. En la Tabla 1.2. se muestra la ponderación cualitativa de los procesos de tratamiento de aguas residuales en la remoción de distintos contaminantes.

La bibliografía sirvió de base para la selección de las tecnologías que serán evaluadas en el presente estudio; tecnología de membranas, evaporación y humedales como posibles sistemas de tratamiento o mejora para los procesos existentes en el TTL. Las tecnologías de membranas y humedales fueron seleccionadas para este estudio por que se contó con la logística para la realización de pruebas piloto que arrojaron datos reales del funcionamiento de ellas en el tratamiento de los lixiviados del RSA. La tecnología de evaporación se adoptó junto a las otras tecnologías como alternativa para comparación en el análisis multicriterial.

Tabla 1.2. Eficiencia de los Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales en la Remoción de distintos Contaminantes.

Contaminante / Procesos	SST	DBO_5	DQO	Amonio	Metales pesados	sales	Fe/Mn	COVs	Bacterias	Residuos
Adsorción	0	+(6)	+(6)	-	0	-	-	+	-	Carbón Activo Agotado
Floculación Precipitación Sedimentación	+ (7)	0	0	+(3)	+	-(4)	+	-	-	Lodos
Flotación	+	0	0	-	+(5)	-	+	-	0	Lodos
Tratamiento biológico y Sedimentación	+(7)	+	0	+	-	-	0	0	-	Lodos
Oxidación Química	-	+	+	0	-	-	0	+	+	Aire Residual
Intercambio Iónico	-	-	-	0	+	+	+	-	-	Concentrado
Electrodiálisis	-	-	-	0	+	+	+	-	-	Concentrado
Evaporación	+	+	+	+(1)	+	+	+	-	-	Res.Pastoso Aire residual
Nanofiltración	+	+	+	0	+	0	+	-	+	Concentrado
Osmosis Inversa	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Concentrado

(Fuente: Fornieles, 2011).

+ Adecuada
- No adecuada
0 Parcialmente adecuada

(1) Trabajando a pH bajo
(2) Trabajando a PH alto
(3) Si existe precipitación y retirada de lodos, en caso contrario "-"
(4) Si precipitamos sulfatos "+"
(5) Después de la floculación
(6) Si la concentración es baja, en caso contrario "0"
(7)Si está acompañada de un sistema sedimentación, en caso contrario "0"

- *Humedales Artificiales*

Un humedal artificial o construido es un sistema alternativo de tratamiento de aguas de poca profundidad en el que se siembran especies acuáticas encargadas de purificar el agua mediante procesos naturales. Según la EPA (2000) un humedal artificial de flujo subsuperficial está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado En Estados Unidos y Europa se utiliza mucho la grava para la construcción, aunque también se ha utilizado roca triturada, arena y otros materiales del suelo. Los juncos, las cañas y las aneas son los tipos de vegetación más típicos, aunque otras juncias nativas y especies de humedales locales puedan ser utilizados también. Las plantas que crecen rápidamente, así mismo se esparcen y tienen sistemas extensos de raíz por lo cuál son muy deseables (Setty, 2007). Utilizando múltiples tipos de plantas nativas antes que una sola especie ayudará a evitar que en alguna instancia todas las plantas mueran. Las variedades genéticas diferentes son resistentes a tipos diferentes de estrés. La estética es otra consideración en la selección de la vegetación, ya que la eliminación de contaminantes es semejante entre estos tipos diferentes de plantas.

Los olores, mosquitos e inundaciones son características controlables cuando el humedal es construido y controlado adecuadamente (Setty, 2007). Los humedales artificiales tienen un tiempo de vida dependiendo del diseño, las características de las aguas negras y la temporada del año (EPA, 1999). Típicamente su período inicial dura 12-22 meses después de construido, aunque para humedales subterráneos de flujo (tipo SFF) no es tan critico, ya que mucha de la filtración se lleva a cabo por medios físicos. El desempeño del sistema debe mejorar durante los primero años a medida que la penetración de la raíz traiga oxígeno más adentro de la gravera. Con

el mantenimiento apropiado, la vida del sistema depende sólo del estado de la estructura, Setty, referencia 20 años como la vida útil de materiales adecuados. Los humedales construidos tipo SSF pueden disminuir varias de las características perjudiciales de aguas negras. En la Tabla 1.3 se registran algunos de los datos reportados para la remoción de parámetros por humedales de SSF, con buenos resultados para DBO, SST y coliformes fecales, la eliminación de fósforo varía a través del año con el crecimiento de la planta, pero es generalmente pobre.

Tabla 1.3. Reducción típica del porcentaje y concentración de parámetros contaminantes en humedales de SSF.

Parámetro	Reducción Esperada	Concentración Esperada del Efluente (mg/L)
Sólidos Suspendidos Totales	51-98%	3.7-64 (típicamente <10)
Coliformes	82-100%	(MPN) 50-577,000/100ml
Demanda Bioquímica de oxígeno	49-96%	5.3-90
Nitrógeno	12-86%	6.3-29.6
Fósforo	-12-91%	0.5-9.6
Metales: Al, Cu, Zn, Cd Fe, Mn	84-99% -10%	<0.01-0.05 0.288-1.234

(Fuente: EPA 1999; Setty 2007).

Los humedales artificiales tienen ventajas respecto de los sistemas de tratamiento alternativos debido a que requieren poca o ninguna energía para funcionar. Si hay suficiente tierra disponible cerca de la instalación de los humedales de cultivo acuático, puede ser una alternativa de costo efectivo. Los humedales proporcionan el hábitat para la vida silvestre, y son, estéticamente agradables a la vista (Noeggerath, et al. 2011).

Económicamente estos sistemas son competentes cuando se los compara con otras tecnologías. Su desventaja radica en la cantidad de terreno que requiere el sistema para realizar los procesos. La combinación de humedales con otras tecnologías puede contribuir o mejorar algunas etapas del proceso donde la acumulación de precipitados, la formación de espumas o las variaciones en cargas hidráulicas y orgánicas se convierten en un problema. Una característica de estos sistemas es que ofrecen altos tiempos retención hidráulica y permiten manejar procesos de volúmenes grandes, controlando variaciones en caudal, reduciendo acumulación de precipitados, producción de gases y por lo tanto espuma (Noeggerath, et al. 2011).

El tema de los humedales se ha estudiado en diversos trabajos. Lahora (2003) describe la depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales a través de un estudio de caso desarrollado en Almería–España. Por su parte Peña (2007) realizó un análisis comparativo de los tratamientos convencionales, lagunas aerobias y anaerobias y el tratamiento de humedales artificiales y Montoya (2010), compara la remoción de materia orgánica en humedales usando tres especies de macrófitas.

- *Evaporación*

La evaporación como sistema de tratamiento de lixiviados es una aplicación relativamente nueva, al igual que los humedales. Generalmente esta tecnología utiliza la energía provista por el biogás del relleno sanitario para evaporar el lixiviado por calentamiento. Al final del proceso se logra el control del total de emisiones de lixiviados del relleno sanitario, quedando un lodo que se dispone nuevamente en el relleno (Noeggerath, et al. 2011).

La literatura indica que la producción de gas en el relleno sanitario alcanza para suplir las necesidades energéticas de la evaporación de los lixiviados. Dependiendo del tipo de lixiviado en algunos casos existe la necesidad de hacer un post-quemado de la mezcla gas-vapor de agua que sale del evaporador para lograr la destrucción de emisiones de COVs que se arrastran durante el proceso de evaporación, de tal manera que la cantidad requerida de biogás se aumenta con respecto a los cálculos termodinámicos normales; una vez quemados los COVs las emisiones del proceso se limitan a vapor de agua y a un lodo espeso (Corena, 2008).

Algunas tecnologías utilizan de manera directa la energía que se genera al quemar el gas, con el objetivo central de evaporar el lixiviado, lo que se denomina vaporización del gas, mientras otras tecnologías pueden utilizar el calor residual que generan motores de combustión o turbinas, que utilizan el biogás para generar potencia mecánica, que a su vez se puede usar para la generación eléctrica. Así, se logra no sólo el aprovechamiento del gas para la conversión a energía eléctrica, sino el tratamiento de los lixiviados, solucionando los dos principales problemas que tienen los rellenos sanitarios como son la emisión de gases y de lixiviados (Noeggerath, et al. 2011).

Esta tecnología presenta problemas operativos, como la formación de espuma por la turbulencia generada en el proceso de evaporación, el incrustamiento de precipitados en el sistema, y el arrastre de COVs. Igualmente cuando los lixiviados son jóvenes y existen altas concentraciones de ácidos grasos volátiles y amoníaco, y dependiendo del pH al cual se realice la evaporación, estos compuestos se pueden arrastrar junto con el vapor de agua. Se ha propuesto realizar ajustes de pH para minimizar el arrastre de los ácidos y/o amoníaco y también sistemas de operación múltiple (Corena, 2008). Otras ventajas de la tecnología es la simplicidad tecnológica de los equipos, y los bajos costos operativos al compararla con otras tecnologías similares (Giraldo, 2002).

- *Sistemas de membrana*

La tecnología del tratamiento de aguas utilizando membranas es una tecnología de rápido desarrollo en la última década. Cada día se observan más aplicaciones de las membranas en el tratamiento de todo tipo de efluentes. Se encuentra en la literatura aplicaciones de la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración, la ósmosis

inversa, la ósmosis directa e inclusive la pervaporación al tratamiento de lixiviados, bien sea de manera directa, o acoplada a otro tipo de proceso de tratamiento (Corena, 2008). A continuación se describen las características principales de las tecnologías de ósmosis inversa y el proceso realzado de cizalla vibratorio-VSEP.

- **Ósmosis Inversa**: Esta tecnología reporta excelentes rendimientos para la remoción de la mayoría de los contaminantes. En el caso de lixiviados, funciona mejor para lixiviados viejos o lixiviados que han sufrido un pretratamiento, por que trata eficientemente DBO_5 de valores bajos, menores a 1000 mg/L. En el proceso de ósmosis inversa el agua es obligada a pasar por una membrana semi-permeable, dejando pasar sólo agua pura, por lo que a la inversa del sistema natural, el desplazamiento del agua va desde la zona de mayor concentración a la zona de menor concentración (agua purificada). Se utiliza una membrana semi permeable para filtrar y extraer los corpúsculos sólidos disueltos, los orgánicos, los pirogénicos, la materia coloidal, sub micro organismos, virus y bacterias que puede contener el agua, dependiendo del material de la membrana, hay tres tipos de materiales para membrana que son usados en sistemas de ósmosis inversa para producir agua pura en el laboratorio: acetato de celulosa, poliamidas y membrana de película delgada. Según Corena (2008) la molécula de agua por ser tan pequena es la única capaz de pasar por los poros de la membrana, eliminando así en su totalidad o casi, nitratos, pesticidas, bacterias, virus, microbios, amianto, herbicidas, cal, mercurio, plomo y otros metales pesados y todo lo que esté disuelto en el lixiviado.

- **Tecnologia VSEP (Procesos Realzado de Cizalla Vibratorio):** es una tecnología de membranas posible de filtrar corrientes que contienen una gran variedad de componentes; no presenta problemas de obstrucción, además de filtrar los solidos suspendidos, reduce o elimina los componentes orgánicos e inorgánicos disueltos. Al final la tecnología entrega agua clara y un lodo concentrado. La diferencia con otras tecnologías de membrana es que impiden que los agentes obstructores se acumulen en la superficie de la membrana a través de fuerzas de cizallas provocadas y permitiendo altas velocidades de alimentación retardando su deposición sobre la superficie de la membrana (Monroe, 2013).

La selección de la membrana es el parámetro más importante que afecta la calidad de la separación, aunque también incluyen parámetros operativos como la presión, la temperatura, la amplitud de la vibración y el tiempo de residencia. En general la VSEP trabajan a presiones de hasta 1000 psig y temperatura máxima de hasta 80ºC. La eficiencia de este sistema radica en el cizallamiento del paquete de filtros (Monroe, 2013). Sobre la tecnología VSEP se vienen realizando estudios como el de Zouboulis et al. (2008) que evalúa el rendimiento del sistema de filtración vibratorio

VSEP para diferentes tipos de membranas (microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración), y el de Johnson (2006), quién realiza una comparación de métodos convencionales y los de VSEP y concluye que la tecnología VSEP ha demostrado ser competitiva con los sistemas convencionales de membrana en espiral y puede reemplazarlo, dando rendimientos de hasta un 98% en la recuperación de agua tratada.

En el presente estudio la tecnología VSEP se analiza individualmente y además acoplada a otro sistema de membranas como es la ósmosis inversa.

Estos sistemas de membranas y la evaporación se aplicaron como tecnologías *alternativas* al proceso actual de TTL, mientras que el humedal fue analizado como tecnología *complementaria* al TTL.

Las siguientes tablas presentan comparativamente los aspectos de las tecnologías mencionadas anteriormente; considerando la capacidad de resolver los problemas más frecuentes que presentan los lixiviados (Tabla 1.4.) el grado de complejidad de la tecnología (Tabla 1.5) y el rendimiento en la remoción de los principales parámetros (Tabla 1.6).

Tabla 1.4. Manejo de características problemáticas de los lixiviados.

Problemas	Sistemas Naturales	Evaporación	Sistema de Membranas
1. Formación de precipitados	+	+	+++
2. Toxicidad a los microorganismos	+	No	No [1]
3. Formación de espumas	No	++	Variable [2]
4. Emisión de COV	+	++	Variable [2]
5. Sensibilidad a variaciones de caudal	No	+	+
6. Producción y manejo de lodos		+	+
7. Requerimientos de área	Alta	Muy baja	Baja

(Fuente: Giraldo, 2002)

[1] Pueden formarse en los tanques de almacenamiento.
[2] Si los sistemas son aerobios, la problemática puede ser alta.
Entre más (+) más negativamente lo afecta.

Tabla 1.5. Complejidad Tecnológica.

Problemas con	Sistemas Naturales	Evaporación	Sistema de Membranas
1. Necesidad de insumos químicos	-	++ [2]	+++ [4]
2. Necesidad de insumos operacionales	-	+	+++
3. Necesidad de suministro de partes	-	+	+++
4. Suministro de energía eléctrica	+ [1]	- [3]	+++
5. Complejidad operativa	-	++	+++

(Fuente: Giraldo, 2002)

[1] Puede requerir si hay necesidad de bombear el lixiviado. Usualmente no requiere.
[2] Puede requerir pretratamiento, algunos sistemas usan sustancias para control de pH, espumas.
[3] Puede llegar a ser autosuficiente. Algunas tecnologías así están diseñadas.
[4] Requiere un extenso pretratamiento.

Tabla 1.6. Rendimiento en remoción de parámetros.

Problemas con	Sistemas Naturales	Evaporación	Sistemas de Membranas
1. Demanda Bioquímica de Oxigeno	Muy altos	Muy altos	Muy altos
2. Nutrientes	No	Muy altos	No [2]
3. Metales	Altos	Muy altos	Altos
4. Compuestos Orgánicos Volátiles	+	Muy altos	No [2]
5. Patógenos	Variables [1]	Muy altos	Muy altos

(Fuente: Giraldo, 2002)

[1] Pueden ser muy altos si así se requiere.

[2] Puede ser altos o bajas dependiendo del diseño.

Desde el punto de vista económico la tecnología de membranas resulta ser la más costosa por sus especificidades y la mano de obra calificada que se requiere para su instalación y funcionamiento, luego en la evaporación la etapa de arranque resulta ser la de mayor inversión, mientras que los costos de los sistemas naturales se caracterizan por ser bajos, aunque requieren de extensas zonas para su implementación por lo cual su costo depende del costo de la tierra donde serán instalados.

1.3.3 Implicación Ambiental y Social del Relleno Sanitario Antanas

La Ciudad de Pasto actualmente produce 210 toneladas/día y los municipios aledaños en promedio aportan unas 15 toneladas/día adicionales. Para el manejo de estos residuos el relleno sanitario Antanas contempla sistemas para disminuir el impacto ambiental que causa la disposición de los RS como son el TTL y una planta de quema del biogás.

Área de Influencia del Proyecto

El relleno sanitario Antanas configura un sistema de áreas de influencia que van desde lo regional a lo local; en esta área de influencia el proyecto impacta directa o indirectamente el sistema de recursos naturales, económico y social, ya sea de manera positiva y/o negativa.

El área de influencia regional, corresponde al sector que produce diferentes tipos de desechos (residenciales, comerciales e industriales) no peligrosos, que son la materia prima del proyecto. La producción de desechos en esta zona de influencia indica que el sector residencial es el mayor productor de residuos, seguido por el sector comercial. Otro aspecto importante son los residuos biológicos y sobre los cuales EMAS-Pasto sólo presta el servicio de recolección y almacenamiento en cuarto refrigerado, hasta su tratamiento en la ciudad de Manizales.

El área de influencia lineal corresponde a la vía Panamericana y a la variante a Buesaco que impactan áreas externas del relleno en forma bi-direccional. Este área consiste en unos 14 kilómetros de vía, los cuales se encuentran en buen estado, está pavimentada, tiene unos 7 metros de ancho, con buenas especificaciones de

rodadura y cunetas, sin embargo, es de alto flujo vehicular, ya que es la conexión del departamento de Nariño con el continente Suramericano. Este área de influencia se comporta como una fuente móvil de contaminación, cuyo mayor impacto se relaciona con la presencia de ruido, material particulado y gases.

El área de influencia local está inscrita dentro de la microcuenca de la quebrada Yuyas, en una franja en la que se disponen finalmente los residuos producidos en el área regional. El lote Antanas fue adquirido para un uso que corresponde al de relleno sanitario, el cual fue seleccionado entre 14 lotes. Esta región que no tiene zona de cultivos, tiene pluviosidad media de 1200 mm/año, la evapotranspiración real es de 841 mm/año; corresponde a una zona de drenaje intervenida por los usos del suelo aguas arriba de la variante a Buesaco, por lo que su drenaje natural ha sido intervenido mediante obras cuyo fin es el de manejar hidráulicamente las aguas sub-superficiales y superficiales.

El área de influencia local es rica en agua, razón por la cual la mayoría de las viviendas de la zona se abastecen de nacimientos ubicados en predios (76%) o hacen uso del acueducto (24%) que corresponden a la cabecera del corregimiento de Daza. El principal uso del recurso es de carácter doméstico y/o consumo de los animales; en pequeño porcentaje el agua es utilizada para el riego de cultivos y en una pequeña porción para uso comercial; no obstante el uso dado, respecto al punto de toma de las aguas para consumo y la localización del relleno no existe riesgo de contaminación.

Las construcciones más cercanas en línea recta a la actual área de trabajo del R.S.A están ubicadas a 750 m y 900 m; en un radio de un kilómetro del relleno sanitario se ubican 7 viviendas que representan el 4.4% del total, mientras que al ampliar el radio a dos kilómetros se localizan 63 viviendas (46%).

1.4. MARCO LEGAL

En Colombia los temas referidos a residuos sólidos municipales y peligrosos son tratados por diferentes sectores de la administración pública, tales como Ambiente, Salud, Desarrollo Urbano y Social, Comunicaciones, Transporte, Industria, Comercio, Trabajo, entre otros. Se ha avanzado en el tema de regulación (leyes, reglamentos y normas) y procedimientos administrativos (manifiestos, permisos, licencias y registros), dirigidos a mejorar las condiciones de manejo y disposición de los residuos sólidos, al igual que mitigar el impacto que este procedimiento causa al medio ambiente.

En el manejo de los RSU, todavía se evidencia un inadecuado manejo por parte de los municipios, debido a problemas con las administraciones municipales y a la baja participación de la comunidad y de las empresas privadas. Según la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) en el año 2008 se generaron en Colombia aproximadamente 25.079 toneladas diarias de residuos, de los cuales el 90,99% (22.819,2 ton/día) fueron dispuestas en rellenos sanitarios o plantas integrales de tratamiento de residuos sólidos; persistiendo 9,01% con disposición inadecuada (2,26 ton/día) representados en 283 botaderos a cielo abierto, 19 enterramientos, 7 quemas y 8 cuerpos de agua. En Colombia existen 1112 municipios, de los cuales sólo 1088 poseen reportes sobre el tipo de disposición que utilizan para sus residuos; 653 de estos lo hacen en rellenos sanitarios, ya sean regionales o no, 98 en plantas integrales y 337 municipios aun presentan disposición inadecuada de los mismos (Noguera, et al. 2010).

Actualmente, Colombia cuenta con un amplio desarrollo normativo enmarcado en la Política Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos emitida en 1998, actualizada en el CONPES soportada por la Constitución Nacional, la Ley 99 de 1993 y la Ley 142 de 1994, la cual establece tres objetivos específicos que determinan las prioridades de la gestión en residuos: Minimizar la cantidad de residuos que se generan, aumentar el aprovechamiento racional de los residuos sólidos y mejorar los sistemas de eliminación, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos. (detalle del marco legal en Anexo 4).

A continuación se describen las tres reglamentaciones de aplicación directa sobre el tratamiento de lixiviados.

1.4.1 Decreto 1594 de 1984 – Uso del Agua y Residuos Líquidos

Este decreto controlaba los parámetros que se debían cumplir para realizar el vertimiento a las aguas superficiales por diferentes actividades entre las que se encuentra el vertimiento de lixiviados provenientes de los rellenos sanitarios. A

continuación se nombraran algunos de los artículos que permiten conocer mejor los alcances de la normativa.

- Artículo 61: Se prohíbe la inyección de residuos líquidos a un acuífero, salvo que se trate de la reinyección de las aguas provenientes de la exploración y explotación petrolífera y de gas natural, siempre y cuando no se impida el uso actual o potencial del acuífero.

- Artículo 62: Se prohíbe la utilización de aguas del recurso, del acueducto público o privado y las de almacenamiento de aguas lluvias, con el propósito de diluir los vertimientos, con anterioridad a la descarga al cuerpo receptor.

- Artículo 63: Se permite la infiltración de residuos líquidos siempre y cuando no se afecte la calidad del agua del acuífero en condiciones tales que impida los usos actuales o potenciales.

- Artículo 72: Todo vertimiento a un cuerpo de agua deberá cumplir, por lo menos, con las siguientes normas:

Tabla 1.7. Algunos parámetros que exige cumplir la norma 1594/84.

Referencia	Usuario Existente	Usuario Nuevo
pH	5 a 9 unidades	5 a 9 unidades
Temperatura	< 40℃	< 40℃
Material flotante	Ausente	Ausente
Grasas y aceites	Remoción > 80% en carga	Remoción > 80% en carga
Sólidos suspendidos, domésticos o industriales	Remoción > 50% en carga	Remoción > 80% en carga
Demanda bioquímica de oxígeno:		
Para desechos domésticos	Remoción > 30% en carga	Remoción > 80% en carga
Para desechos industriales	Remoción > 20% en carga	Remoción > 80% en carga

1.4.2 Decreto 3930 de 2010

Este decreto presenta la nueva normativa ambiental que reemplazó el decreto 1494 de 1984 y por el cual se establecen las normas y los valores límites máximos permisibles de parámetros en vertimientos puntuales a sistemas de alcantarillado público y a cuerpos de agua continentales superficiales de generadores que desarrollen actividades industriales, comerciales o de servicio y se dictan otras disposiciones.

El decreto en su capítulo IV- en su Artículo 10, resuelve los valores máximos permisibles para los parámetros de descarga, algunos de los cuales se consignan en la siguiente tabla.

Tabla 1.8. Valores límite máximos permisibles que se deben cumplir según Decreto 3930 del 2010.

PARAMETRO	UNIDAD	INSTALACIÓN EXISTENTE	INSTALACIÓN NUEVA
pH	Unidades	6,0 a 8, 0	
Temperatura	^{0}C	No podrá tener una variación mayor de 3,0 ℃ en relac ión con la temperatura del cuerpo de agua continental superficial que recibe el vertimiento puntual al momento y en el sitio de efectuarse el mismo.	
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	400,0	200,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	200,0	50,0
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	200,0	50,0
Nitrógeno Total (N)	Mg/L	20,0	10,0
Material Flotante	mg/L	0,5	
Grasas y Aceites	mg/L	20,0	20,0
Fenoles	mg/L	0,2	0,2

Se resalta lo dispuesto en el Capitulo VII- **Disposiciones Finales**, artículo 27- ***Régimen de Transición para los generadores que desarrollen actividades industriales, comerciales o de servicio***. Los generadores de vertimientos que a la entrada en vigencia del Decreto 3930 de 2010, tengan permiso de vertimientos vigente expedido con base en el Decreto 1594 de 1984 y estuvieren cumpliendo con los términos, condiciones y obligaciones establecidos en el mismo, deberán dar cumplimiento a la norma de vertimiento definida en la presente resolución, dentro de los dos (2) años, contados a partir de la fecha de publicación de la respectiva resolución. En caso de optar por un Plan de Reconversión a Tecnología Limpia en Gestión de Vertimientos, el plazo de que trata el presente artículo se ampliará en tres (3) años. (el relleno sanitario Antanas el 25 de octubre del 2010, momento de publicación de este decreto contaba con el permiso de vertimientos).

1.4.3 Permiso de Vertimientos

La empresa EMAS Pasto SA ESP tramitó ante la Corporación Autónoma Regional de Nariño (Corponariño) el permiso de vertimientos, el cual está asignado hasta el 2013, mediante el expediente No. Vtos. 165 y las resoluciones; No. 128 y 136, por medio de las cuales se aprobó la primera etapa del permiso de vertimientos y se autoriza la segunda etapa. En estas resoluciones se designa el punto de vertimiento o disposición final, el tramo después de la desembocadura de la Quebrada los Robles al Río Bermúdez.

El permiso de vertimiento estipula que Corponariño debe monitorear el tratamiento que se le realiza a los lixiviados antes de su vertimiento y define que se debe cumplir con la normativa ambiental que se encuentre vigente.

1.5 ANÁLISIS MULTICRITERIO

Dentro de los objetivos del presente estudio se estable la evaluación de tecnologías alternativas y complementarias para el tratamiento de los lixiviados a través de la metodología de análisis multicriterio (AMC) con el objetivo de integrar la dimensión, económica, social, ambiental y político-institucional de la realidad del relleno Sanitario Antanas, en un solo marco de análisis para dar una visión integral y de esta manera tener un mejor acercamiento a dicha realidad. Esta metodología posibilita la participación de los diferentes actores que se involucran realizando una ponderación de criterios de evaluación definidos en un marco de participación.

Cuando se trata de evaluar un sistema y adquirir nuevas tecnologías no se puede olvidar que uno de los aspectos limitantes es el dinero; el dinero es la vara de medición universal y en este marco se inscribe el análisis costo – beneficio, herramienta de la economía neoclásica que se utiliza en política ambiental. No obstante, criterios más realistas resaltan la extrema dificultad de valorar económicamente las externalidades de acuerdo con las incertidumbres presentes y la complejidad de los sistemas reales. Técnicas analíticas como el análisis costo – beneficio dejan de lado una gran cantidad de información para reducir la complejidad ambiental al tema económico. Así, un balance entre las ganancias y pérdidas, las ventajas y desventajas, es el tipo de racionalidad que desafortunadamente se usa para tomar decisiones (Riascos, 2010).

Los métodos de decisión multicriterial tratan de considerar de forma simultánea varios criterios que pueden ser conflictivos en la toma de decisiones, proporcionando una serie de herramientas que ofrecen la flexibilidad necesaria para analizar los efectos de decisiones con connotaciones cualitativas multidimensionales relacionadas. De esta forma se procura un mejor acercamiento a la complejidad, entendiendo que ésta se ve reflejada en la aceptación de diferentes criterios de descripción de una misma realidad (Funtowicz et al., 1999).

El AMC busca integrar las diferentes dimensiones de una realidad en un solo marco de análisis para dar una visión integral y de esta manera tener un mejor acercamiento a la realidad; es adecuado para tomar decisiones que incluyen conflictos sociales, económicos, técnicos y objetivos de conservación del medio ambiente. Este modelo sostiene que los agentes económicos responsables de tomar decisiones y formular políticas buscan un equilibrio o compromiso entre un conjunto de objetivos usualmente en conflicto, que pretenden satisfacer en la medida de lo posible una seria de metas asociadas a dichos objetivos (Fuentes, 2006).

El AMC posibilita la participación de los diferentes actores involucrados en un problema a través de la elección de los criterios de evaluación en un marco de amplia participación social y la calificación directa de las distintas alternativas de elección por parte de dichos actores. Por lo cual, el AMC es más complejo que un

simple análisis costo-beneficio (Riascos, 2010). Además, cuando se ha de decidir entre diversas alternativas, lo mas frecuente es que se pretenda maximizar o minimizar diversos criterios, de forma que se encuentre la alternativa más adecuada ambiental, técnica, económica y socialmente.

Joaquín Bosque Sendra en el libro de Barredo,1996; define el análisis multicriterio como: "*el mundo de conceptos, aproximaciones, modelos y métodos usados para auxiliar a los centros decisores a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar objetos, con base en una evaluación (expresada por puntuaciones, valores o intensidades de preferencia) de acuerdo con varios criterios*". Estos criterios pueden representar diferentes aspectos como objetivos, metas, valores de referencia, niveles de aspiración o utilidad.

La metodología de análisis multicriterial se ha aplicado en diferentes estudios como herramienta de evaluación. Así, García (2004) pondero la viabilidad de la aplicación del análisis multicriterio y la lógica difusa en la evaluación de impactos ambientales como una herramienta de ayuda en la toma de decisiones. Falconi. et al., (2004) muestran que la mayoría de instrumentos económicos, usados para la gestión ambiental no recogen la complejidad de los análisis multicriteriales y por lo tanto no son adecuados para la toma de decisiones , aunque se apoyen en la sostenibilidad y conservación de los recurso. y Gutiérrez. et al., (2010) combinaron técnicas de evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica para obtener un modelo de ocupación urbana deseable para el Gran San Miguel de Tucuman.

CAPITULO II

2. METODOLOGÍA

A continuación se describe la metodología aplicada para cumplir con el desarrollo de los objetivos planteados en el proyecto “Evaluación de Alternativas para el Tratamiento de Lixiviados en el Relleno Sanitario Antanas del Municipio de San Juan de Pasto en Colombia”. Dicha metodología se estableció como se indica a continuación con el fin de desarrollar la información que permita brindar una propuesta para el mejoramiento del TTL del relleno sanitario Antanas.

Inicialmente se realizó un análisis de la situación actual del procedimiento que se lleva a cabo en el relleno sanitario Antanas para el TTL (proceso 1) en el marco de la legislación que se debe cumplir hasta la fecha (decreto 1594 del 84), y los permisos con que se cuenta para el vertimiento de los lixiviados (Permiso de vertimiento de lixiviados en el relleno sanitario Antanas mediante resoluciones No. 128 y 136 otorgado por Corponariño).

Posteriormente se revisó la nueva normativa ambiental (Decreto 3930 de 2010) y los parámetros del proceso en relación al cumplimiento de esta norma, identificando las etapas del proceso que no alcanzan el cumplimiento de los valores de descarga permitidos.

Continuando con el planteamiento de la propuesta, se analizaron los resultados de la aplicación de las siguientes tecnologías (a escala piloto): humedales como tecnología complementaria al TTL (proceso 2), membranas como tecnología alternativa VSEP (proceso 3) y VSEP + Osmosis inversa (proceso 4).

Finalmente, se evaluaron comparativamente los resultados en el marco de la legislación vigente a través de la metodología de análisis multicriterio, identificando impactos ambientales, sociales, técnicos y económicos con la finalidad de determinar la técnica ó combinación de técnicas que mejore la eficiencia del actual TTL.

2.1 DISEÑO METODOLÓGICO

La investigación se desarrolló en Colombia directamente en la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Antanas de la ciudad de Pasto, donde se realizó un monitorio al funcionamiento de la planta que se encarga de remover los contaminantes presentes en los lixiviados. El monitoreo se inició a finales del 2010 hasta marzo del 2012. Como ya se ha mencionado, el TTL está formado por seis unidades, cinco de las cuales realizan procesos biológicos y una de ellas aplica un proceso físico-químico. Si bien se han realizado monitoreos sobre varios puntos del proceso desde el ingreso del lixiviado crudo hasta la salida para su vertimiento, a fines de evaluar eficiencias de los procesos se analizan los tres puntos de monitoreo que se consideran más importantes como son la entrada al sistema o sea el efluente del Vaso II (punto1), la salida del reactor UASB que constituye el primer proceso de tratamiento (punto 2) y la salida o vertido (punto 3) luego de atravesar la laguna de maduración (Figura 2.1).

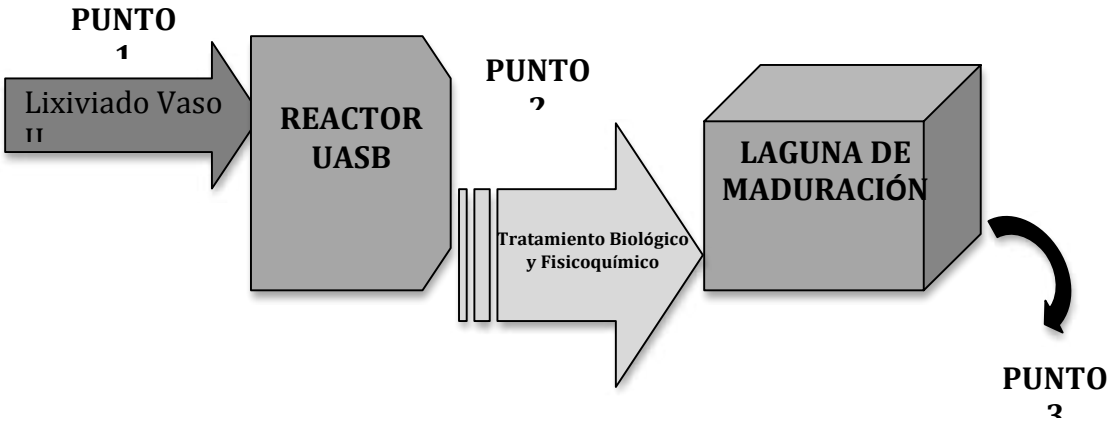


Figura 2.1 Puntos de muestreo para el diagnóstico del TTL.

- Punto 1 - Efluente lixiviado Vaso II
- Punto 2 – Efluente Reactor UASB
- Punto 3 – Efluente Laguna de Maduración

Para evaluar la eficiencia del tren de tratamiento actual en el cumplimiento de los parámetros que establece la normativa ambiental en la asignación de los permisos para realizar vertimiento de lixiviados a cuerpos de agua superficiales, y contando con la disposición de la empresa EMAS SA ESP para cubrir los gastos de la realización de unas pruebas pilotos aplicando el sistema de membranas VSEP (proceso 3) para tratar los lixiviados de la planta, se recolectó la información y los resultados de dichas pruebas, que fueron utilizados para comparar la eficiencia de las tecnologías de sistemas acoplado de membranas (proceso 4) y los sistemas naturales acoplados al TTL (proceso 2).

A continuación se presentan algunas condiciones de las tecnologías aplicadas.

- *Proceso 1 – Tren de tratamiento de lixiviados relleno sanitario Antanas*

El lixiviado del vaso II y el Vaso I pasa por TTL existente actualmente en la planta del relleno sanitario Antanas, que como se ha dicho en varias ocasiones, cuenta con seis procesos, cinco de ellos biológicos y uno físico-químico (ver Figura 1.1).

- *Proceso 2 – TTL + humedales*

El efluente del TTL pasa al humedal para continuar con el proceso de remoción de los contaminantes, después de un tiempo de residencia se analizó el efluente. Este acoplamiento se realizó teniendo como antecedente que en las instalaciones del relleno sanitario se encuentran humedales de prueba.

- *Proceso 3 – Sistema VSEP*

Proceso realzado de cizalla vibratorio que se observa en la Figura 2.2. es una tecnología patentada utilizada para tratamiento de aguas; su sistema de vibración filtra soluciones que contienen componentes contaminantes sin presentar problemas de obstrucción.

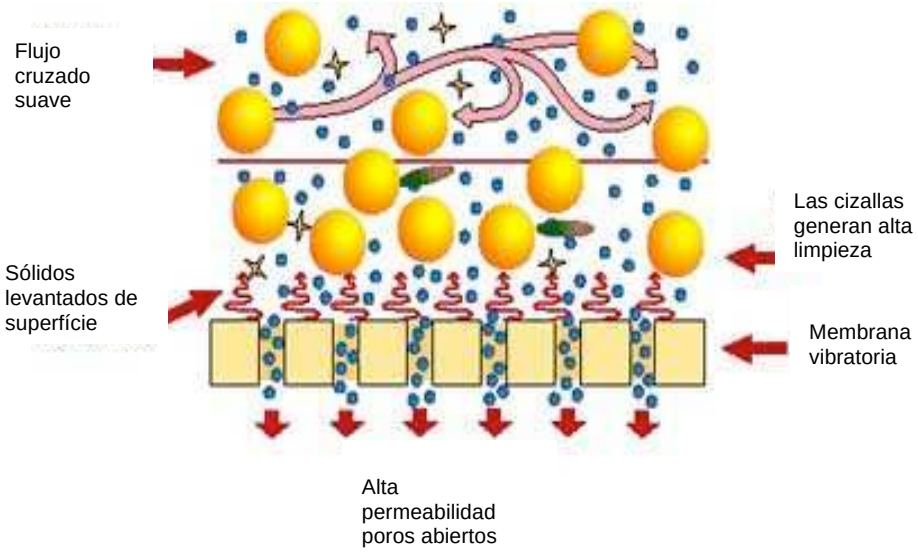


Figura 2.2.Sistema VSEP.
Fuente: http://www.vsep.com/technology/

La selección de la membrana es el parámetro más importante que afecta la calidad de la separación. Otros parámetros importantes incluyen la presión, la temperatura, la amplitud de la vibración y el tiempo de residencia. Las VSEP funcionan normalmente con presiones de hasta 1.000 psig,

- *Proceso 4 – VSEP + Ósmosis Inversa*

El efluente del tratamiento realizado en el proceso 3 utilizando la tecnología VSEP, se trata posteriormente por ósmosis inversa (Figura 2.3) para remover una mayor cantidad de contaminantes y finalmente se analiza el efluente de este proceso.

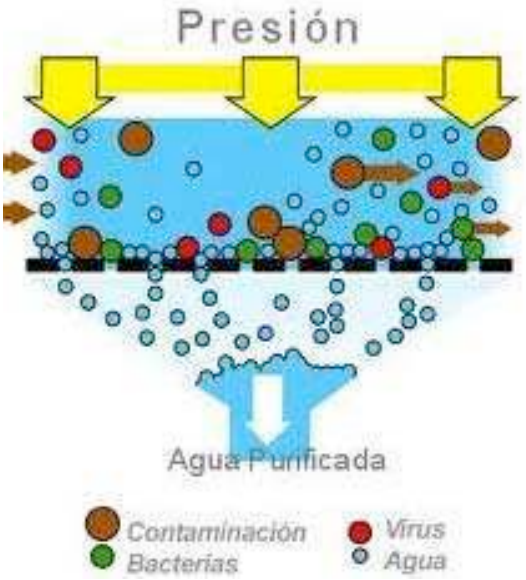


Figura 2.3.Ósmosis Inversa

Fuente: http://purepro.com.ve/osmosis.html

2.2 FUENTES PRINCIPALES

2.2.1. Datos de Campo

La planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Antanas es monitoreada mensualmente. Para el presente estudio se analizaron los resultados de las pruebas de laboratorio comprendidas entre el periodo de Noviembre de 2010 y Marzo de 2012 para determinar la eficiencia del proceso de remoción de los contaminantes. Los parámetros que se miden habitualmente corresponde a DBO_5, DQO, grasas y aceites, sólidos totales, pH, temperatura, humedad, nitrógeno total, fósforo total, sulfatos, y sustancias de interés sanitario; según el movimiento de los lixiviados y los requisitos que Corponariño solicite para el control ambiental del efluente vertido en aguas superficiales.

Los datos obtenidos durante el monitoreo al TTL y durante las pruebas piloto con las tecnologías de membranas y la tecnología de humedales acoplada al TTL fueron analizados en el Laboratorio de Análisis Químico y Aguas de la Universidad de Nariño en la ciudad de Pasto en Colombia. Dicho laboratorio está acreditado por el IDEAM[2] para los parámetros, pH, grasas y aceites, sólidos totales, DBO_5 y DQO, según Resolución No. 42 del 25 de Enero de 2011.

La Tabla 2.1 describe los métodos y las técnicas utilizadas para analizar las muestras en el presente estudio.

Tabla 2.1. Técnicas y Métodos utilizadas – Análisis de Muestras

PARAMETRO	MÉTODO	TÉCNICA	UNIDAD DE MEDIDA	LÍMITE DE DETECCIÓN
pH	Estándar métodos Edición No. 21 4500 -H	Electrométrica	pH	/
Sólidos Totales	Estándar métodos Edición No. 21 2540 -B	Gravimétrica	mg/L	15
Cloruros	Estándar métodos Edición No. 21 4500 Cl-B	Titulo métrica	mg Cl^-/L	/
Sulfatos	Estándar métodos Edición No. 17 4500 SO_4-C	Gravimétrica	/	/
Fósforo Total	Estándar métodos Edición No. 21 4500 P - D	Colorimétrica	mg P-PO_4/L	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)	Estándar métodos Edición No. 21 5210 –B ASTM D888-05	Luminiscencia	mg O_2/L	2
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Estándar métodos Edición No. 21 5220 –D	Colorim. Ref. Cerrado.	mg O_2/L	80
Grasas y Aceites	Estándar métodos Edición No. 21 5520 –A	Gravimetría	mg /L	5

En base a la información de campo disponible se seleccionaron los parámetros más importantes (según las normativas aplicadas) durante el período Noviembre del 2010 y Diciembre del 2012 (la información se depuro con el fin de trabajar con material comparativo), de manera tal que permitiera realizar una evaluación del TTL y la

[2] IDEAM; Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

correspondiente comparación con las tecnologías complementarias y alternativas evaluadas. La Tabla 2.2 indica los parámetros y las fechas de muestreo que fueron considerados para el presente estudio. En el Anexo 3 se muestra el detalle de todos los datos originales.

Tabla 2.2. Cronograma del monitoreo al Tren de Tratamiento de Lixiviados

Parámetro	2010	2011						2012
	Nov	Feb	Mar	Jun	Ago	Sep	Nov	Mar
DQO	X	X	X	X	X	X	X	X
DBO_5	X	X	X	X	X	X		
Nitrógeno Total (N)	X	X	X	X	X			
Sólidos Suspendidos Totales	X	X	X	X	X	X	X	
Fósforo Total (P)	X	X	X	X	X	X	X	
Grasas y Aceites	X	X	X	X	X			
Sulfatos (SO_4^{-2})	X	X	X					
pH	X	X	X	X	X	X	X	X

Las muestras analizadas correspondientes a las pruebas piloto de los procesos 2, 3 y 4, fueron tomadas entre Noviembre y Diciembre del año 2011 y los parámetros seleccionados para la evaluación fueron cloruros, DBO_5, DQO, fósforo total, sulfatos, sólidos totales y pH.

2.2.2 Otros Datos

Para el presente estudio se consideró información adicional suministrada por la empresa EMAS S.A ESP, como el Manual Operativo de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Antanas (Hernández, 2011), el estudio realizado para adquirir el permiso de vertimientos y la Evaluación de Impacto Ambiental realizada a la zona de bioremediación del relleno sanitario (EMAS, 2010).

2.3. ANÁLISIS MULTICRITERIO

La evaluación comparativa de las tecnologías se realizó a través de la metodología de análisis multicriterio. Para este análisis además de las tecnologías que fueron estudiadas en las pruebas piloto (humedales y sistemas de membranas) se evaluaría el sistema de evaporación como una alternativa para el tratamiento de los lixiviados del RSA.

A continuación se describen las dimensiones que se seleccionaron y como fueron definidos cada uno de los criterios que componen cada dimensión.

2.3.1 Selección de Dimensiones

La selección de las dimensiones se realizó teniendo en cuenta que no sólo se busca seleccionar una tecnología que resulte viable económicamente, sino que también permita evaluar el impacto social y ambiental que genera dicha tecnología, las implicaciones político/institucionales para su implementación y funcionamiento, y las ventajas y desventajas técnicas en su aplicación.

- Dimensión ambiental: La tecnología que brinde mayor eficiencia en sus procesos de remoción de contaminantes contribuye directamente a disminuir el impacto que los rellenos sanitarios causan al medio ambiente y a las comunidades; se debe tener presente no sólo el uso de suelos cuando se seleccionan los tratamientos, sino también la preservación de la calidad del agua y el aire.

- Dimensión social: Una tecnología adecuada para el tratamiento de lixiviados, debe asegurar la disminución de impactos negativos a la comunidad, debe promover el uso de mano de obra, la capacitación del recurso humano, la capacidad de ser incorporada o aceptada por la población.

- Dimensión técnico/económica: El mejoramiento de los procesos en el tratamiento de los lixiviados debe estar sustentado en una técnica que sea viable económicamente, asegurando eficiencia de la tecnología, recursos técnicos y humanos para implementarla, capacidad de inversión y de mantenimiento; que sea mantenida a través del tiempo, y su desarrollo esté ligado a las necesidades y condiciones del sitio de instalación.

- Dimensión político/institucional: La tecnología aplicada para la remoción de contaminantes del lixiviado debe contar con la aceptación social, debe cumplir con la normativa ambiental y relacionarse con políticas y estrategias existentes, lo que permitirá un adecuado marco para su implementación y desarrollo.

2.3.2 Criterios de Evaluación

Los criterios definidos para cada dimensión fueron tomados de Santalla y Córdoba (2012) y adecuados para el presente estudio.

En la dimensión técnico – económica se evaluó:

- la complejidad de la tecnología
- el grado de aceptación de la tecnología
- la capacidad de implementación de la tecnología
- el desarrollo local de tecnología
- el uso de la tierra que compromete la tecnología
- los costos específicos que genera la tecnología

En la dimensión social:

- La cantidad de empleo que genera la tecnología
- La calidad del empleo que genera la tecnología
- La afectación de la tecnología en la salud de la comunidad

En la dimensión ambiental:

- La contribución de la tecnología al mitigar los gases de efecto invernadero
- La implicación de la tecnología en la calidad del aire del ambiente
- La implicación de la tecnología en la calidad de agua
- La implicación de la tecnología en el consumo de energía fósil

En la dimensión político/institucional:

- la aceptación que tiene la tecnología en el ámbito social
- el marco regulatorio que involucra el desarrollo e implementación de la tecnología
- el cumplimiento de la norma ambiental
- la compatibilidad de la tecnología con programas existentes

2.3.3 Ponderación de Criterios y Dimensiones

Para la valoración y normalización de cada dimensión se aplicó la siguiente escala de 0 a100, donde:

100	Bueno
50	Regular
0	Malo

2.3.4 Cálculo de la Matriz Multicriterio

Para la valoración y normalización de cada dimensión se aplicó la siguiente fórmula (Santalla y Córdoba, 2012):

$$Valor\ \dim ensión = \frac{\sum_{criterio} valorcriterio}{cantidaddecriterios}$$

2.3.5 Selección de Actores para la Evaluación Multicriterial

Los actores que evaluaron las tecnologías a través del análisis multicriterio fueron seleccionados por su pertenencia a los diferentes sectores relacionados con las dimensiones evaluadas y teniendo en cuenta su vinculación con la problemática ambiental de los rellenos sanitarios en el marco de la normativa existente en Colombia en la actualidad.

Participaron:

- Actor Político (AP).
- Actor Institucional (AI).
- Actor Educativo (AE)
- Actor Técnico-Económico (ATE).

CAPITULO III

3. RESULTADOS

En esta sección se realiza el análisis del monitoreo de los parámetros del TTL en el relleno sanitario Antanas, en relación con el cumplimiento de la normativa ambiental; anterior (decreto 1594/84) y actual (decreto 3930/10) identificando la capacidad de los procesos para remover los parámetros regulados y los aspectos del proceso que requieren ser mejorados para alcanzar los niveles de vertimiento permitidos.

Además, se analizan los resultados obtenidos en las pruebas piloto con la tecnología alternativa VSEP (proceso 3), VSEP + Osmosis Inversa (proceso 4) y complementaria TTL + Humedales (proceso 2) y finalmente se presenta la evaluación multicriterio de las diferentes opciones de tratamiento de lixiviados evaluadas para el relleno sanitario Antanas.

3.1 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

Los puntos de muestreo del TTL donde se midieron los parámetros DQO, DBO_5, sólidos totales, fósforo total, nitrógeno total, sulfatos, pH y grasas y aceites, se muestran como tal en la Figura 2.1. Entre los punto 1 y 2 se encuentra únicamente el reactor UASB mientras que entre los puntos 2 y 3 actúan básicamente; la laguna de igualación, la laguna aerobia facultativa, el reactor de lodos activados, la planta físico-química, el reactor sulfidogénico y la laguna de maduración. Los lixiviados del vaso I por sus características poco biodegradables se adicionan en la planta físico-química. (detalle de las fechas y datos tomados para el presente estudio se encuentran en el Anexo 2).

3.1.1 Demanda Química de Oxígeno - DQO

Es la cantidad de oxígeno consumido por las materias existentes en el agua y oxidables en condiciones operatorias definidas. La medida de la DQO corresponde a una estimación de la materia oxidable presente en el agua, cualquiera que sea su origen orgánico o mineral. La DQO se encuentra en el rango de 3.000 – 60.000 mg/L, de acuerdo a los antecedentes bibliográficos (Emenike, et al. 2012; Tchobanoglous, et al. 1994). aunque la concentración de este parámetro es muy variable, ya que depende del grado de dilución que aporta la pluviosidad.

La Figura 3.1 muestra la variación de la DQO durante el periodo de monitoreo en los 3 puntos del TTL y su relación con la normativa 3930 de 2010, que establece **400 mgO_2/L** el valor máximo permisible en un lixiviado que será vertido en aguas continentales superficiales. Como se puede observarse, sólo en el último monitoreo de Marzo de 2012 se logró alcanzar un valor que cumpliera la normativa (337 mg/L). En el primer monitoreo (Nov 2010) el lixiviado crudo del punto 1 del TTL tenía una DQO de 21.505 mg/L que al finalizar el proceso en la laguna de maduración (punto 3) descendió a 785 mg/L sin alcanzar el cumplimiento de la normativa actual a pesar de haber logrado una remoción del 96%. Si se considera el promedio de DQO del afluente durante el año 2011 (26.060 mg/L en el punto 1) y su equivalente en el punto 3 (742 mg/L) se logra una remoción del 97% pero sin alcanzar el límite máximo de descarga permitido. La medición del año 2012 presenta una remoción de casi 99% y recién en este caso la DQO del efluente de la laguna de maduración se encuentra por debajo del valor límite permitido. De mantenerse estas condiciones debería alcanzarse el grado de remoción de materia orgánica que asegure el cumplimiento de la nueva normativa ambiental aunque es indispensable continuar con los monitoreos con la mayor frecuencia que sea posible, con la finalidad de detectar desvíos pronunciados que se alejen del valor límite establecido.

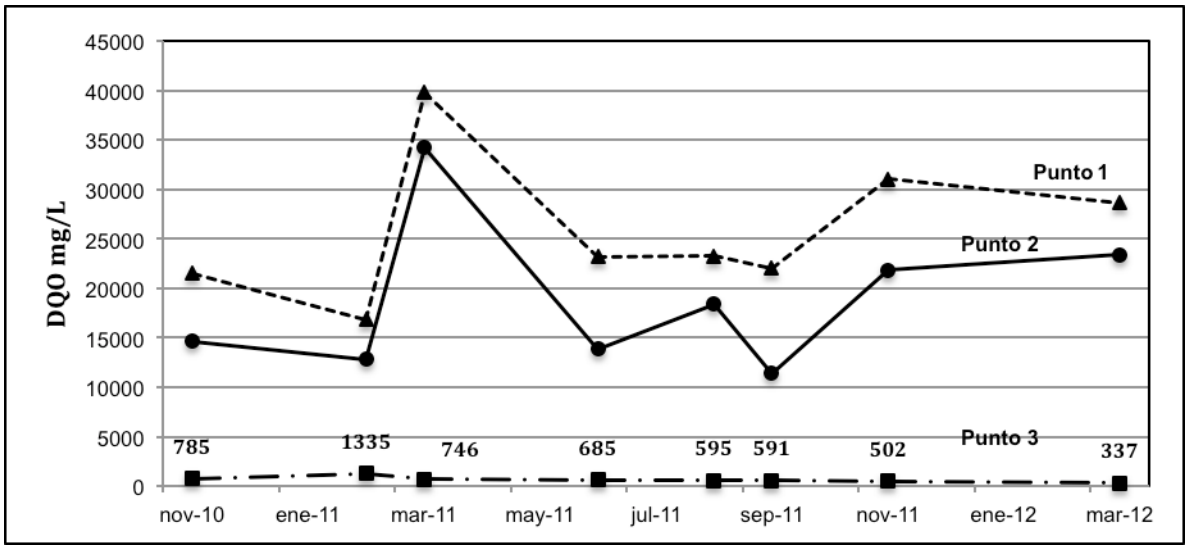


Figura 3.1.Variación de DQO en el TTL

En el mes de Marzo de 2011 se observa un pico que indica un aumento en la concentración de DQO con un valor de 39.845 mg/L en el punto 1, más de 10.000 unidades por encima del rango observado, aunque al final del proceso logra disminuir hasta 746 mg/L en el punto 3 lo que evidencia que el TTL tiene capacidad para remover materia orgánica aún en situaciones donde incrementos en la pluviosidad pueden afectar el funcionamiento de la planta. De todas maneras es importante establecer un procedimiento de monitoreo lo más periódico posible con la finalidad de detectar desvíos del proceso en relación a este parámetro ya que durante el período monitoreado se ha registrado sólo un valor que cumple la nueva normativa vigente.

3.1.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno - DBO

Este parámetro determina los requerimientos relativos de oxígeno de aguas residuales, efluentes y aguas contaminadas para su degradación biológica. Expresa el grado de contaminación de un agua residual por materia orgánica degradable por oxidación biológica. La DBO_5 se encuentra en el rango de 2.000 – 30.000 mg/L (Emenike, et al. 2012; Tchobanoglous, et al. 1994), aunque las concentraciones de los parámetros son muy variables, ya que dependen del grado de dilución que aporta la pluviosidad.

En la Figura 3.2 se observa la variación de la DBO_5 desde el efluente del punto 1 hasta el efluente del punto 3. La normativa ambiental establece para este parámetro un valor máximo permisible de **200 mg/L**. Los valores obtenidos durante el muestreo reflejan que el TTL logró remover de forma eficiente la DBO_5 con valores que cumplen con la normativa ambiental, obteniendo; en el punto 3 un valor de 171 mg/L en 2010, 155 mg/L en promedio para los valores del año 2011 y 35 mg/L para el 2012. Los valores más altos registrados en el punto 1 fueron 25.250 mg/L y 21.000 mg/L en Marzo de 2011 y 2012 respectivamente (para la DQO también se observó un incremento del valor promedio en Marzo de 2011), y de 113 y 35 mg/L en el punto 3. Estos últimos valores correspondientes al punto de descarga del efluente se encuentran por debajo del valor límite y confirman que el TTL resulta eficiente para la remoción de la materia orgánica biodegradable. El dato más alto registrado en el punto3 se observa en el mes de Febrero de 2011 con un valor de 390 mg/L; para esta fecha la DBO_5 de ingreso al TTL fue 12.267 mg/L, valor que se encuentra dentro del rango característico para la DBO_5 del lixiviado del RSA. Según información suministrada por EMAS S.A ESP, durante este período se realizaron ajustes en el reactor sulfidogénico, lo que explica la mejora en la capacidad de remoción de materia orgánica biodegradable ya que son las bacterias sulfatoreductoras las que por su acción en un ambiente anaeróbico facilitan la degradación de los ácidos grasos a acetato.

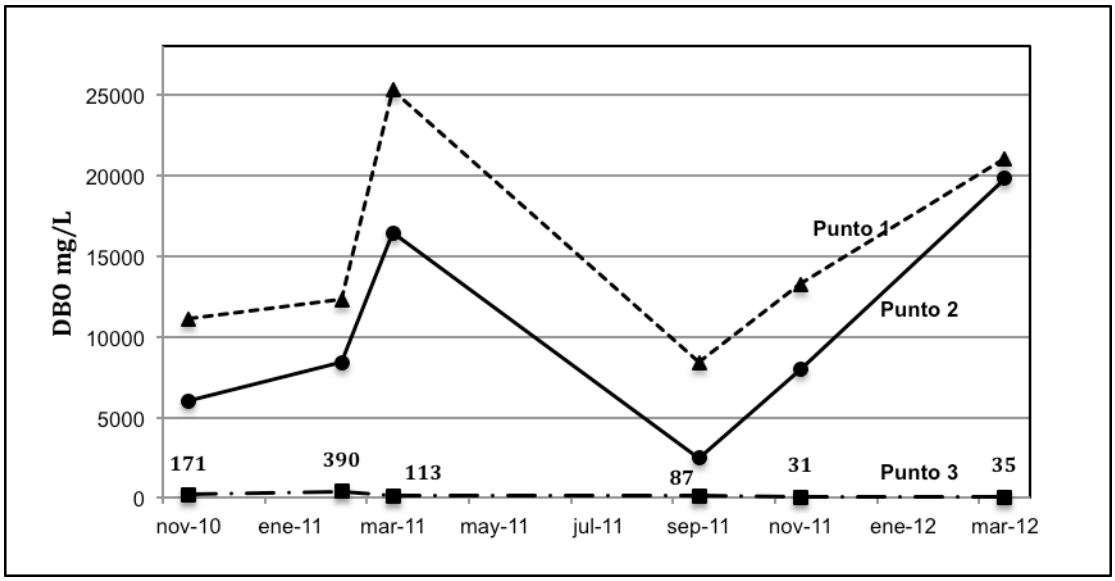


Figura 3.2. Variación de DBO_5 en el TTL

3.1.3 Nitrógeno Total - N

Este parámetro refleja la cantidad total de nitrógeno presente en el lixiviado, suma del nitrógeno orgánico en sus diversas formas y el ión amonio. Este parámetro mide el nitrógeno total capaz de ser nitrificado a nitritos y nitratos. El Nitrógeno Kjeldhal en los lixiviados se encuentra alrededor de 2.000 mg/L (Emenike, et al. 2012; Tchobanoglous, et al. 1994).

En la Figura 3.3 se registran los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas al TTL para detectar la cantidad de nitrógeno total desde el efluente del punto 1 hasta el efluente del punto 3, y observar la eficiencia del proceso en relación al cumplimiento de la nueva normativa ambiental, que estipula en **20 mg/L** de nitrógeno como máximo permisible. Los valores del monitoreo se encuentran en promedio en 200 mg/L en el año 2011 disminuyendo a 56 mg/L en el año 2012. La Figura 3.3 muestra oscilaciones del proceso de remoción de nitrógeno a lo largo del TTL; la eficiencia de remoción se incremento desde 84% en Feb de 2011, a 90% en Septiembre 2011 y 99% en Noviembre 2011 descendiendo a 96% en Marzo 2012. Si bien estos niveles indican buena capacidad del TTL para remover nitrógeno, no resulta suficiente en el marco de la nueva normativa vigente. El valor más elevado de nitrógeno medido en el punto 1 en noviembre de 2011 (2247 mg/L) se corresponde con el valor más bajo medido en el punto 3 (22 mg/L) indicando la máxima eficiencia de remoción del 99%. Entre los puntos 1 y 2 del proceso la eficiencia en la remoción de nitrógeno resultó sensiblemente baja (inferior al 6%, excepto en Feb de 2011 que alcanzó 53%) mientras que entre los puntos 2 y 3 aumentó sensiblemente alcanzando un promedio de 87% de remoción.

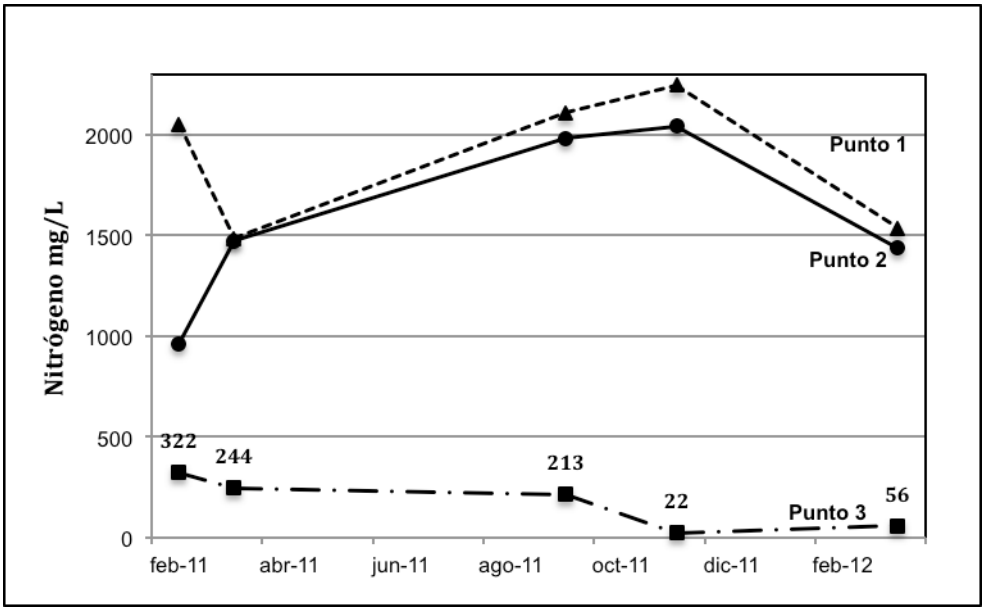


Figura 3.3. Variación de Nitrógeno en el TTL

Según Droppelmann, et al. (2009), la remoción del nitrógeno se da más efectivamente en procesos biológicos aeróbicos, donde se nitrifica el nitrógeno amoniacal. Dentro del TTL, es en la laguna aerobia facultativa y en el reactor de lodos activados (puntos 5 y 6 de la Figura 1.1) donde se espera obtener la mayor

remoción de nitrógeno. Esto coincide con las eficiencias medidas (promedio alcanzado de 87%) aunque este valor no resulta suficiente en el marco de la actual normativa vigente lo cual requiere una revisión del proceso para mejorar los niveles de remoción ya sea entre los puntos 1 y 2, aunque en este caso el reactor UASB está en funcionamiento anaeróbico y la remoción de nitrógeno estaría limitada o bien mejorar la capacidad del proceso entre los puntos 2 y 3 con la finalidad de incrementar la eficiencia, principalmente en la laguna aerobia facultativa.

3.1.4 Sólidos Suspendidos Totales - SST

Este parámetro representa la cantidad de material (sólidos) que es retenido después de realizar la filtración de un volumen de agua. Es importante como indicador puesto que su presencia disminuye el paso de luz a través del agua evitando su actividad fotosintética en las corrientes, lo que es importante para la producción de oxígeno. Los SST en los lixiviados se encuentra en el rango de 500 – 1.000 mg/L (Emenike, et al. 2012; Tchobanoglous, et al. 1994).

La Figura 3.4 muestra los valores obtenidos en las pruebas de laboratorio realizadas al TTL para detectar la remoción de los SST y comparar si dichos valores cumplen con el decreto 3930/10 que establece como valor máximo de remoción **200 mg/L**. Los datos obtenidos en el monitoreo muestran un proceso irregular entre Noviembre de 2010 y Junio del 2011, con valores muy variables; el mes de noviembre/2010 la remoción entre el punto 1 y 3 alcanza el 81% con valores de entrada de 20236 y 3844 mg/L, en febrero y marzo de 2011 se alcanza un 80 y 86% de remoción. Entre el mes de junio y noviembre de 2011 se observa una disminución en la eficiencia del TTL con porcentajes de 69, 71, 78%. Continuando en marzo de 2012 donde se obtuvo un 70% de remoción, con 6072 mg/l en el efluente p3. En los meses de marzo y junio de 2011 se observa una falla en los valores obtenidos en los efluentes del punto 1 y 2, al encontrarse valores superiores después del tratamiento del reactor UASB (se asume falla en la toma de muestra o análisis de la misma). Como se puede observar la remoción del TTL con respecto al parámetro SST no esta resultando eficiente, los valores obtenidos en 2011 y 2012 no alcanzan a llegar al 80% que exige el decreto 1594 de 1984 y por consiguiente tampoco se cumple con la nueva normativa.

Analizando la remoción de SST en los puntos 1, 2 y 3 del TTL se observa que entre los puntos 1 y 2 la eficiencia de remoción de sólidos es sensiblemente baja (28% en promedio, sin considerar los valores que presentan fallas). Entre los puntos 2 y 3 la remoción alcanza el 70% obteniendo un promedio general para el período monitoreado de 76%, valor que de todas maneras no resulta suficiente para remover los SST ya que los valores de este parámetro en el efluente resultan hasta 30 veces superiores a lo permitido. La mayor remoción de SST es de esperar ocurra en el reactor de lodos activados y en la planta físico-química, en esta parte del proceso se permite el paso del lixiviado del vaso I (lixiviado maduro). Un análisis más exhaustivo

sobre estas dos etapas del TTL será necesario realizar con la finalidad de identificar el funcionamiento del reactor de lodos, la eficiencia de los coagulantes/floculantes utilizados, la capacidad del sistema en relación a los tiempos de retención y los caudales de efluente utilizados en estas etapas parciales del TTL.

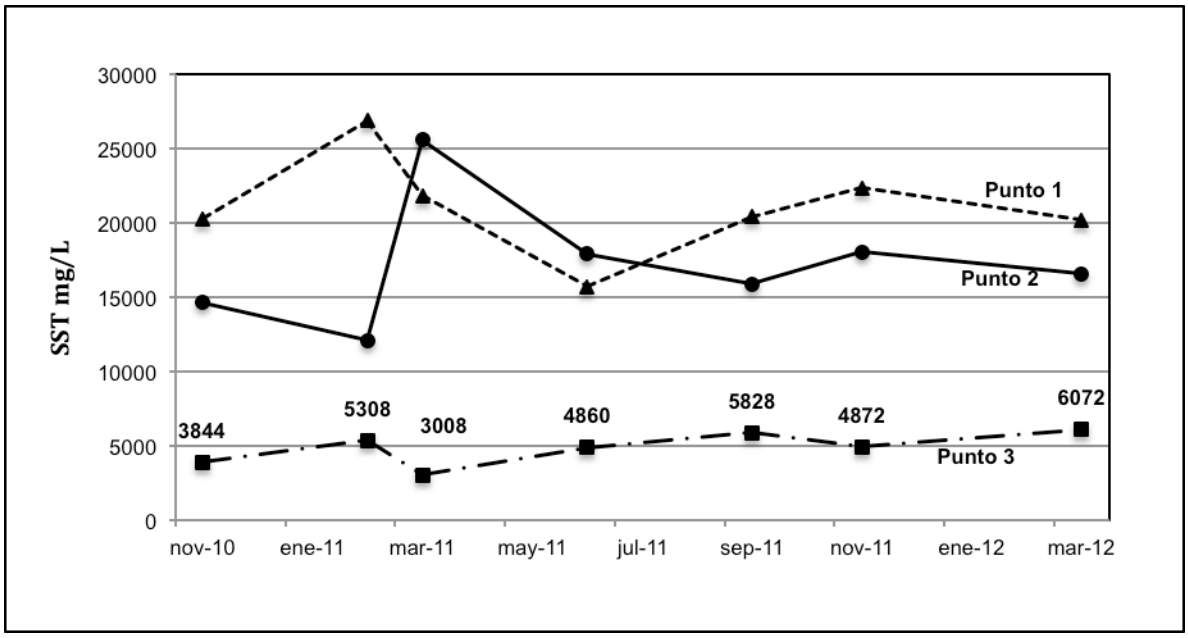


Figura 3.4. Variación de Sólidos Suspendidos Totales en el TTL

3.1.5 Fósforo Total – (P)

El fósforo se encuentra en las aguas naturales y en las aguas servidas casi exclusivamente en forma de fosfatos. Los fosfatos se clasifican a su vez en: ortofosfatos, fosfatos condesados y fosfatos orgánicamente ligados. El fósforo total en los lixiviados se encuentra en el rango de 25 - 70 mg/L (Emenike, et al. 2012; Tchobanoglous, et al. 1994).

En la Figura 3.5 se observa el comportamiento del fósforo total entre el punto 1 y el punto 3 del TTL. Los resultados indican que el proceso actual no logra alcanzar el valor límite establecido por la normativa vigente de **5 mg/L** de fósforo total. La remoción de fósforo entre los puntos 1 y 2, es decir en el reactor UASB resulta altamente irregular, encontrándose en los meses de Febrero y Septiembre de 2011 y Marzo de 2012, valores de remoción negativos (-6,32; -20,75 y -4,33%, respectivamente), la remoción de los meses de Noviembre/2010 con 24%, Marzo, Junio y Noviembre de 2011 con 35, 50 y 42% respectivamente, no son satisfactorias para el proceso que se realiza en el reactor UASB. Según Morillo et al. (2005), la remoción de fósforo en un sistema UASB requiere un mayor control al presentar inconvenientes por acumulación o falta de aprovechamiento en la alimentación, o por la alta variabilidad que presenta el afluente con respecto a las relaciones C:N:P.

Entre los puntos 2 y 3 donde actúan la laguna aerobia facultativa y el reactor sulfidogénico y la laguna de maduración, entre los otros sistemas. Se presenta una

remoción de 69% en el mes de Noviembre de 2010, 81% para el 2011 y 76% para el 2012, remociones que no alcanzan a cumplir con lo establecido por la nueva normativa ambiental, el mes de noviembre del 2011 con un valor de 7 mg/L de fósforo total al final del tratamiento reporto la mayor remoción con un 90%.

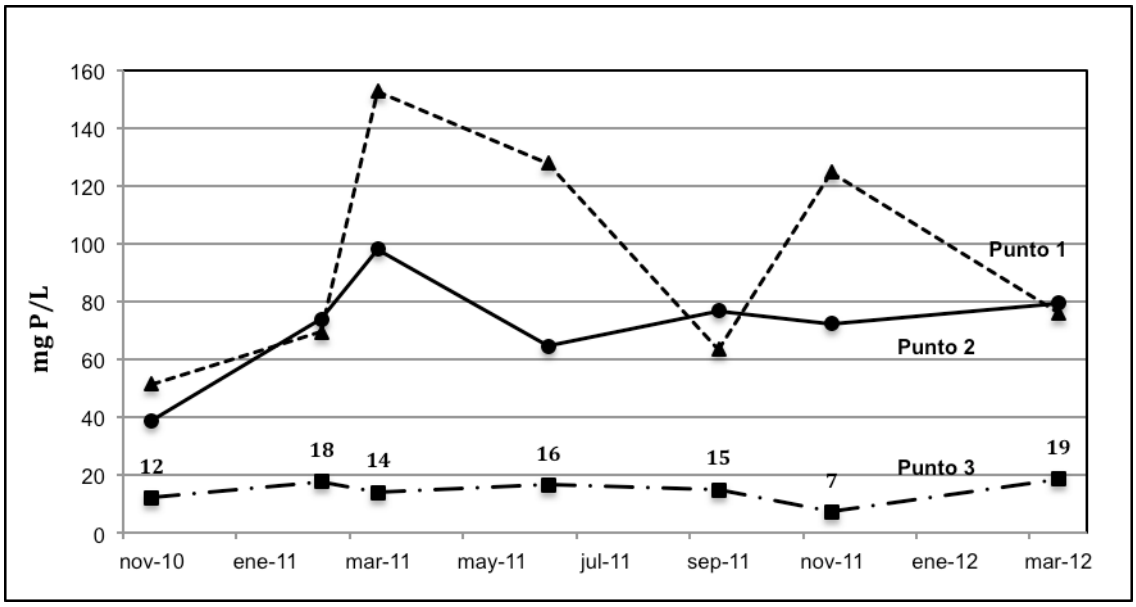


Figura 3. 5. Variación de Fósforo Total en el TT

3.1.6 Grasas y Aceites

Los lípidos son componentes biológicos que son solubles en solventes no polares y son prácticamente insolubles en agua. Las grasas animales y los aceites vegetales son cuantitativamente el tercer componente de los alimentos, y son éstos los que se encuentran más frecuentemente en los sistemas de alcantarillado. Las grasas y aceites son de los compuestos orgánicos más estables y no son fácilmente biodegradables; sin embargo los ácidos minerales las atacan dando como resultado la formación de ácidos grasos y glicerina. Las grasas y aceites en los lixiviados se encuentran en el rango de 50 - 80 mg/L (Emenike, et al. 2012; Tchobanoglous, et al. 1994).

Al comparar los valores arrojados en el monitoreo con la nueva normativa ambiental que establece como **20 mg/L** el valor máximo permisible de grasas y aceites, se encontró que el valor obtenido en el 2010 de 33 mg/L, no alcanzaría a cumplir el requerimiento, pero con el paso del tiempo, tanto en el 2011 como en el único valor obtenido para el 2012 con valores de 15 mg/L y 9 mg/L respectivamente, estaría alcanzando el cumplimiento de la normativa ambiental, como se puede observar se evidencio una disminución en los mg/L de grasas y aceites en el afluente, y un aumento en la eficiencia del TTL.

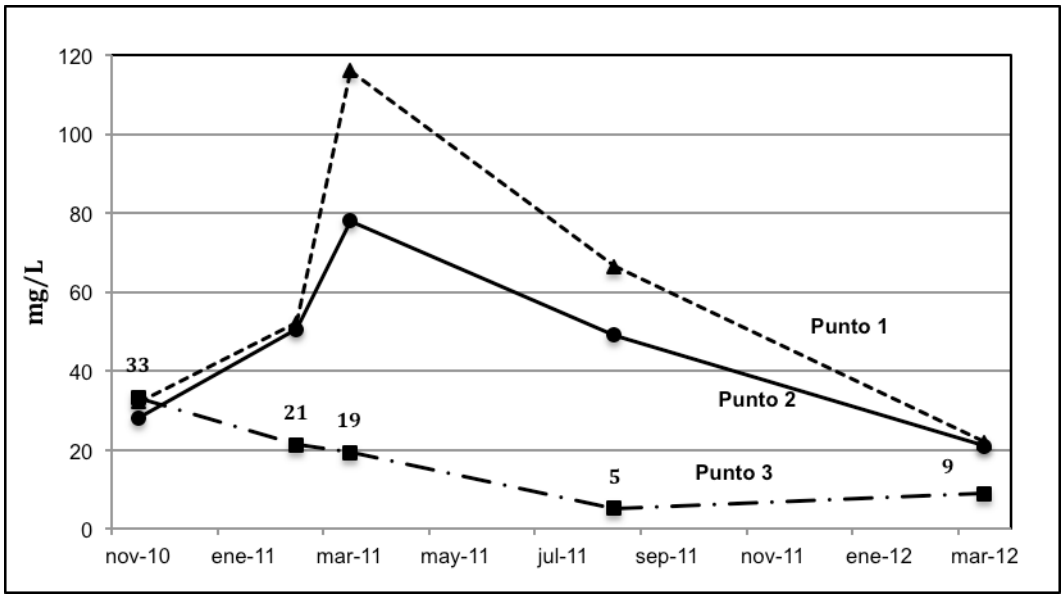


Figura 3.6. Variación de Grasas y Aceites en el TTL

El valor más alto de ingreso de grasas y aceites al TTL se registró en Marzo del 2011 con 116 mg/L, alcanzando en el punto 3 un valor de 19 mg/L. Por su parte, el menor valor registrado en el afluente fue en Marzo de 2012 con 21 mg/L reduciendo el TTL un valor de salida de grasas y aceites en el punto 3 de 9 mg/L. El proceso actual muestra incertidumbre en la remoción de grasas y aceites ya que sólo en los últimos monitoreos ha alcanzado valores por debajo del valor límite establecido. La mayor remoción de estos componentes se da entre los puntos 2 y 3 del proceso, el TTL cuenta con un reactor de lodos activos, una planta fisicoquímica, un proceso anaeróbico (reactor sulfidogénico) y finalmente la laguna de maduración, según la literatura los procesos anaerobios antecedidos por un proceso fisicoquímico resultan eficientes, aunque no se observan remoción mayor al 80%. (Aguirre et al., 2007; SEA).

3.1.7 Sulfatos – (SO_4^{-2})

El ión sulfato es uno de los principales aniones que se encuentra en aguas naturales; los distintos sulfatos tienen numerosas aplicaciones industriales y causan dos problemas asociados con el manejo y tratamiento de aguas residuales: el olor, resultante de la reducción de los sulfatos a sulfuro de hidrógeno en condiciones anaerobias y problemas de corrosión de cañerías. Los sulfatos en los lixiviados se encuentran en el rango de 600 – 1.500 mg/L (Emenike, et al. 2012; Tchobanoglous, et al. 1994).

Se puede asumir que el TTL es eficiente para la remoción de los sulfatos, ya que según la figura 3.7 se alcanza un valor de descarga de 70 mg/L en el 2010 y un promedio de 82 mg/L para el 2011, valores inferiores a los **300 mg/L** establecido por la nueva normativa ambiental como máximo permisible para lixiviados que se viertan en cuerpos de aguas continentales superficiales.

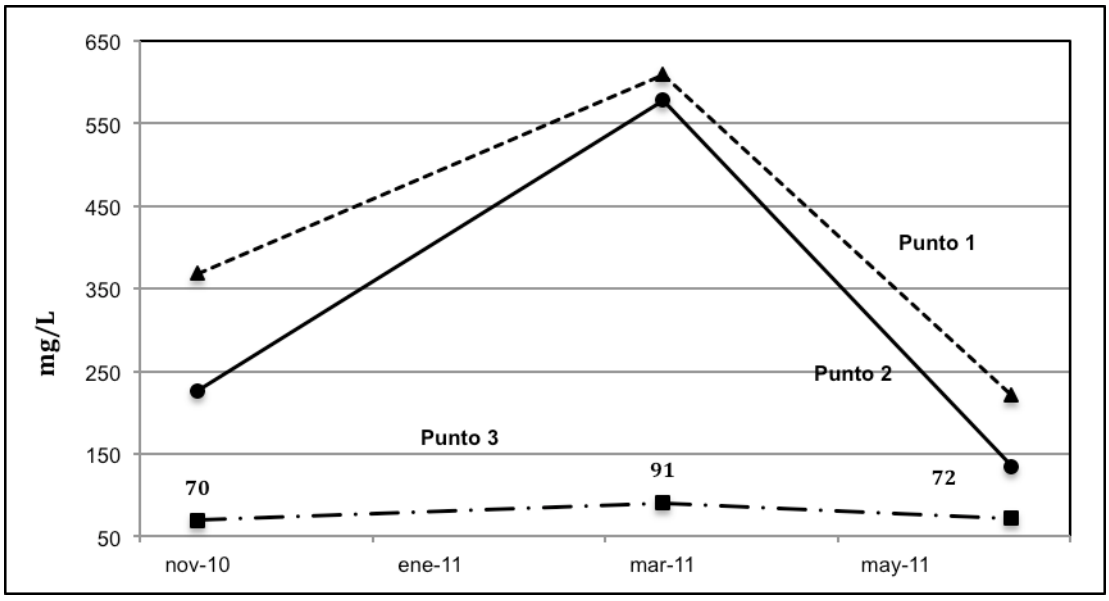


Figura 3.7. Variación de Sulfatos en el TTL

En el reactor sulfidogénico la materia orgánica es removida por bacterias sulfatoreductoras en un ambiente anaeróbico y se busca la máxima reducción del sulfato, por eso es coherente que entre los puntos 2 y 3 se realice la mayor remoción de sulfatos, con valores de 69% para Noviembre de 2010, 84 y 46% para Marzo y Junio del 2011, contra valores de 38, 5 y 39% en la remoción de los puntos 1 y 2 de los mismos meses referenciados.

3.1.8 pH

El pH es un parámetro que mide la acidez o alcalinidad de una solución. En los lixiviados el rango se encuentra entre 5 – 7 (Emenike, et al. 2012; Tchobanoglous, et al. 1994).

La Figura 3.8 muestra la variación de pH a lo largo del proceso del TTL durante el periodo monitoreado. Como puede observarse, el valor de pH a la salida del TTL está levemente por encima del valor establecido por la nueva normativa ambiental (máximo valor 8), según los valores obtenidos el más bajo se reporta en el 2010 con 8.0 y en promedio en el 2011 y 2012 un valor de 8,2. Según Hernández, (2011), el pH es un parámetro a monitorear diariamente por su importancia, ya que determina el grado de inhibición que pueden tener los grupos bacteriales sulfurosos, den el reactor sulfidogenido (punto 8 de la Fig.1.1). El pH óptimo se encuentra en el rango 7,8 - 8,2 para el buen desempeño del proceso, por lo que se debe procurar mantenerlo en este rango para evitar la producción de sulfuro. El acondicionamiento de pH que se realiza en la laguna de igualación (punto 4 de la Fig. 1.1) asegura el adecuado funcionamiento tanto de la laguna aireada facultativa (punto 5 de la Fig. 1.1) como del reactor de lodos activados (punto 6 de la misma figura).

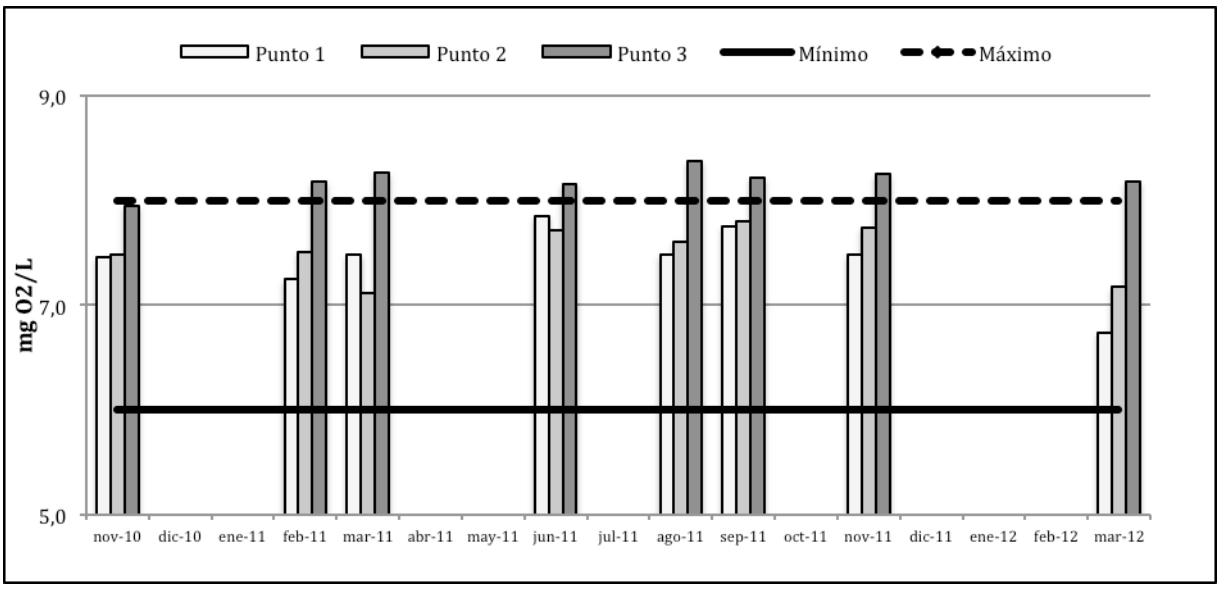


Figura 3.8. Variación de pH en el TTL

3.2 SÍNTESIS DE LA EVALUACIÓN DEL PROCESO EN TÉRMINOS DE LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

A continuación se analizan los porcentajes de remoción obtenidos en los puntos 2 y 3 del TTL y se comparan con la normativa 1594 de 1894 que regulaba el vertimiento permitido con remociones mayores al 80% para algunos parámetros.

Como se observa en la Tabla 3.1, los porcentaje de remoción de DQO durante el monitoreo del TTL son altos y mejoran con el paso del tiempo aumentando desde 96% en el año 2010 hasta el 99% en 2012. Estos valores si bien cumplen con el decreto 1594/84, que establece una remoción mínima del 80%, no cumplen con el decreto vigente 3930 del 2010 que exige un valor límite para este parámetro en 200 mg/L.

Tabla 3.1. Porcentajes de remoción promedio del TTL en el Punto 3

Parámetros	Decreto 3930/10 (mg/L)	Porcentaje de Remoción Tren de Tratamiento de Lixiviados							
		nov-10	feb-11	mar-11	jun-11	ago-11	sep-11	nov-11	mar-12
DQO	400	96	92	98	97	97	97	98	99
DBO_5	200	98	97	100	/	/	99	100	100
SST	200	81	80	86	69	/	71	78	70
Fósforo Total	5	77	75	91	87	/	77	94	76
Sulfatos	300	81	/	85	67	/	/	/	/
Grasas y Aceites	20	-4	59	83	/	92	/	/	59
Nitrógeno	20	/	84	84	/	/	90	99	96

De igual manera, la remoción de remoción de DBO_5 durante el monitoreo al TTL alcanzó valores de 98% (2010), 99% (2011) y 100% (2012) lo que indica el cumplimiento del decreto 1594/84 y también la nueva normativa decreto 3930/10, que regula para este parámetros 200 mg/L como límite máximo permisible. La eficiencia del TTL ha aumentando con el paso del tiempo y la remoción del DBO_5 alcanzó el 100% al final del monitoreo, con un valor de 35mg O_2/L en Marzo de 2012 (Tabla A.3 del Anexo 2).

La remoción del nitrógeno total alcanzó 89% en promedio para el 2011 y 96% en el 2012. A pesar del aumento de la eficiencia del TTL, esta remoción no alcanza a cumplir con el valor establecido por la nueva normativa de 20 mg/L, ya que los valores rondan en 200 mg/L (2011) y 56 mg/L (2012). El decreto 1594/84 no registraba un valor especifico o porcentaje de remoción que se deba cumplir para este parámetro.

En relación a los SST la remoción fue decayendo con el paso del tiempo, logrando valores de 81% en el 2010, 77% en promedio para 2011 y 70% en 2012, valores que no logran cumplir con ninguna de las 2 normativas, ni el decreto 1594/84 que

establece en 80% la remoción mínima, ni el decreto 3930/10 que determina un valor de 200 mg/L.

En el caso del fósforo total los porcentajes de remoción son variables, oscilan entre 77% (2010), 85% promedio en el 2011 y 76% en 2012. Estos porcentajes de remoción no alcanzan a cumplir con la nueva normativa ambiental que establece en 5 mg/L el valor máximo permisible. La norma 1594 del 84 no establece una remoción específica o valor definido para este parámetro.

Los porcentajes de remoción obtenidos para grasas y aceites durante el muestreo al TTL, donde para el año 2010 el valor resultó negativo (se asume error en la toma de muestras o los análisis de laboratorio), en 2011 alcanzó 78% y 59% en el 2012 no alcanzan a cumplir con la normativa decreto 1594/84, el cual estipulaba un porcentaje de remoción mayor a 80% para este parámetro.

Los resultados mostrados en la tabla 3.1 respecto a la remoción de los sulfatos indican valores de 81% (2010) y 76% (2011), los valores registrados para estos porcentajes de remoción están muy por debajo de los máximos establecidos por la normativa ambiental 300 mg/L para el decreto 3930 del 2010 y 400 mg/L según el 1594 de 1984.

Del análisis de parámetros monitoreados, se observa que el TTL resulta eficiente para la remoción de DBO5, grasa y aceites y sulfatos. Con respecto a DQO, nitrógeno y fósforo se requieren ajustes que permitan mejorar la eficiencia, para considerar esto se debe realizar un estudio más detallada de cada uno de los procesos que se realizan en el TTL. Con respecto a sólidos suspendidos totales, parece ser el parámetro más crítico ya que excede ampliamente el valor límite establecido; al respecto es necesario implementar acciones que permitan alcanzar el cumplimiento de la normativa vigente, focalizando la mejora del proceso en la planta fisicoquímica y el reactor de lodos activados como se manifestó en el análisis de SST.

Un análisis del proceso sobre los parámetros más críticos como son DQO, DBO_5 y SST permite identificar las operaciones unitarias que pueden ser objeto de mejoras. La Figura 3.9 muestra el incremento de la remoción de estos parámetros entre los puntos 2 y 3 del proceso. Se confirma la eficiencia el TTL en la remoción de la DBO_5 y DQO al final del proceso con remociones cercanas al 100%, es claro que la mayor remoción se da entre a la salida del punto 3, y como ya se ha mencionado esta sección cuenta con varios tratamientos biológicos y uno fisicoquímico. Hay que rescatar que el proceso realizado en el reactor UASB para el tratamiento de lixiviados es complementario, al realizar una baja remoción de estos parámetros en el caso de la DQO un 28% y para la DBO_5 38%. Estudios de aguas residuales reportan porcentajes mayores a 95% para la remoción de DQO con un reactor UASB (Arango y Sanches. 2009).

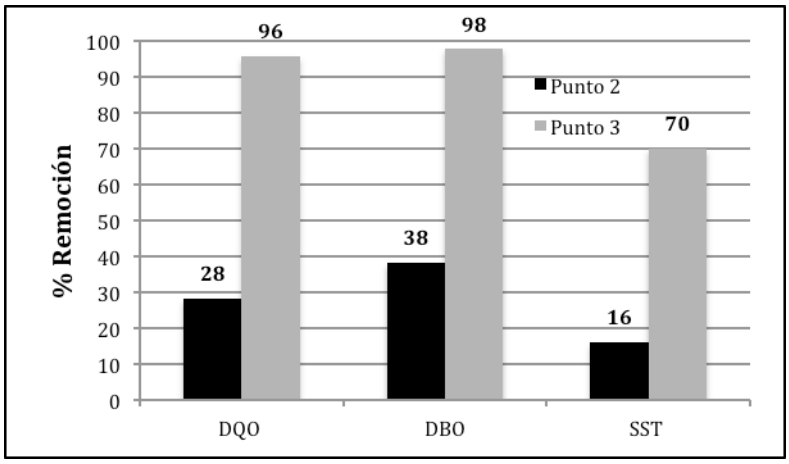


Figura 3.9. Porcentajes de Remoción de los Puntos Monitoreados

Como puede observarse, el parámetro SST es el que evidencia menores eficiencias de remoción tanto al pasar por el primer reactor de lodos activados (puntos 1 y 2) como durante los procesos aeróbicos, facultativos y anaeróbicos del segundo reactor (puntos 2 y 3). Al respecto debiera revisarse la operación de los reactores de lodos activados, la eficiencia en la remoción de materia orgánica, principalmente en términos de DQO, la capacidad operativa de los equipos en relación a los caudales de afluentes manejados y las actividades de operación y mantenimiento que pudieran afectar la eficiencia de los equipos.

3.3 INCORPORACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS

Con el fin de mejorar la remoción de contaminantes del lixiviado del RSA, se realizaron pruebas piloto utilizando diferentes tecnologías y se evaluó la eficiencia de las mismas en la remoción de los parámetros DQO, DBO_5, SST, fósforo y sulfatos.

Las tecnologías alternativas evaluadas a escala piloto corresponde a VSEP o tratamiento con membranas vibratorias y VSEP acoplada a ósmosis inversa, y la tecnología complementaria al TTL que se evaluó corresponde a humedales.

Las Figuras 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13 se representan cada uno de los procesos evaluados, el lugar de implementación en relación al TTL y los porcentajes de remoción alcanzados (en el Anexo 3 se detallan las tablas con todos los parámetros monitoreados en las pruebas piloto desarrolladas).

- Proceso 1: corresponde al TTL existente actualmente en la planta del RSA. En la Figura 3.10. se observan la concentración de los parámetros presentes en el lixiviado del vaso II entre los meses de noviembre y diciembre (meses en los cuales se llevo a cabo las pruebas piloto) y la remoción que se da en el TTL. Se puede observar que el proceso resulta muy eficiente para la remoción de DBO_5, DQO y fósforo total con más del 90%. En el caso de los SST se alcanza 78% y los sulfatos alcanzan a removerse 63%. Este tratamiento resulta efectivo para cumplir con el decreto 1594 de 1984 donde se estipula remoción mayor al 80% para DBO_5 y DQO.

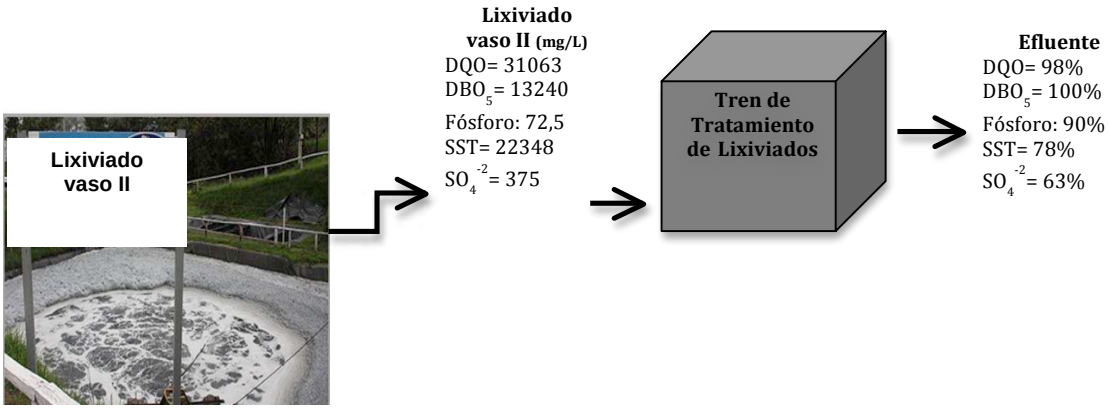


Figura 3.10. Remoción de parámetros en el proceso 1 (TTL)

- Proceso 2: la Figura 3.11 representa el proceso en el cual se deja pasar el efluente del TTL por el humedal para continuar con la remoción de los contaminantes, posteriormente se analiza el efluente y se calcula la eficiencia del proceso. Los valores obtenidos al final del proceso demuestran que este contribuye con la disminución de la concentración de contaminantes presentes en el efluente, con porcentajes de remoción de fósforo, DBO_5 y

DQO en 97, 100 y 99% respectivamente, los SST con un 82% alcanzan a superar el porcentaje que establece la antigua normativa.

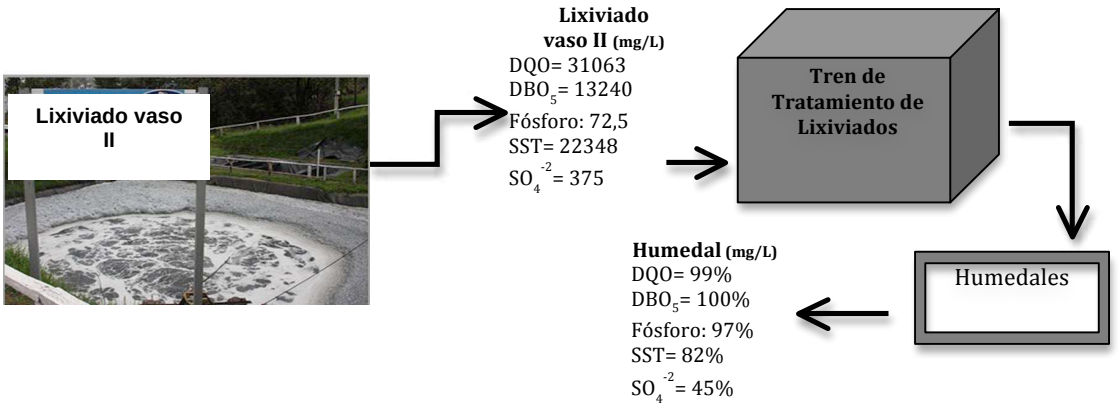


Figura 3.11. Remoción de parámetros proceso 2

- Proceso 3: la tecnología VSEP – proceso realzado de cizalla vibratorio. Este proceso fue utilizado para evaluar su eficiencia al remover los contaminantes del lixiviado del vaso II. Como se observa en la Figura 3.12 el lixiviado del vaso II es tratado por el sistema VSEP obteniéndose un permeado con menor concentración de contaminantes y un concentrado que es depositado en el vaso II para que continúe su tratamiento.

El proceso 3 remueve el DQO y el DBO5 con 95 y 96% respectivamente, altos porcentajes de remoción pero inferiores al proceso 1 (TTL), los SST se removieron un 70% y los sulfatos un 44%.

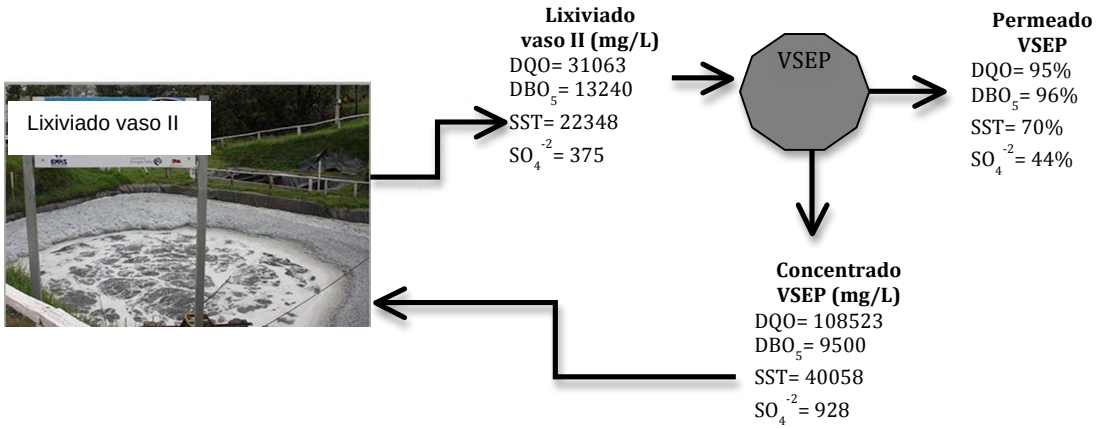


Figura 3.12. Remoción de parámetros proceso 3

- Proceso 4; VSEP OI, el efluente del tratamiento realizado en el proceso 3 utilizando la tecnología VSEP, se trata posteriormente por ósmosis inversa

para remover una mayor cantidad de contaminantes y evaluar el rendimiento del acoplamiento de estas tecnologías. Como se observa en la Figura 3.13 este acoplamiento arrojo los valores más altos de remoción de los contaminantes llegando a remover el 100% en el caso del DBO_5 y DQO, los SST un 99%, una remoción muy alta si se compara con las obtenidas en los anteriores procesos, y un 84% de los sulfatos. Estos porcentajes de remoción logran cumplir con la anterior normativa ambiental que establecía en más de 80% la remoción mínima. El fósforo al igual que el proceso 3 no fue detectado por los equipos utilizados para el análisis, lo que aduce que se encontró menos de 0,5 mg/L. Al igual que el proceso 3, el proceso 4 deja un concentrado del proceso que es depositado en el vaso II para continuar el tratamiento.

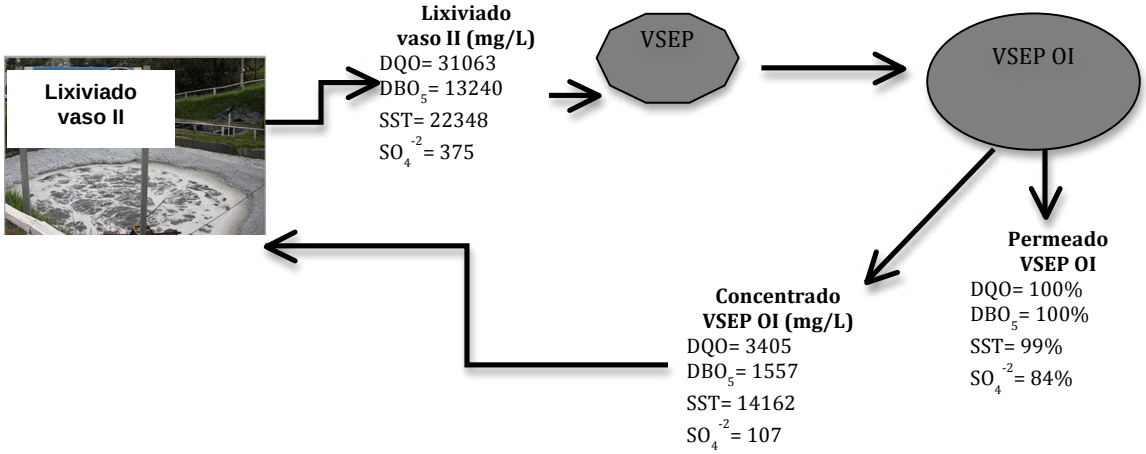


Figura 3.13. remoción de parámetros proceso 4

Es evidente que la tecnología más eficiente en la remoción de los contaminantes es el proceso 4 (VSEP OI), con concentraciones de los parámetros analizados más bajas al ser comparada con las otros procesos (1, 2 y 3), pero hay que mencionar que estas tecnologías requieren de altos costos económicos para su implementación.

3.4 EVALUACIÓN COMPARATIVA DE TECNOLOGÍAS EN EL MARCO DE LA NUEVA NORMATIVA AMBIENTAL

A continuación se analizan los valores absolutos de los parámetros monitoreados en cada uno de los procesos anteriormente detallados con la finalidad de analizar el cumplimiento de las tecnologías complementarias y alternativas con la nueva norma ambiental que estable valores límites máximos.

3.4.1 DQO

Recordando que el decreto 3930/10 establece **400 mg/L** como valor máximo permitido, en la Figura 3.14 se muestran los valores de DQO obtenidos en los cuatro procesos evaluados. El Proceso 3 (VSEP) produjo un efluente con 1563 mg/L, que a pesar de remover el 95% respecto al afluente de entrada es significativamente superior (casi 4 veces) al valor límite establecido. El Proceso 1 (TTL) si bien remueve el 98% de DQO, el efluente sale con un valor de 502 mg/L, que resulta 25% superior al valor límite establecido. El Proceso 2 (TTL + humedal) alcanzó una DQO final de 333 mg/L y finalmente las tecnologías acopladas de membranas (Proceso 4) obtuvo el menor valor de DQO de 24,6 mg/L.

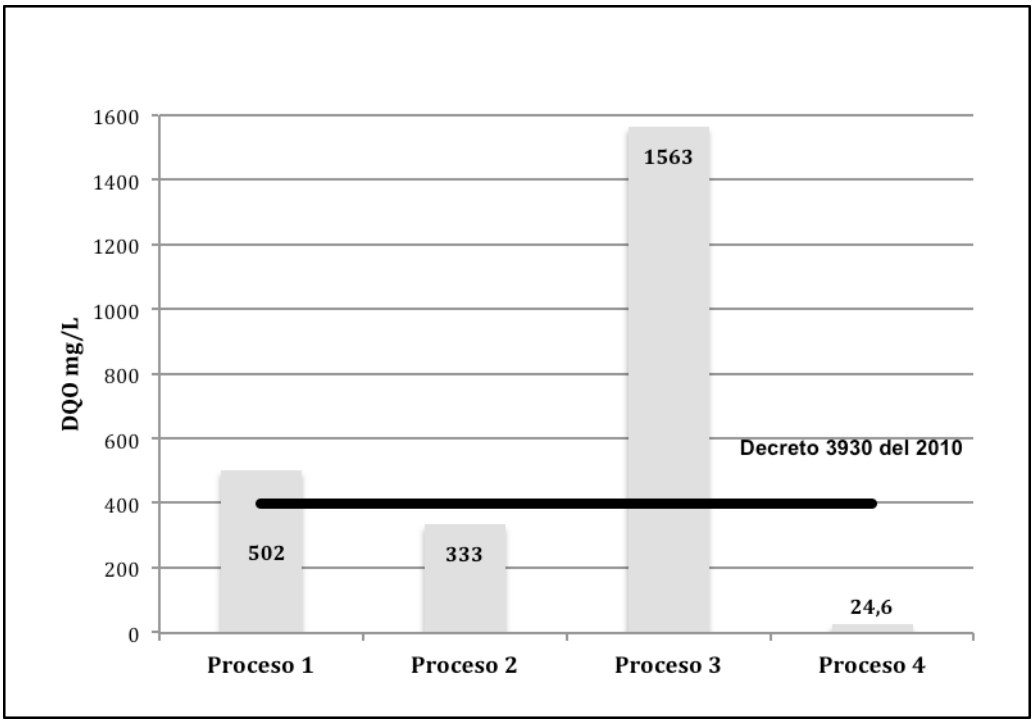


Figura 3.14. Eficiencia en la remoción de DQO de las tecnologías evaluadas.

Los resultados indican que tanto la tecnologías alternativas de membranas como el proceso convencional complementado con humedales alcanzan a cumplir con la nueva normativa vigente que establece como valor límite para la DQO de 400 mg/L.

3.4.2 DBO_5

En términos absolutos, la remoción de la DBO_5 es eficiente en los Procesos 1, 2 y 4 removiendo 100% de la materia orgánica biodegradable, obteniendo efluentes de salida con valores de 30,5; 16,7 y 11 mg/L respectivamente. La tecnología VSEP presentó el porcentaje de remoción más bajo con un valor de 557 mg/L (96%), siendo la única que no alcanza a cumplir con la actual normativa ambiental.

En la Figura 3.15 se observan los valores de DBO_5 obtenidos al final de los procesos con respecto a la nueva normativa ambiental que regula como máximo permisible para el vertimiento en cuerpos de aguas continentales superficiales un valor límite de **200 mg/L.**

El TTL actualmente aplicado en el RSA (Proceso 1) resulta eficiente en la remoción del parámetro DBO_5.

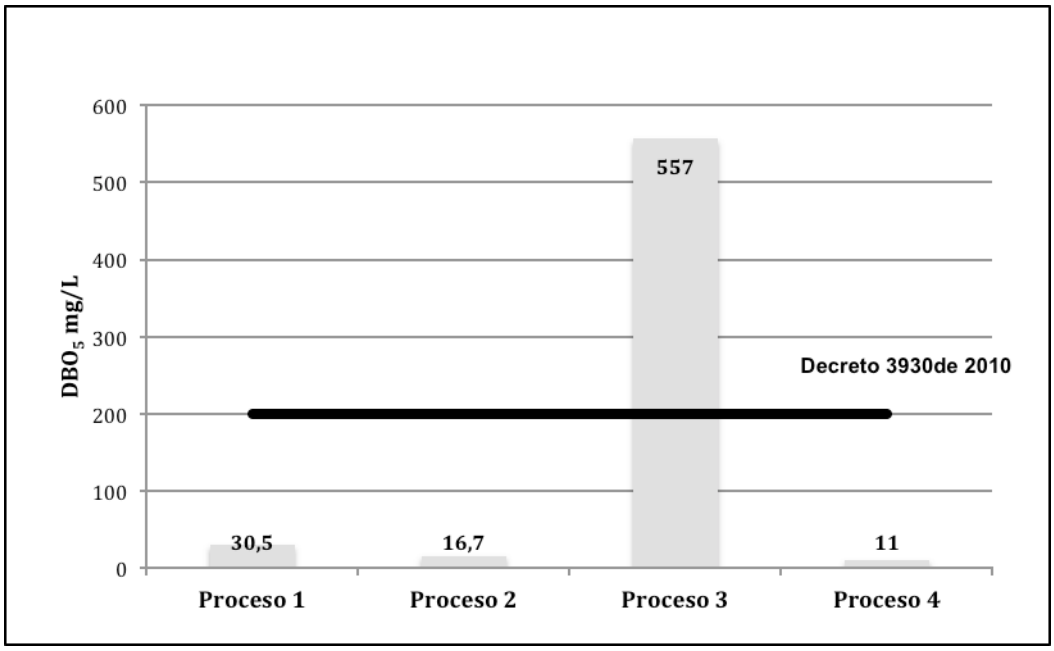


Figura 3.15. Eficiencia en la remoción de DBO_5 de las tecnologías evaluadas.

3.4.3 SST

Según el decreto 3930 del 2010 el valor máximo permisible para los sólidos suspendidos totales presentes en un lixiviado que será vertido a cuerpos de aguas continentales superficiales no debe superar los **200 mg/L**. En la Figura 3.16 se observan los valores de los efluentes al final de cada uno de los procesos para el parámetro SST, donde el lixiviado del vaso II ingresa con un valor de 22.348 mg/L. En el Proceso 1 se remueve un 78% de SST obteniendo un efluente de salida 4.872 mg/L. El efluente del Proceso 2, incrementa levemente la remoción (82%, alcanzaría la normativa anterior) a través de los humedales generando un efluente con una concentración de SST de 4.088 mg/L. que no alcanza el cumplimiento de la nueva

normativa ambiental. Lo mismo ocurre en el caso del Proceso 4, donde se logró el mayor porcentaje de remoción con un 98% pero obteniendo un valor absoluto de 240 mg/L, que resulta 20% superior al máximo permitido. El Proceso 3 no mostró ser eficiente en la remoción de sólidos removiendo sólo un 70% y generando un efluente con 6.658 mg/L de SST.

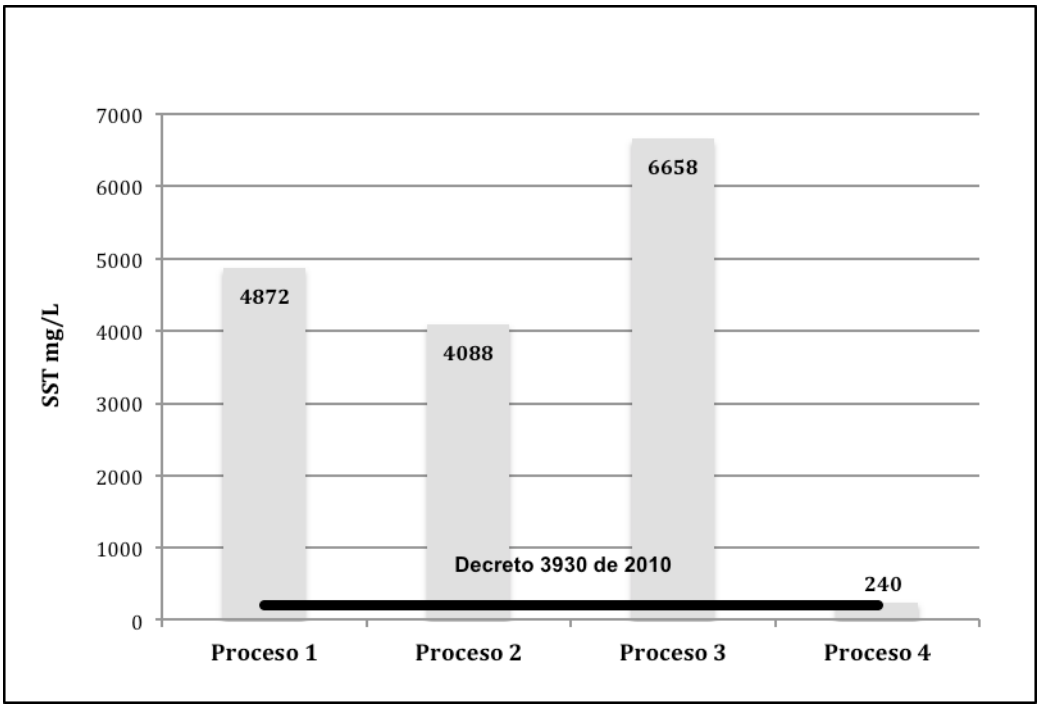


Figura 3.16. Eficiencia en la remoción de SST de las tecnologías evaluadas.

Como se observa ninguno de los procesos resulta completamente eficiente para cumplir con la normativa. Sólo el Proceso 4 resulta ser el más aproximado al cumplimiento de la norma.

Resulta evidente que la planta de tratamiento de lixiviados debe realizar un reajuste dentro de su proceso para el mejoramiento de la remoción de SST, ya que este parámetro se convierte en uno de los más difíciles de manejar en cuanto alcanzar las exigencias de la normativa ambiental se refiere.

3.4.4 Fósforo Total

Para el fósforo total (P) la normativa ambiental decreto 3930/10 establece como valor máximo permisible **5 mg/L**. El efluente del vaso II que ingresa con 72,5 mg/L de fósforo al ser tratado por cada uno de los procesos sale con los valores momstrados en la Figura 3.17. Los Procesos 3 y 4 resultaron altamente eficiente en la remoción de este parámetro ya que las concentraciones obtenidas en sus efluentes están por debajo del limite de detección del equipo. La incorporación de humedales mejora significativamente la remoción de fósforo alcanzada en el tratamiento convencional (Proceso 1) alcanzando valores por debajo del máximo establecido por la nueva normativa.

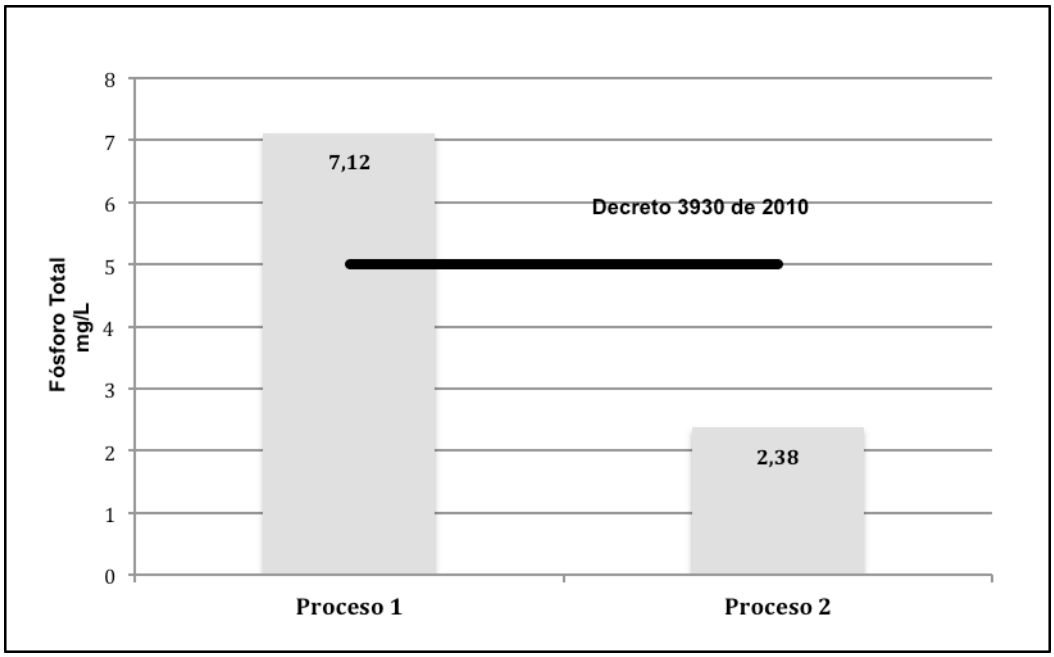


Figura 3.17. Eficiencia en la remoción de fósforo de las tecnologías evaluadas.

Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Lahora A. (2003), donde expone que los humedales son eficientes en la remoción de materia orgánica, pero se limita un poco la eliminación de nutrientes como fósforo y nitrógeno.

La eficiencia del TTL actual debe ser mejorada para alcanzar el cumplimiento de la nueva normativa ambiental, como se observa en los resultados los humedales contribuyen a mejorar las remociones de contaminantes.

3.4.5 Sulfatos

El caso de sulfatos no reviste problema respecto de las normativas evaluadas ya que como se puede observar en la Figura 3.18 la concentración de este parámetro en la entrada de los tratamientos (375 mg/L) es muy cercano al valor límite establecido por la nueva normativa (300 mg/L) y cumple con el decreto 1594/84 que establece 400 mg/L como el máximo permisible. En la remoción de sulfatos durante los procesos se observó que la mayor eficiencia se obtiene en el Proceso 4 con un valor de 59,3 (84%), seguida por el TTL con un valor de 137 mg/L (63%) y luego el Proceso 3 que registró 210 mg/L. Según Marín et al, (2007) los humedales favorecen la remoción de sulfatos.

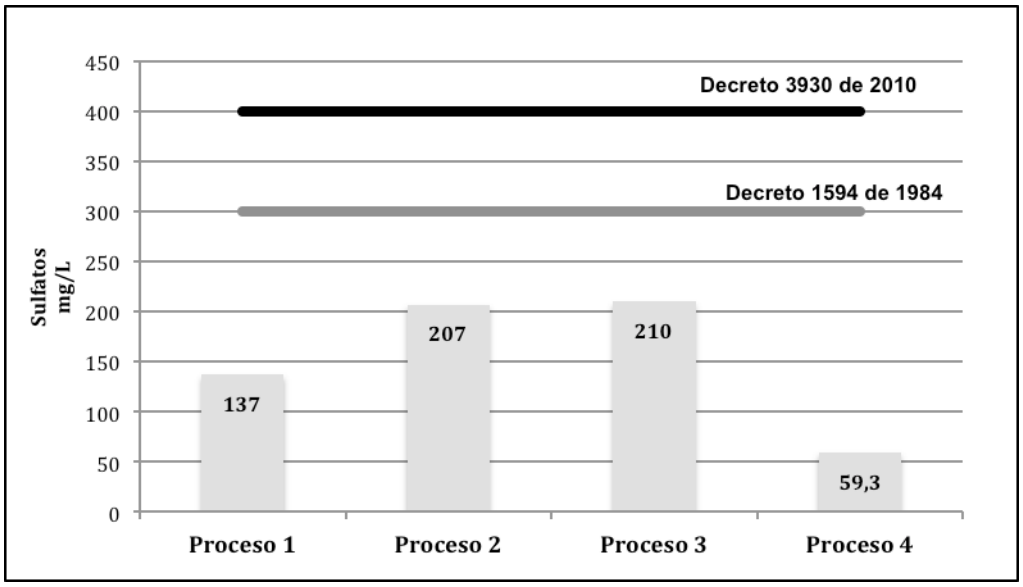


Figura 3.18. Eficiencia en la remoción de sulfatos de las tecnologías evaluadas.

3.4.6 pH

El pH debe regularse durante todo el tratamiento de los lixiviados, hasta asegurar un valor que se debe encontrar entre 6 y 8 según la nueva normativa ambiental.

Como se observa en la Figura 3.19, el Proceso 1 registra un lixiviado que se encuentra levemente por encima de este valor (8,25), al igual que los datos registrados en los procesos alternativos donde, para el Proceso 3 el efluente presento un pH 8,67 y para el Proceso 4 un valor bastante más elevado de 9,62. El Proceso 2 evidentemente favorece la regulación del pH al registrar un valor de 7,86 que se encuentra dentro del rango establecido por la normativa.

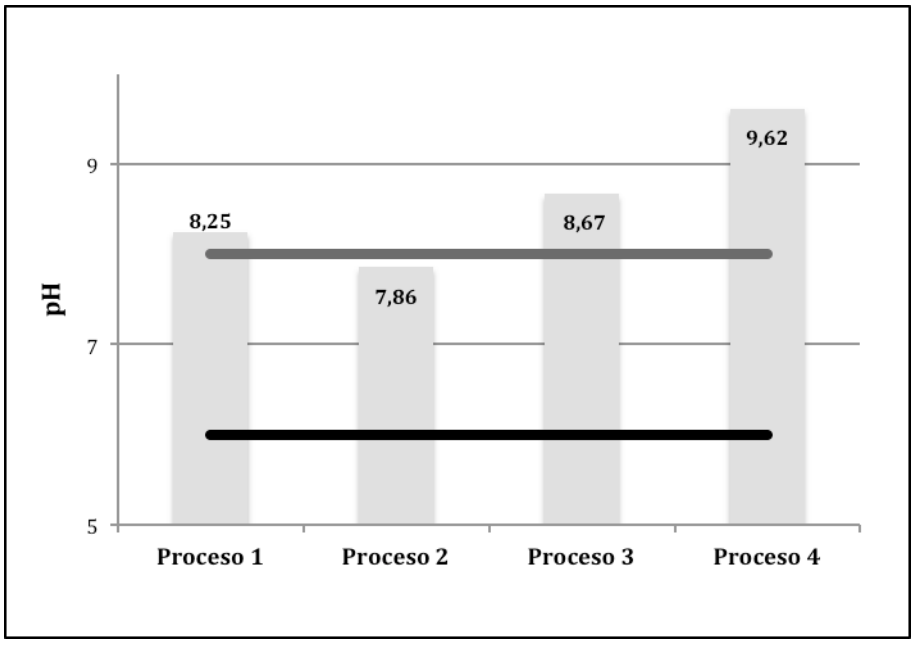


Figura 3.19. Variación de pH de las tecnologías evaluadas.

Del análisis comparativo de las eficiencias de los procesos evaluados para remover los principales componentes de los lixiviados en el marco de las normativas ambientales, tanto en el escenario anterior (decreto 1594 del 84) como con el actual (decreto 3930 de 2010), se observa que las tecnologías de membranas acopladas resultan eficientes y cumplen con la actual normativa (que es más rigurosa que la anterior) aunque no resuelven totalmente el tratamiento ya que generan concentrados con alta carga de materia orgánica que requiere un tratamiento posterior. La tecnología de membranas VSEP por sí misma no mejora significativamente la eficiencia de remoción que tiene el proceso convencional TTL. La tecnología complementaria (TTL+ Humedal) resulta beneficiosa para la remoción de los contaminantes aunque requiere algunos ajustes para alcanzar un mayor nivel de remoción de los SST.

3.5 ANÁLISIS DE LA EVALUACIÓN MULTICRITERIO

En la evaluación de las tecnologías para el mejoramiento del tratamiento que se realiza a los lixiviados del RSA se empleó el análisis multicriterial con el objetivo de captar desde distintas dimensiones y criterios ponderados, la visión de actores con posiciones e intereses diferentes alrededor del tema de los residuos sólidos. Para ello se contó con la participación de funcionarios del sector de servicios públicos con diferentes funciones y entidades de Colombia; un representante del sector político (AP), sector educativo (AE), sector técnico-económico (ATE) y un representante institucional (AI).

A continuación se realiza un análisis de los resultados obtenidos en las evaluaciones por los diferentes actores involucrados. Las fichas completas y la planilla entregada a ellos para realizar la evaluación multicriterial se encuentran en el Anexo 5. Se recuerda que los valores que se reflejan en el análisis son el resultado de aplicar la fórmula de la Sección 2.3.4 (Cálculo de la matriz multicriterio) y para facilitar la ponderación se consideraron tres valoraciones (bueno/regular/malo en una escala 100/50/0).

En la Figura 3.20 se representan con líneas de colores cada tecnología; donde cada cuadrante representa una dimensión comenzando en el eje vertical la dimensión técnico-económica y siguiendo en sentido horario la dimensión social, ambiental y político-institucional. Los números representan a modo de ejemplo, los valores obtenidos de realizar la ponderación de cada dimensión (según la fórmula de la Sección 2.3.4) para la tecnología de evaporación (línea roja) y cada punto de cada cuadrante representa el resultado de la valoración realizada por cada uno de los actores en el siguiente orden: AP, AE, AI y ATE.

Para interpretar la herramienta multicriterial aplicada se explicará a modo de ejemplo la tecnología de evaporación de lixiviados (línea roja de la Fig. 3.20). Los actores AP y ATE consideran la tecnología de evaporación entre regular y mala desde el punto de vista técnico-económico (con 33 y 42 puntos respectivamente) mientras que los actores AE y AI la consideran en el rango de aceptable (entre regular y buena con 75 y 92 puntos respectivamente). Al evaluar la dimensión social en base a los criterios considerados (cantidad y calidad de empleo, efectos sobre la salud, ver los criterios seleccionados en la Sección 2.3.2), excepto el actor AI, el resto consideró que la evaporación tiene impactos entre regulares y malos sobre la población. La dimensión ambiental reflejada en términos de la producción de GEIs, en la disminución de energía fósil y en la preservación de la calidad del aire y del agua, sólo el AI consideró favorable a la evaporación de lixiviados (valor 100); el AE la considera entre regular y buena (valor 63) pero AP y ATE la consideran altamente desfavorable (25 y 13 puntos respectivamente). La dimensión político-institucional evaluada en términos de si existe un marco regulatorio que facilite la implementación de la tecnología, o si es compatible con programas existentes o con legislación

vigente, excepto el AP que considera la evaporación ubicada en un punto regular, el resto de los actores la consideran bien posicionada respecto a esta dimensión (valores de 88, 100 y 88 por parte de AE, AI y ATE respectivamente).

Este análisis refleja cuáles son las prioridades que pondera cada sector para cada una de las dimensiones que evalúa fundamentalmente en base a la información de que dispone y de su propia experiencia.

De la misma manera, el análisis de las ponderaciones de las tecnologías de humedales (línea azul) y membranas (línea verde) muestra que en términos generales, ha resultado mejor ponderada desde casi todas las dimensiones la tecnología de membranas, valorado más favorablemente desde la dimensión técnico-económica el AI con 100 puntos, seguido por el AE con 83, mientras que el AP y ATE coinciden con 67 puntos, ponderación que resulta similar a la realizada sobre la tecnología de evaporación. En el caso de los humedales la mayor valoración la hace el AI con 67 puntos mientras que la menor (17 puntos) es realizada por ATE. Desde la dimensión social los humedales son regularmente aceptables para todos los actores.

Respecto a los humedales, casi todos los actores han considerado que esta tecnología cuenta con un marco regulatorio adecuado, que la tecnología permite cumplir con la normativa vigente y que resultan compatibles con las estrategias actuales implementadas por la administración aunque no consideran que contribuyan a mejorar aspectos ambientales o sociales.

El análisis de estos resultados depende en gran medida del tipo de información que disponen los actores, por lo que resulta fundamental ofrecer un documento de base con información adecuadamente referenciada y documentada.

La Fig. 3.20 permite identificar la evaluación realizada por los diferentes actores seleccionados. Esto es sólo un ejercicio preliminar para ver cómo puede funcionar una herramienta de este tipo y muestra la importancia de diseñar adecuadamente todo el proceso, desde la calidad de la información que se suministra a los potenciales evaluadores hasta la forma en que se construyen o plantean los criterios.

Este análisis no permite ver cómo fueron evaluados cada uno de los criterios seleccionados para evaluar las diferentes dimensiones. A tal fin, se construyeron cuatro conjuntos de figuras (una para cada dimensión) que muestran precisamente cómo fueron evaluados cada uno de los criterios, perdiendo por lo tanto en este análisis las ponderaciones que hizo cada actor. Cada conjunto de figuras representa una dimensión y dentro de éstas, cada figura representa la evaluación de cada tecnología, donde las porciones de la figura muestran cada uno de los criterios evaluados. Como puede observarse de los gráficos de torta, los números no expresan porcentajes sino los valores obtenidos de la ponderación de cada criterio. Así cada dimensión tiene tantos criterios como fueron definidos para cada una (ver

detalle en Anexo 5): la dimensión técnico-económica consideró seis criterios, la social tres, la ambiental y la político-institucional cuatro.

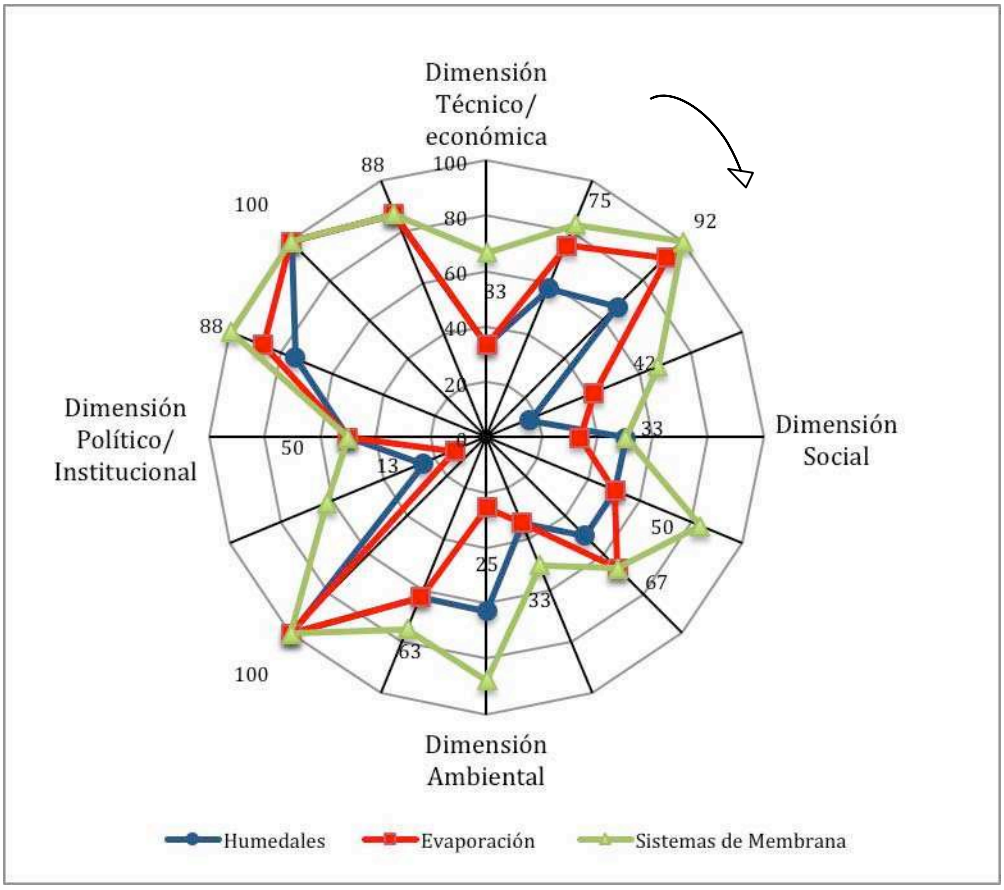


Figura 3.20. Valoración de las dimensiones por los distintos actores.

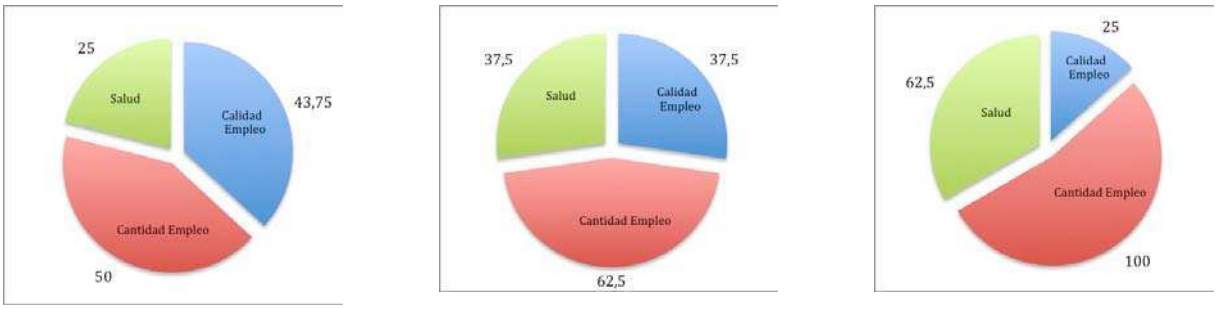
La Figura 3.21 permite observar la ponderación obtenida en los distintos criterios que componen la dimensión técnico-económica, la cual evaluaba entre otros aspectos la complejidad y la aceptación de la tecnología y la capacidad para fortalecer el desarrollo local. Según los distintos actores los humedales resultaron ser medianamente complejos, a diferencia de los sistemas de membranas que no son considerados de alta complejidad y mostraron la mayor aceptación. Los sistemas de membranas y la evaporación tendrían alta capacidad de implementación con 87,5 superior a los humedales con 50 puntos. En cuanto al desarrollo local las tres tecnologías pareciera que promueven levemente el desarrollo local. Los humedales representan la tecnología que más compromete el uso de tierra aunque es la que menor complejidad presenta para su implementación. Las tres tecnologías compiten con sus costos específicos con tecnologías convencionales aunque se considera a la evaporación de lixiviados como la mejor alternativa desde el punto de vista de los costos. Según este análisis los evaluadores no consideraron a la tecnología de membranas como costosa. Se esperaría encontrar la ponderación de esta tecnología por debajo de las otras, al

reportar mayores costos específicos, ligados a la capacidad de implementación, pero el análisis arrojó que se reporta calificada igual o por encima de las otras tecnologías.

Humedal | Evaporación | Sistema de membranas

Figura 3.21. Valoración de la dimensión técnico-económica

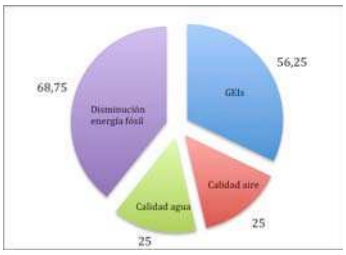
En la Figura 3.22 se muestra el resultado de la evaluación de las tecnologías según la dimensión social. La tecnología de membranas resultó la mejor calificada con 100 puntos, lo cual significa que genera alta demanda de mano de obra de bajo nivel de especialización; el resto de las tecnologías comprometerían menor cantidad de empleo. La tecnología de membranas resulta ser considerada como la que más beneficios tiene sobre la salud de la población y se reconoce a los humedales como una tecnología que requiere mayor empleo calificado.



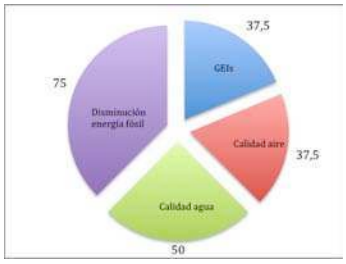
Humedal | Evaporación | Sistema de membranas

Figura 3.22. Valoración de la dimensión social

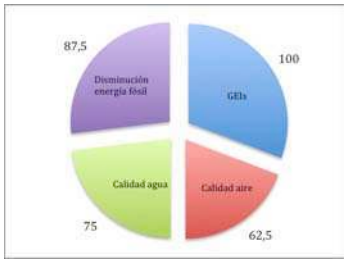
La Figura 3.23 resume la valoración realizada a las tecnologías desde la dimensión ambiental. En este análisis surge que la tecnología de membranas no produce GEIs, a diferencia que las otras tecnologías, y presenta en general mejores cuestiones ambientales vinculadas al menor uso de energía fósil y la preservación de la calidad del agua y del aire que la evaporación y los humedales. Respecto a la calidad del aire y del agua, la evaluación considera que tanto la evaporación como los humedales afectan estos factores ambientales aunque consideran que lo hacen en mayor medida los humedales, los cuales a su vez requieren menor consumo de energía fósil.



Humedal



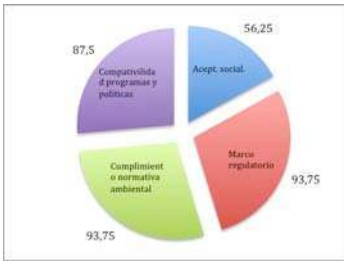
Evaporación



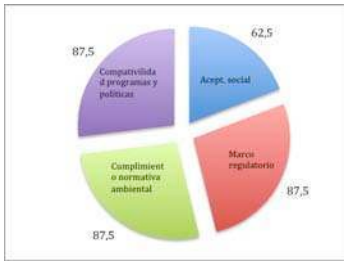
Sistema de membranas

Figura 3.23. Valoración de la dimensión ambiental

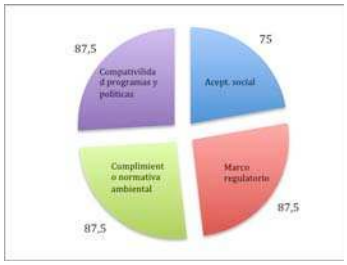
La Figura 3.24 muestra los resultados de la evaluación de las tecnologías desde la dimensión politico/institucional. Según el resultado de la evaluación, todas las tecnologías presentan alta compatibilidad con las políticas y estrategias existentes en el país, permiten alcanzar los límites establecidos por la normativa ambiental vigente y cuentan con un marco regulatorio que las regule aunque los humedales parecen tener el menor consenso social para su implementación.



Humedal



Evaporación



Sistema de membranas

Figura 3.24. Valoración de la dimensión político/instituciona

El objetivo central de esta evaluación fue resaltar que pueden existir diferentes enfoques al evaluar una tecnología que reemplace o mejore el tratamiento actual de los lixiviados. Al iniciar la evaluación se debe partir de tecnologías posibles de implementar y posteriormente incluir la participación social para la decisión de los procesos, teniendo presente que el factor técnico-económico no es único, los aspectos sociales, ambientales y político-institucionales cobran gran importancia en la selección de soluciones a problemas reales.

Como se observa del análisis de los resultados de la evaluación multicriterial, la tecnología mejor ponderada es el sistema de membranas que claramente en los resultados de las pruebas piloto mostró alta eficiencia en la remoción de los contaminantes (proceso 4), aunque no queda reflejado el aspecto relacionado a los altos costos económicos que su implementación y mantenimiento implica. Quizás aspectos de esta índole no fueron más claramente explicitados en el documento que se les entregó a los diferentes actores (Anexo 5).

De igual forma se observa una mayor aceptación a la implementación de sistemas de evaporación, aunque también aspectos vinculados a la calidad del aire y del agua han sido considerados como desfavorables por la mayoría de los actores.

Si bien la tecnología complementaria de humedales no fue ponderada favorablemente desde las diferentes dimensiones se identificó como altamente probable de implementar dada su compatibilidad con las políticas y el marco legal y normativa ambiental existente.

La metodología de análisis multicriterial fue utilizada con el fin de conocer los conceptos generales de los actores involucrados a través de la evaluación de los criterios que componen las dimensiones. No se realizó énfasis en el área temática en la cual cada uno de ellos trabaja. Se esperaba obtener conceptos globales para las diferentes metodologías utilizadas. Al analizar los resultados se encontró algunos sesgos en la información, por eso es importante diseñar adecuadamente la planilla, explicar claramente el alcance de los criterios y brindar toda la información necesaria para su evaluación. Próximos análisis serian ponderado y evaluado teniendo en cuenta el área especifica de cada uno de los actores.

CAPITULO IV

4. DISCUSIÓN

El agua es uno de los recursos naturales más íntimamente unido a la vida, se encuentra de forma abundante en la Tierra, pero casi toda está en forma de agua salada, sólo el 3% de ella se encuentra como agua dulce, y aunque esta cantidad ha sido más que suficiente para satisfacer las necesidades de toda la población humana, su distribución es muy irregular. Este recurso se ha convertido en tema de discusión a nivel mundial, por la importancia y la necesidad de abogar por la gestión sostenible de los recursos de agua dulce. Esta es una de las razones por las cuales se abordo este estudio.

La eliminación de los residuos sólidos urbanos debería llevarse a cabo evitando en lo posible el efecto que se genera al suelo, la vegetación y fauna, la degradación del paisaje, las contaminaciones de aire y las aguas. En el tema de aguas, una elevada contaminación se genera por parte de los lixiviados, los cuales arrastran sustancias tóxicas producidas en los rellenos. La agencia de Medio Ambiente de EE.UU. (EPA) ha analizado hasta 200 compuestos diferentes presentes en los lixiviados de residuos sólidos urbanos. Por estas razones encontrar un tratamiento adecuado para el manejo de los lixiviados es fundamental dentro de los procesos que se llevan a cabo en un relleno sanitario, esta búsqueda ya no contempla sólo la evaluación técnica y económica, la visión es mucho más amplia y real, integrando la implicación y aceptación social, política y ambiental.

La situación del manejo de residuos urbanos en Colombia, es un problema complejo. Aunque los rellenos sanitarios son la opción más práctica y económica para el tratamiento de estos residuos, la operación de los mismos constituye un factor crítico para su sostenibilidad ambiental. La normativa ambiental en su función de conservar y proteger los recursos naturales ha modificado el marco legal con el fin de cumplir con estos principios. La legislación Colombiana hasta el año 2010, monitoreaba el vertimiento de lixiviados a cuerpos de agua continentales superficiales, a través del decreto 1594 de 1984 el cual establecía una remoción mínima del 80% en los parámetros DBO, DQO, SST y grasas y aceites para permitir el vertimiento, lo cual dado los resultados del análisis de los principales parámetros evaluados, no indica protección ambiental. A partir de octubre del 2010 la legislación cambia y se establece con el decreto 3930 valores

máximos permisibles para cada uno de los parámetros monitoreados, controlando de esta forma la contaminación a los cuerpos de agua. Es claro que este cambio de normativa trae consigo mayores controles para la protección de los recursos naturales y por consiguiente la vida humana. Esto esta relacionado con el concepto enunciado por Hernández Berasaluce (1997) donde menciona el concepto de externalidad, como la capacidad que tiene el ambiente de amortiguar el efecto de la contaminación. Y es así como menciona la existencia de externalidades legales, aquellas que son admitidas por la legislación vigente y las consentidas como aquellas que si bien no son admitidas por la legislación de alguna manera las administraciones consienten en que existan de alguna manera. A modo de ejemplo, si se tiene un valor límite para un contaminante en 200 mg/L está significando que ese cuerpo receptor tiene capacidad para amortiguar esa cantidad de contaminante. Ahora si se descargan 300 y no existe penalización por el exceso, significa que de alguna manera la administración admite que esa carga adicional sea amortiguada por el ambiente. En este escenario de análisis, el porcentaje de remoción alcanzado evidentemente no representaba una situación de protección al ambiente porque se dieron casos mostrados en el análisis de resultados que el valor obtenido al cumplir el porcentaje de remoción distaba ampliamente del valor límite que establece la nueva normativa.

La transición entre el antiguo y el nuevo decreto ha generado una brecha amplia entre las tecnologías utilizadas para la remoción de los contaminantes y el cumplimiento de las nuevas concentraciones para obtener permiso de vertimientos.

En este documento se ha recopilado información que permite conocer el estado de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Antanas, evaluando el cumplimiento de las normativas ambientales, a través de la comparación entre la concentración de contaminantes que contiene el efluente que es vertido en aguas superficiales con los valores permitidos por cada uno de los decretos.

Se utilizó el análisis multicriterial para la evaluación de las posibles tecnologías complementarias o alternativas que mejoren el proceso que se lleva a cabo actualmente en la remoción de contaminantes del lixiviados. Entendido el AMC como una herramienta que permite proponer hipótesis a temas reales integrando distintos actores con puntos de vista diferentes pero con la motivación de una solución viable económica, técnica, social, ambiental y políticamente. Este ejercicio permitió identificar algunas debilidades (como por ejemplo: la calidad, precisión y cantidad de información que se le brinda a los actores) en su diseño y formulación, valorar la ponderación de los criterios y las dimensiones con rangos más amplios y claros, aprovechar todo cuanto te brinda esta herramienta, grandes posibilidades de vincular la transdisciplinaridad en la toma de decisiones.

Al analizar los resultados obtenidos durante los monitoreos se logró establecer que el TTL resulta eficiente en el cumplimiento de la anterior normativa, decreto 1594 de 1984, con los parámetros DQO, DBO_5 y sulfatos, donde se obtuvieron remociones al final del monitoreo (marzo del 2012) del 99 y 100% para DQO y DBO5 respectivamente. Los parámetros más críticos resultaron grasas y aceites y sólidos totales con remociones relativamente bajas que no alcanzan a cumplir con la normativa ambiental. Con respecto a DQO, nitrógeno y fósforo se requieren ajustes que permitan mejorar la eficiencia para alcanzar el límite máximo permitido. En el caso de los sólidos suspendidos totales el rendimiento del TTL no es eficiente, se esperaría que la mayor remoción de SST ocurra en el reactor de lodos activados y en la planta físico-química, por lo que se requiere implementar acciones de mejora en estos procesos. Un análisis más exhaustivo sobre estas dos etapas del TTL será necesario realizar con la finalidad de identificar el funcionamiento del reactor de lodos, la eficiencia de los coagulantes/floculantes utilizados, la capacidad del sistema en relación a los tiempos de retención y los caudales de efluente utilizados en estas etapas parciales del TTL. También habría que considerar el ingreso del lixiviado del Vaso I en la planta físico-química que podría estar alterando la capacidad de la planta.

Las pruebas piloto realizadas aplicando los proceso 2, 3 y 4 al compararlas con el proceso TTL, proceso 1; evidencian que la tecnología más eficiente en la remoción de los contaminantes es el proceso 4, donde se acopla la tecnología VSEP con ósmosis inversa, aunque hay que mencionar que estas tecnologías requieren de altos costos económicos para su implementación. Se debe destacar que el proceso 3 donde la VSEP actúa de forma independiente, no alcanza a comparar su remoción con el proceso 1, reportándose en la mayoría de los parámetros valores muy por encima del funcionamiento del TTL actualmente existente. Por otro lado, el proceso 2, donde se contempla el paso del efluente del TTL por el sistema natural (humedal) presentó remociones en cada uno de los parámetros analizados que permitían llegar al cumplimiento de la nueva normativa ambiental, decreto 3930 de 2010.

En términos de remoción, para el caso de la DQO, los valores alcanzados en las pruebas piloto son altos, aunque todos los procesos superan el 95% sólo dos procesos cumplen con los valores máximos estipulados en la nueva normativa vigente, que son el proceso 2 (TTL + humedal) y el proceso 4 (VSEP OI) con valores de 333 y 24,6 mg/L.

El TTL actualmente aplicado en el relleno sanitario Antanas resulta eficiente en la remoción del parámetro DBO_5 al ser comparado con las otras tecnologías, a excepción del proceso 3 (VSEP) todos los procesos obtuvieron valores que se

encuentran por debajo de los 200 mg/L estipulados en la nueva normativa. En la remoción de SST ninguno de los procesos resulto completamente eficiente para cumplir con la normativa. El proceso 4 resulta ser el más aproximado a este cumplimiento al encontrarse con 240 mg/L, el resto de tecnologías aplicadas registran datos 95% por encima del valor permitido. El fósforo total logra ser removido por las tecnologías aplicadas en las pruebas piloto, cualquiera que se implemente contribuiría a la remoción de este parámetro. Los sulfatos obtenidos en cada uno de los procesos aplicados resultan estar muy por debajo de la normativa ambiental.

Hay que tener en cuenta los residuos de las tecnologías VSEP y VSEP OI, que corresponden a concentrados con valores muy altos de los contaminantes se deben analizar en un estudio que escapa al presentes, para entender el impacto que causan y el adecuado manejo que requieren. De igual forma se debe mencionar que estas tecnologías requieren de altos costos económicos para su implementación, al ser comparadas con los humedales. Se destaca que el relleno sanitario Antanas cuenta con espacio para la implementación de humedales, lo cual resuelve el mayor problema que se presenta cuando se piensa en la implementación de estos.

El objetivo central de analizar las tecnologías y la problemática de los residuos sólidos a través del análisis multicriterio es resaltar que pueden existir diferente enfoques al evaluar una tecnología que reemplace o mejore el tratamiento de los lixiviados. Al iniciar la evaluación se debe partir de tecnologías posibles de implementar y posteriormente incluir la participación social para la decisión de los procesos, teniendo presente que el factor técnico-económico no es único, los aspectos sociales, ambientales y político-institucionales cobran gran importancia en la selección de soluciones a problemas reales. Como se observo la tecnología mejor ponderada es el sistema de membranas que claramente en los resultados de las pruebas piloto mostró alta eficiencia en la remoción de los contaminantes (proceso 4), aunque resulta curioso que no se cuestione los costos económicos de ella, de igual forma se observa una aprobación en la implementación de sistemas de evaporación, aunque es claro que la contaminación del aire y los costos se convierte en características que se deben controlar al utilizar estos sistemas. La tecnología complementaria (humedales) fue ponderado como el más bajo, aunque se reconoce su eficiencia y bajo costo de funcionamiento. Al analizar los resultados se encontró algunos sesgos en la información, por eso es importante diseñar adecuadamente la planilla, explicar claramente el alcance de los criterios y brindar toda la información necesaria para su evaluación.

4.1 RECOMENDACIONES

Como resultado del trabajo desarrollado se presentan algunas recomendaciones que pueden ser útiles tanto al sector de servicios o empresas encargadas de la operación de los rellenos sanitarios como al sector político-institucional formador de políticas y estrategias.

Recomendaciones técnicas:

Aprovechar los monitoreos que se realizan en la planta de tratamiento de lixiviados para organizar la información con miras a revisar periódicamente los procesos que se llevan a cabo, intentar que los datos sirvan para comparar los procesos y de esta forma fortalecer la eficiencia de cada uno de ellos.

Revisar el proceso que actualmente se lleva a cabo en la planta fisicoquímica y en el reactor de lodos con el fin de mejorar la remoción de sólidos totales.

Revisar la relación entre el caudal de lixiviados, los tiempos de retención y el dimensionamiento de los equipos existentes para optimizar el proceso y mejorar la remoción de los parámetros que escapan al límite de vertido permitido.

Recomendaciones al sector institucional y normativo

Realizar a través de diferentes ejercicios la aplicación de evaluaciones multicriteriales ajustando la metodología en cuanto a elegir adecuadamente las dimensiones a evaluar, definir en forma clara y precisa el alcance de los criterios y sobre todo ofrecer la mayor información posible de los distintos aspectos a evaluar para que los actores participantes puedan realizar la mejor evaluación dentro de sus áreas de experiencia.

Recomendar a los organismos de control, formadores de políticas y estrategias aplicar metodologías multicriteriales que tienden a promover la participación ciudadana desde diversos ámbitos evitando colisiones de sectores, fortaleciendo la educación ambiental para formar mayor cantidad de personas involucradas en este análisis que si bien es mucho más complejo pretende tener mayor grado de consenso una vez tomada la decisión.

Con la finalidad de reducir los costos de mitigación y los complejos procesos para evitar la contaminación es urgente disminuir la producción de residuos y si esto no es posible al menos implementar planes de recuperación de materiales con la finalidad de minimizar todo lo que se destina a rellenos sanitarios. Esta es la única manera de disminuir los altísimos costos de mitigación que aún asi no aseguran la protección del ambiente y su entorno. Tal como dice la teoría “es mejor prevenir que mitigar”.

GLOSARIO

Algunas definiciones Según RAS 2000 Articulo 210 e Informe del panel de Inspección del Banco Mundial.

- **Relleno sanitario:** lugar técnicamente diseñado para la disposición final controlada de los residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería. Confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final.
- **Lixiviados:** es el líquido que se acumula en el fondo de un vertedero. Normalmente en puntos intermedios, este liquido es el resultado de la precipitación de la escorrentía no controlada, agua de irrigación que entra, aguas contenidas en los residuos, aguas subterráneas que se infiltran, contiene diversos constituyentes derivados de la solubilización de los materiales depositados y productos de reacciones químicas y bioquímicas que se producen dentro del vertedero.
- **Disposición final de residuos:** proceso de aislar y confinar los residuos sólidos en forma definitiva, efectuado por las personas prestadoras de servicios, disponiéndolos en lugares especialmente diseñados para recibirlos y eliminarlos, obviando su contaminación y favoreciendo la transformación biológica de los materiales fermentables, de modo que no representen daños o riesgos a la salud humana y al medio ambiente.
- **Pre tratamiento:** proceso previo que tiene como objetivo remover el material orgánico e inorgánico flotante, suspendido o disuelto del agua antes del tratamiento final.
- **Residuos sólidos:** cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido que se abandona, bota o rechaza después de haber sido consumido o usado en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicio o instituciones de salud y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico. Se dividen en aprovechables y no aprovechables.
- **Residuos sólidos domiciliarios:** residuos sólidos o semisólidos de origen exclusivamente residencial, generados por la actividad humana dentro de la vivienda.
- **Residuos sólidos urbanos:** residuos sólidos o semisólidos provenientes de las actividades propias de los núcleos poblacionales en general, que incluyan los residuos de origen domiciliario, comercial, de servicios,

institucional, de mercados, hospitalarios comunes o no peligrosos, los generados en las oficinas de las industrias, en el barrido y limpieza de calles y áreas públicas, en podas de plantas de calles, plazas y jardines públicos.

- **Sólidos suspendidos:** pequeñas partículas de sólidos dispersas en el agua; no disueltas.
- **Tratamiento avanzado:** proceso de tratamiento fisicoquímico o biológico usado para alcanzar un grado de tratamiento superior al de tratamiento secundario. Puede implicar la remoción de varios parámetros, como remoción de solidos en suspensión, complejos orgánicos disueltos, compuestos inorgánicos disueltos o nutrientes.
- **Tratamiento convencional:** procesos de tratamiento bien conocidos y utilizados en la práctica. Generalmente se refiere a procesos de tratamiento primario o secundario. Se excluyen los procesos de tratamiento terciario o avanzado.
- **Tratamiento primario:** tratamiento en el que se remueve una porción de los sólidos suspendidos y de la materia orgánica del agua residual. Esta remoción normalmente es realizada por operaciones físicas como la sedimentación. El efluente del tratamiento primario usualmente con alto contenido de materia orgánica y relativamente alta DBO, remoción esperada inferior al 5 % de la DBO.
- **Tratamiento secundario:** es aquel directamente encargado de la remoción de la materia orgánica y los sólidos suspendidos.
- **DQO:** este método pretende medir la concentración de materia orgánica pero sufre interferencias por la presencia de sustancias inorgánicas susceptibles de ser oxidadas, que también se reflejan en la medida.
- **Demanda bioquímica de oxígeno:** se utiliza para medir el grado de contaminación, normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción (DBO_5), y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO_2/l)

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, A., Suárez, J. 2006. Tratamiento Biológico del Lixiviado Generado en el Relleno Sanitario “El Guayabal” de la Ciudad de San José de Cúcuta. Universidad del Norte. Revista Ingeniería & Desarrollo. No 20. ISSN: 0122-3461.

Aguirre, N.; Mejía, R., Múnera C. 2007. Variación nictemeral de la calidad del agua en las lagunas de estabilización del municipio de La Ceja, Antioquia. Revista Faculta de Ingeniería N.40. pp. 22-40.

Arango. O., Sanches. L. 2009. Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Láctea en Sistemas Anaerobios tipo UASB. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Vol. 7 No. 2.

Aristizábal, F. 1996. Los Avances de la Humanidad a través de los Hitos tecnológicos, Ecopetro-ICPT Tomado de: Revista Innovación y ciencia. Colciencias. Vol. V, No 2, P.54-63.

Arrienta, B. 2008. Fase I–II Dimensión de Categorización – Análisis de la Producción de Residuos Sólidos de Pequeños y Grandes Productores, Determinación de Factores de Producción de Residuos Sólidos de los Usuarios Residenciales, Revisión de la Regulación Vigente y Cálculo de Costos Asociados a la Realización de Aforo de Residuos Sólidos en Colombia. Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia.

Banco Mundial., International Finance Corporation (IFC). 2013.
http://espanol.doingbusiness.org/data/exploreeconomies/colombia/

Barredo, J. 1996. Sistemas de Información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Editorial RA-MA, España.

Borzacconi, L., López, I., Anido, C. 1996. Metodología para la Estimación de la Producción y Concentración de Lixiviado de un Relleno Sanitario. XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. México.

Corena, M. 2008. Sistemas de Tratamiento para Lixiviados Generados en Rellenos Sanitarios. Universidad de Sucre. Departamento de Ingeniería Civil.

Droppelmann, C., Oettinger ,M. 2009. Tratamiento en Lodo Activado del Lixiviado de un Relleno Sanitario. Información Tecnológica. Vl. 20(1), pag.11-19.

Emenike, C., Fauziah, S., Agamuthu, P. 2011. Characterization of Active Landfill Leachate and Associated Impacts on Edible Fish (Orechromis mossambicus). Mlaysian Journal of Science, 30(2):99-104.

Enviromental Protection Agency. 2007. Guidance for the landfill Sector. Technical Requeriments of the Landfill Directive and Integrated Pollution Prevention and Control.

Environmental Protection Agency. 2000. Office of Water Washington, D.C. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales – Humedales de flujo subsuperficial. US EPA 832-F-00-023.

Enviromental Protection Agency. 1999. Landfill Manuals. Landfil Restoration and Aftercare.

Enviromental Protection Agency. 1999. Protocol for Developung Sediment TMDLs. EPA 841-B-99-004.

Environmental Protection Agency. 1995. Solid Waste and Emergency Response, Decision Maker`s Guide to Solid Waste Management, Second Edition, United States, EPA530-R-95-023, August.

Enviromental Protection Agency. 1993. Subsurface Flow Constructed Wetlands For WasteWater treatment A Technology Assessment, Office Of Water (4204), EPA 832-R-93-008 July.

EVAL. 2010. Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe.

Falconí, F., Burbano, R. 2004. Instrumentos económicos para la gestión ambiental: Decisiones monocriteriales versus decisiones multicriteriales. http://www.buenosaires.gov.ar/ar/areas/med_ambiente/boletines/?historial=130&menu_id=18506

Fenn, D., Hanley, K., Degeare, T. 1975. Use of the Water Balance method for Predicting Leachate generation from Solid Waste Disposal Sites. Fort he Office of Solid Waste Management Programs. Enviromental Protection Agency. EPA.

Fornieles, J. 2011. Tratamiento de Lixiviados. Seminario Nacional de Limpieza Pública – SENALIMP.

Fuentes, L., Serrano, A. 2006. Tesis. Valoración Económica de los Impactos Socioeconómicos y Ambientales Ocasionados por el Manejo de los Residuos Sólidos Urbanos en el Relleno Sanitario “La Esmeralda” del Municipio de Barrancamermeja: Aplicación del método Multicriterio. Universidad Industrial de Santander.

Funtowicz, S., Martinez, J., Munda, G., Ravetz, J. 1999. Information tools for environmental policy under condictions of complexity. European Environmental Agency. Experts Corner. Environmental Issues Series. No. 9. 1.

García, L. 2004. Aplicación del Análisis Multicriterio en la Evaluación de Impactos Ambientales. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluñya.

Giraldo, E. 2002. Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. Facultad de Ingeniería Universidad de los Andes.

Gutiérrez, J., Gómez, M., Bosque J. 2010. Simulación de Crecimiento Urbano Mediante Evaluación Multicriterio y TIG en el Gran San Miguel de Tucumán (Argentina). Tecnologías de la Información Geográfica: la Información Geográfica al Servicio de los Ciudadanos. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla.

Hernandez. L. 1997. Economía y Mercado del Medio Ambiente. Ediciones Mundi-Prensa.

Hernández, E. 2011. Manual de Operación Tren de Tratamiento de Lixiviados Relleno Sanitario Antanas. Empresa Metropolitana de Aseo EMAS Pasto S.A. E.S.P.

Howard, R.; Walsh, T., Carville, M. 2003. Advanced Leachate Treatment at Buckden Landfill, Huntingdon, UK. Journal of Environmental Engeneering and Sciencie, Volume 2 Issue 4. Pages 255-264.

ISWA WG-Landfill. 2008. Lesson 4: Leachate Management and Control.

http://www.iswa.org/

Jaramillo, J. 1999. Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales – GIRSM. Feria y Seminario Internacional Gestión Integral de Residuos Sólidos y Peligrosos, siglo XXI. Medellín.

Johnson, G.; Stowell, L.; Monroe, M. 2006. Tratamiento VSEP de Rechazo de Osmosis desde el agua salobre subterránea. Una comparación de Métodos del Tratamiento Convencionales y los de VSEP, un sistema de Filtración por Membranas Vibratorias. New Logic Research, Incorporated. Conferencia El Paso desalinización. El Paso Texas.

Lahora, A. 2003. Depuración de Aguas Residuales Mediante Humedales Artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería). En, Paracuellos, M. (ed.): Ecología, manejo y conservación de los humedales, pp. 99/112. Colección Actas, 49. Instituto de Estudios Almerienses (Diputación de Almería). Almería.

Last, S., Corden, K., Harris, G. 2004. Best Available Techniques for Landfill Leachate Extraction and Pumping?. s/sdl/Pa04041 - Waste2004-Final.

Leff, E., Ezcurra, E., Pisanty, I., Romero, L. 2002. La Transición Hacia el Desarrollo Sustentable, Perspectivas de América Latina y el Caribe. México.

López, A., Cobo, N., Tejero, I., Lobo, A. 2008. Simulación de un Vertedero dentro de la Evaluación de Alternativas de Gestión de RSU. Grupo de Ingeniería Ambiental. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Cantabria. Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Castellón.

Marín, J., López, A., Behling, E., Rincón, N., Díaz. A., Fernández, N. 2007. Humedales construidos para el tratamiento de drenajes de una mina carbonífera. Ciencia 15(1), 21/34. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela.

Monroe, M. 2013. Tratamiento de Lixiviado de Relleno Sanitario. VSEP New Logic. Última revisión.
http://www.vsep.com/

Montoya, J., Ceballos, L., Casas, J., Morató, J. 2010. Estudio Comparativo de la Remoción de Materia Orgánica en humedales Construidos de Flujo Horizontal

Subsuperficial Usando Tres Especies de Macrófitas. Revista EIA, ISSN 1794-1237. Número 14, p. 75-84. Escuela de Ingeniería de Antioquia. Colombia.

Morillo, F., Fajardo, E. 2005. Estudio de los Reactores UASB para el Tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario la Esmeralda. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia. Manizales.

Munawar, E., Fellner, J. 2013. Guidelines for Design and Operation of Municipal Solid Waste Landfills in Tropical Climates. ISWA - The International Solid Waste Association.

Muñoz, K., Bedoya, A. 2009. El papel de los residuos sólidos en la solución de problemas ambientales. Economía Autónoma. Edición Virtual.

Najera, H. Lixiviados. Gaceta 4. Impreso Escuela de Ingeniería Ambiental. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
http://ambiental.unicach.mx/

Noeggerath, F., Salinas, I. 2011. Análisis comparativo de tecnologías para el tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios. Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Químicas.

Noguera, K., Olivero, J. 2010. Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso Colombiano. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 34 (132): 347-356. ISSN 0370-3908.

Pantini, S., Lombardi, F., Verginelli, L. 2012. Water-Balance Model for Predicting the Leachate Production in Landfills. The ISWA World Solid Waste Congress. Florence.

Peña, G. 2007. Comparación del Tratamiento de Lixiviados por Medio de Humedales Artificiales con otros Sistemas Convencionales de Tratamiento. Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA). Coloquios Ambientales. Universidad de los Andes.

Orta, M., Sánchez, J., Cruz, R., Rojas, M. 2002. Método de Balance de Agua para la Estimación de la Generación de Lixiviados en Rellenos Sanitarios. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES-Associaçâo Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Reboratti, C. 2000. Ambiente y sociedad. Conceptos y relaciones. Capítulo 1. Capítulo 3. Ariel, Buenos Aires.

Ripoll, J. 2003. La Basura no Tiene por qué ser un Problema. http://www.fsa.ulaval.ca/rdip/cal/lectures/societe_ecolo/basura_no_tiene_porque_ser.htm

Riascos, E. 2010. Tesis Magister en Ciencias Económicas: El Análisis Multicriterio en la Gestión de la Biodiversidad. Universidad Nacional de Colombia.

Robinson, H., Olufsen, J., Last, S. 2005. Desing And Operation of Cost-Effective Leachate Treatment Schemes at uk Landfills: Recent Case Studies. Enviros Consulting Ltd. Eviros House, Shrewsbury Business Park, Shrewsbury, UK. CIWM Scientific & Technical Review, pp 14-24. Business Services Ltd.

Rollandi, R. 2012. Problemática de la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos en las Megaciudades. IC Latinoamérica.
www.ic-latinoamerica.com

Romero C. 2010. Aprovechamiento Integral de Lixiviados. CONAMA10. Congreso Nacional del Medio Ambiente. España.

Santalla E., Córdoba V. 2012. Evaluación de Necesidades Tecnológicas para la Mitigación y Adaptación al Cambio Climático en la Argentina. PNUMA – UNEP Risoe Centre. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva. Contrato de Consultoría 1215227-03. Implementación del proyecto *Technology Needs Assessment in Latin America* (Evaluación de Necesidades Tecnológicas en América Latina). Capítulo 6: Tecnologías para el aprovechamiento energético de residuos urbanos y de los sectores agrícola, ganadero y agroindustrial. Capítulo II Reportes Sectoriales.

Schroeder, P., Dozier, T., Zappi, P., McEnroe, B., Sjostrom, J., Peyton L. 2012. The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model. Engineering Documentation for Version 3.

SEA – Servicio de Evaluación Ambiental – Gobierno de Chile. Estudio de Impacto Ambiental – Planta de Tratamiento de Lixiviados. Centro de Manejo y Disposición Final de Residuos Sólidos Chiloé. Pontificia Universidad Católica de Valparaiso. Municipalidad de Castro.
http://www.sea.gob.cl/

Setty, K. 2007. Manual de Construcción: Humedales Construidos para el Tratamiento de Aguas Negras. Bren School of Environmental Science and Management. University of California, Santa Barbara.

http://www2.bren.ucsb.edu/~keller/courses/GP_reports/

Tchobanoglous, G., Thiesen, H., Vigil, S. 1994. Gestión Integral de Residuos Sólidos. Volumen I. McGraw Hill / Interamericana de España, S.A. España.

Wagner, L. 2004. La toma de decisiones en sistemas complejos y contextos de incertidumbre. Vol. 2. No. 2. Buenos Aires.
www.sai.com.ar/metodologia/rahycs/rahycs_v2_n2_04.htm

Zouboulis, I., Petala, M. 2008. Performance of VSEP vibratory membrane filtration system during the treatment of landfill leachates. Volumen 222, Issues 1-3, 1 march. Pag. 165-175.

http://www.sepa.org.uk/air/process_industry_regulation/pollution_prevention__control/legislation.aspx

http://aggregain.wrap.org.uk/waste_management_regulations/background/european.html

ANEXO 1

Descripción detallada del Tren de Tratamiento de Lixiviados en el Relleno Sanitario Antanas

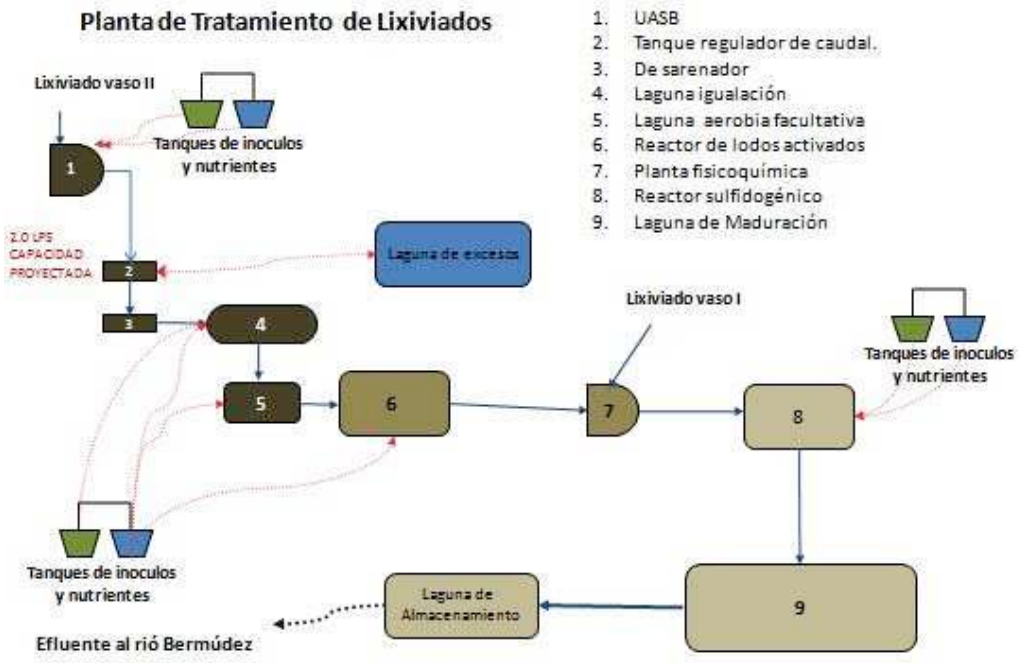


Figura A.1. Descripción tren de tratamiento de lixiviados relleno sanitario Antanas

A continuación se realiza una descripción de los equipo y procesos involucrados en el TTL, este material fue tomado del manual operativo de la planta de tratamiento de lixiviados (Hernández, 2011).

- ***Reactor UASB (Up Flow Anaerobic Sludge Blanket)***

El reactor de flujo ascensional y manto de lodos anaerobio conocido en inglés como UASB (Up Flow Anaerobic Sludge Blanket) y en español como RAFA o PAMLA, es un proceso en el cual, el lixiviado se introduce por el fondo del reactor y fluye a través de un manto de lodos, conformado por granos biológicos o partículas de microorganismos.

El tratamiento se efectúa por contacto del lixiviado con el lodo granulado o floculento, en el cual se deben desarrollar bacterias con buenas características de sedimentación, bien mezcladas por el gas en circulación, los gases de la digestión anaerobia, se adhieren a los granos o partículas biológicas o causan circulación interna para promover la formación de más granos. El gas libre y las partículas con

gas adherido, se elevan hacia la parte superior del reactor. Las partículas que se elevan chocan con las pantallas desgasificadoras, para que el gas se libere, los granos desgasificados caen de nuevo sobre la superficie del manto del lodo y el gas libre se captura en el domo del reactor, la porción líquida fluye al sedimentador donde se separan los sólidos residuales del lixiviado.

Foto A.1. Reactor UASB

Cuando en el reactor UASB funciona a plena capacidad y el lodo es activo, se establecen dos partes definidas: el lecho donde se encuentran las altas concentraciones de sólidos y el manto de lodos producido por el flujo ascensional del afluente a través del lecho por la mezcla, que establece el gas producido en el lodo. El manto de lodos es la zona de mayor turbulencia, en la que se encuentran partículas que sedimentan y otras que ascienden, hasta que se liberan del gas y sedimentan.

El reactor UASB en el relleno sanitario Antanas, se construyo con el fin de aumentar la remoción de carga orgánica de los lixiviados afluentes a la planta de tratamiento del relleno sanitario, provenientes de la zona de disposición del vaso II, área que comenzó a operar a principios del mes de junio de 2009.

El lixiviado tratado en el reactor UASB pasa por gravedad al tanque de almacenamiento de la estación de bombeo y de éste pasa luego al tanque de bombeo, donde es impulsado al tanque regulador de caudal para continuar con el tratamiento en el tren.

- ***Laguna de igualación***

El lixiviado proveniente del reactor UASB y que ha sufrido un pretratamiento en el desarenador fluye por gravedad hacia la laguna de igualación, la cual funciona como un reactor anaerobio, con una concentración baja de microorganismos. La transformación biológica que ocurre depende del tiempo de retención y de la

temperatura del lixiviado. Esta laguna, se diseñó para amortiguar las variaciones del caudal, debido al flujo inconstante del lixiviado tratado en el reactor UASB. Con ello se logra un efluente lo suficientemente uniforme en cuanto a características y caudal a partir de un efluente discontinuo y variable en calidad y cantidad debido al bombeo inconstante que se realiza desde la estación de bombeo del reactor UASB.

Foto A.2. Laguna de Igualación

En esta unidad se produce por una parte una igualación de caudales que además puede tener como efecto secundario reducciones en la concentración de contaminantes por las reacciones que se suceden durante al periodo de retención. Además de lograr una regulación del caudal a suministrar al TTL, la laguna de igualación puede actuar como depósito tampón regulador y neutralizador de pH, para lo cual se debe instalar unos tanques provistos de bombas dosificadoras y agitadores mecánicos tanto para dosificar correctivos de pH ó nutrientes en caso de ser necesario. Por lo que cuenta precisamente con un equipo de control de pH in situ, En ésta unidad es la cual se debe "acondicionar" todo el lixiviado a ser tratado en la TTL, igualmente se pueden acondicionar para tal fin los tanques dosificadores dispuestos para el reactor de lodos activados.

- ***Laguna aireada facultativa***

El lixiviado proveniente de la laguna de igualación continua por gravedad a su siguiente fase en el tren de tratamiento en la laguna aireada facultativa, en ella se alcanza un buen efluente, con niveles de potencia inferior, mínimo control y la remoción de lodo es poco frecuente. Esta unidad se diseñó con el objetivo de propiciar una mayor área superficial de oxigenación.

Las laguna facultativas son llamadas así, porque tienen una capa aerobia superficial, una zona facultativa intermedia y una capa anaerobia en el fondo. En este tipo de lagunas los procesos de oxidación bacteriana convierten el material orgánico en dióxido de carbono, amonio y fosfatos. La existencia de nutrientes proporciona un ambiente favorable para que se desarrollen las poblaciones de

algas. Las lagunas aireadas facultativas normalmente sólo presentan oxígeno disuelto en las capas superiores; el material suspendido sedimentado se somete a una biodegradación anaeróbica en profundidad. En ellas, la energía entregada por unidad de volumen es suficiente solamente para la difusión de oxígeno para la masa líquida, pero es insuficiente para mantener lo sólidos en suspensión. Así, la parte superior de la laguna es aerobia y la inferior es totalmente anaerobia, debido a los sólidos sedimentados, por esta distribución diferencial del oxígeno a lo largo de la profundidad, una laguna de este tipo se llama facultativa.

Foto A.3. Laguna Aireada Facultativa

La eficiencia de una laguna aireada facultativa consiste en suministrar la aireación necesaria para satisfacer la demanda de oxígeno del lixiviado ubicado en la capa superior de la laguna, en forma tal, que permita la sedimentación y descomposición anaerobia en la capa inferior.

- ***Reactor de lodos activados***

El lixiviado luego de pasar por la laguna aireada facultativa fluye hacia el reactor de lodos activados, unidad donde se genera el lodo activo, proceso que se lleva a cabo en un tanque de aireación y en un tanque de sedimentación, desde donde se reciclan y se purgan los sólidos.

El tanque de aireación es un reactor de crecimiento en suspensión, que contiene conjuntos microbianos o flóculos de microorganismos denominados lodo activo; allí se mezclan los organismos y el lixiviado con gran cantidad de aire. Bajo estas condiciones los organismos oxidan una parte del desecho orgánico a dióxido de carbono y agua, para obtener energía y sintetizan la otra parte en forma de células microbianas nuevas, utilizando la energía obtenida de la oxidación. Luego la mezcla entra en el tanque de sedimentación, donde los microorganismos floculantes se asientan y son removidos del efluente. Los microorganismos sedimentados, o el lodo activado, se recirculan hacía el inicio del tanque de aireación, para mezclarlos de nuevo con el lixiviado. En este proceso se producen

en forma continua, lodos activados nuevos, de cuyo exceso es necesario deshacerse (lodos activados de desecho y/o purga).

Foto A.4. Reactor de Lodos Activados

- Remoción en el tanque de aireación: El lixiviado proveniente de la laguna aireada facultativa mezclado con el lodo activado es aireado en el reactor de Aireación, hasta obtener como mínimo 2 mg O2/l; en este proceso una parte de materia orgánica contenida en el efluente es mineralizada y gasificada y la otra parte es utilizada para formación de nuevas bacterias.

- Separación sólido líquido en el tanque de sedimentación: Los lodos activados deben ser separados del licor mezclado provenientes del tanque de aireación, este proceso se realiza en el tanque de sedimentación, concentrándolos por gravedad. El objetivo de este proceso es conseguir un efluente clarificado con un mínimo de sólidos suspendidos y asegurar el lodo de retorno.
- Descarga del exceso de lodos o purga: Con la finalidad de mantener la concentración de los lodos activados en el licor mezclado, una parte de los lodos son eliminados del sistema y llevados a lechos o eras de secado, para posteriormente disponer el lodo seco como residuo sólido, éste lodo así extraído, es llamado también purga y conocido también como WAS (Waste Activated Sludge). Los lodos generados en exceso deben ser desechados del sistema con alguna periodicidad, si esto no se hace, los lodos superoxidados comenzarán a flotar e inundarán el sistema, siendo arrastrados en el efluente del sedimentador secundario.

Los lodos desechados de un sedimentador de lodos activos, en general son estables con presencia de poca cantidad de bacterias. Con un adecuado manejo pueden utilizarse luego de su secado en eras, como mejoradores de suelo.

- Lixiviado Maduro: son los líquidos provienen del área de disposición final del Vaso I y pueden llevar consigo por arrastre, todo tipo de contaminantes, muchos de ellos en concentraciones elevadas, por lo que son catalogados como líquidos complejos y difíciles de tratar al menos por tratamiento biológico. Los lixiviados maduros, contienen concentraciones elevadas de contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluyendo ácidos húmicos, fúlvicos, nitrógeno amoniacal además de metales pesados y sales inorgánicas. A este tipo de lixiviado se le conoce como viejo o estabilizado, se recomienda como primera etapa para el tratamiento de estos lixiviados los procesos fisicoquímicos.

La conducción de los lixiviados maduros a la planta fisicoquímica, debe ser monitoreada y regulada por cuanto la planta fisicoquímica, está diseñada para un caudal máximo de tratamiento de 2 L/s.

- ***Planta físico-química***

El tratamiento fisicoquímico en el TTL del relleno sanitario Antanas, está diseñado para una capacidad máxima de 2,0 L/s, su fundamento es la separación de sólidos suspendidos de los lixiviados y la remoción de color, utilizando para ello la técnica de desestabilización de coloides (coagulación) aglutinamiento de partículas (floculación) y recuperación de sólidos por gravedad (sedimentación).

En este proceso fisicoquímico, la operación que requiere de mayor cuidado, es la coagulación, la cual debe ser conducida de manera apropiada, para lograr el propósito establecido, por lo que se deben conocer con certeza las dosis adecuadas de coagulante que debe ser adicionado al lixiviado. Para esto se recomienda que por lo menos una vez a la semana se haga necesario ejecutar una prueba de jarras en el laboratorio, para conocer la dosis adecuada de coagulante que se debe aplicar al lixiviado.

Como su nombre lo indica la planta fisicoquímica, es la unidad de tratamiento físico-químico, donde se espera una remoción importante de sólidos contenidos en el lixiviado, proveniente del reactor de lodos activados en combinación con el lixiviado maduro proveniente del Vaso I; la planta consta de tres secciones claramente definidas:

- Unidad de coagulación: unidad en la cual a través de una canaleta Parshall se incrementa la turbulencia del lixiviado proveniente del reactor de lodos y el lixiviado maduro proveniente del vaso I, se adiciona un coagulante (sulfato de aluminio líquido) para desestabilizar las partículas suspendidas

en el lixiviado y a la vez, para reducir las fuerzas de separación entre ellas. La coagulación es efectuada mediante una agitación intensa del lixiviado, llamada mezcla rápida, que tiene por objeto hacer que el coagulante se difunda lo más rápida y uniformemente posible en toda la masa del lixiviado.

Foto A.5. Unidad de coagulación

- Unidad de floculación: la unidad de floculación la constituyen tres paletas mecánicas las cuales se encargan de formar el floc suficientemente grande y pesado para que pueda sedimentar.

Foto A.6. Unidad de floculación

- Unidad de sedimentación: la sedimentación es un fenómeno físico en el que las partículas suspendidas presentan un movimiento descendente en un medio líquido de menor masa específica, debido a la acción de la gravedad. La ocurrencia de la sedimentación propicia la clarificación del medio líquido, es decir, la separación de las fases sólida y líquida.

Foto A.7. Unidad de floculación

A la fecha en la planta fisicoquímica del tren de tratamiento del relleno sanitario Antanas, se esta utilizando como coagulante sulfato de aluminio líquido; se debe tener en cuenta que para cada coagulante hay por lo menos una zona de pH óptima, en la cual se sucede una buena floculación, la cual ocurre en el tiempo más corto y con la misma dosis de coagulante. Según la literatura, la acción óptima del sulfato de aluminio, se encuentra en una zona estrecha y óptima entre 6,5 Und a 7,5 Und. El ph promedio registrado en el afluente fue de 8,58 und, por lo que no se requiere la adición de ningún alcalinizante que normalmente se utiliza en estas etapa en otras plantas fisicoquímicas para garantizar el óptimo funcionamiento del sulfato de aluminio líquido.

- ***Reactor sulfidogénico***

El lixiviado proveniente del sistema de tratamiento primario avanzado (planta fisicoquímica) ingresa al reactor sulfidogénico. En este reactor, la materia orgánica es removida por bacterias sulfatoreductoras (SRB), en un ambiente anaeróbico, buscando una máxima reducción de sulfato. En sistemas de este tipo y de alta velocidad de reducción sulfidogénica, la materia es un donador de electrones, generando una degradación de ácidos grasos a acetatos, que es el factor limitante.

Foto A.8. Reactor Sulfidogénico

El reactor sulfidogénico del tren de tratamiento del relleno sanitario Antanas, está conformado por tres secciones A, B y C , compuestas por una serie de pantallas o bafles (geomembrana), que permiten un flujo del lixiviado de manera vertical y recurrente, ocasionando una sedimentación y desarrollo de biomasa (bacterias anaerobias sulfato reductoras), debido a la secuencia de flujos descendentes y ascendentes.

Cada sección posee tres zonas reactivas, compuestas por tres pantallas en serie separadas por 1,51m y zonas de aquietamiento a continuación de cada zona reactiva.

La Capacidad Volumétrica Total del Reactor Sulfidogénico es de: 3019,2 m^3

En este reactor para obtener buenas remociones de DQO y sólidos suspendidos, es necesaria la dosificación de sulfato de aluminio, lo que coadyuva al proceso de sedimentación. La dosificación se realiza por gravedad utilizando una manguera de ¼ " a razón de 0,0116 L/s. El producto se prepara dosificando el sulfato de aluminio sólido disuelto en 1000 litros de agua. Para realizar esta mezcla se cuenta con un tanque de polietileno de capacidad de 1000 litros. La reacción biológica que se sucede, mediante bacterias reductoras de sulfato (SRB "Sulfate reducing bacteria") permite utilizar el sulfato adicionado, como aceptor de electrones para la descomposición de ácidos grasos y consecuente producción de ácido sulfhídrico como subproducto o como reacción colateral indirecta en caso de exceso del producto. El sulfuro de hidrógeno, se hidroliza rápidamente en solución y permanece latente. Su liberación se puede realizar por aireación posterior. Para reducir al máximo la producción de sulfuro indeseable es necesario mantener el pH alrededor de 7,5 si permanece por debajo de 6,5 o por encima de 8,5 se puede configurar la producción excesiva de sulfuro. Este exceso puede generar efectos tóxicos para las bacterias. En la mayoría de los casos las bacterias reductoras de sulfato son tolerantes a excesos de este gas, el cual inhibe la acción de la biomasa.

El pH es un parámetro a monitorear diariamente, por cuanto es muy importante ya que determina el grado de inhibición que pueden tener los grupos bacteriales sulfurosos. El pH óptimo se encuentra en el rango 7,8 -8,2 para evitar la producción de sulfuro. Se trata de que con el acondicionamiento de pH en la laguna de igualación se favorezcan los procesos tanto en la laguna aireada facultativa como en el reactor de lodos activados, redundando en el acondicionamiento de pH del afluente al reactor sulfidogénico.

- ***Laguna de maduración***

Dentro del tren de tratamiento del relleno sanitario Antanas, el flujo de lixiviado tratado proveniente del reactor sulfidogénico ingresa a la laguna de maduración, laguna que corresponde a una clasificación de laguna de estabilización. Esta etapa se considerada la última del tren de tratamiento que en la actualidad está funcionando en el relleno sanitario Antanas. Esta laguna se encuentra localizada posterior al reactor sulfidogénico, es una estructura simple, que básicamente almacena el lixiviado tratado proveniente del reactor sulfidogénico. Su función es similar al de las lagunas facultativas, prácticamente no acumulan lodos, de modo que casi no es necesaria programar su limpieza; uno de sus principales objetivos es el de reducir el número de organismos patógenos (coliformes fecales)

contenidos en el lixiviado, reducir la población de algas y además, ocurre una pequeña remoción de DBO5, esto debido a los procesos de estabilización natural que incorpora fenómenos de tipo físicoquímico y biológico.

Foto A.9. Laguna de Maduración

Esta laguna básicamente se utiliza como una laguna de aquietamiento final. En donde el lixiviado tiene un tiempo de retención mayor a 20 días.

- Cria de Inoculo: con el fin de garantizar que los sistemas de tratamiento funcionen adecuadamente, es necesario que exista un grupo de microorganismos capaces de descomponer la materia orgánica presente. Por las características propias de los lixiviados, la colonización de estos microorganismos es poco fácil, por lo que se requiere adaptarlos al lixiviado a tratar y proveerles unas condiciones mínimas para garantizar su establecimiento.

La consecución del inóculo para el caso del TTL del relleno sanitario Antanas, se hace en las unidades del tren de tratamiento correspondientemente, pues se puede conseguir un inóculo adaptado al lixiviado. El inóculo inicial debe ser de color oscuro y debe presentar en el punto de recolección un burbujeo que indique una actividad metanogénicas.

ANEXO 2

Monitoreo de parámetros fisicoquímicos en el tren de tratamiento de los lixiviados en el relleno sanitario Antanas.

Tabla .A.1 Datos Obtenidos Efluente Vaso II – Punto 1

Parámetro	Unidad	Decreto 1594/84	Decreto 3930/10	2010	2011						2012
				Nov	Feb	Mar	Jun	Ago	Sep	Nov	Mar
DQO	mg/L	Remoción 80%	400	21505	16846	39875	23178	23297	22103	31063	28674
DBO_5	mg/L	Remoción 80%	200	11040	12267	25250	/	/	8360	13240	21000
Nitrógeno Total	mg/L	NA	20	/	2050	1485	/	/	2110	2247	1534
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	/	200	20236	26860	21810	15712	/	20378	22348	20162
Fósforo Total	mg/L	NA	5	52	70	153	128	/	64	125	76
Grasas y Aceites	mg/L	(Remoción>80 % en carga)	20	32	52	116	/	66	/	/	22
pH		5-9	6-8	7,5	7,3	7,5	7,9	7,5	7,8	7,5	6,7
Sulfatos	mg/L	400	300	369	/	610	221	/	/	/	/

Tabla A.2 Datos Obtenidos Efluente Reactor UASB – Punto 2

Parámetro	Unidad	Decreto 1594/84	Decreto 3930/10	2010	2011						2012
				Nov	Feb	Mar	Jun	Ago	Sep	Nov	Mar
DQO	mg/L	Remoción 80%	400	14695	12832	34289	13859	18459	11470	21864	23417
DBO_5	mg/L	Remoción 80%	200	5988	8360	16400	/	/	2468	7940	19800
Nitrógeno Total	mg/L	NA	20	/	964	1471	/	/	1981	2044	1438
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	/	200	14604	12078	25556	17874	/	15858	18000	16566
Fósforo Total	mg/L	NA	5	39	74	98	65	/	77	73	80
Grasas y Aceites	mg/L	(Remoción>80% en carga)	20	28	50	78	/	49	/	/	21
pH		5-9	6-8	7,5	7,5	7,1	7,7	7,6	7,8	7,7	7,2
Sulfatos	mg/L	400	300	226	/	578	134	/	/	/	/

Tabla A.3 Datos Obtenidos Efluente Laguna de Maduración – Punto 3

Parámetro	Unidad	Decreto 1594/84	Decreto 3930/10	2010	2011						2012
				Nov	Feb	Mar	Jun	Ago	Sep	Nov	Mar
DQO	mg/L	Remoción 80%	400	785	1335	746	685	595	591	502	337
DBO_5	mg/L	Remoción 80%	200	171	390	113	/	/	87	31	35
Nitrógeno Total	mg/L	NA	20	/	322	244	/	/	213	22	56
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	/	200	3844	5308	3008	4860	/	5828	4872	6072
Fósforo Total	mg/L	NA	5	12	18	14	16	/	15	7	19
Grasas y Aceites	mg/L	Remoción > 80% en carga	20	33	21	19	/	5	/	/	9
pH		5-9	6-8	8,0	8,2	8,3	8,2	8,4	8,2	8,3	8,2
Sulfatos	mg/L	400	300	70	/	91	72	/	/	/	/

ANEXO 3

Monitoreos de parámetros fisicoquímicos en los procesos pilotos de las tecnologías alternativas

Tabla A.4 Resultados de laboratorio parámetro DQO.

PARAMETRO	Lixiviado Vaso II	Proceso 1	Proceso 2	Concentrado Proceso 3	Permeado Proceso 3	Concentrado Proceso 4	Permeado Proceso 4
***DQO O_2**	31063	502	333	108523	1563	3405	24,6
Decreto 3930/2010	400	400	400	400	400	400	400

*Los valores están expresados en mg O_2/L.

Tabla A. 5 Resultados de laboratorio DBO_5 .

PARAMETRO	Lixiviado Vaso II	Proceso 1	Proceso 2	Concentrado Proceso 3	Permeado Proceso 3	Concentrado Proceso 4	Permeado Proceso 4
DBO_5 O_2	13240	30,5	16,7	9500	557	1557	11
Decreto 3930/2010	200	200	200	200	200	200	200

*Los valores están expresados en mg/L.

Tabla A. 6 Resultados Sólidos Suspendidos Totales.

PARAMETRO	Lixiviado Vaso II	Proceso 1	Proceso 2	Concentrado Proceso 3	Permeado Proceso 3	Concentrado Proceso 4	Permeado Proceso 4
*** SST**	22348	4872	4088	40058	6658	14162	240
Decreto 3930/2010	200	200	200	200	200	200	200

*Los valores están expresados en mg/L.

Tabla A. 7 Resultados de laboratorio Fósforo Total.

PARAMETRO	Lixiviado Vaso II	Proceso 1	Proceso 2	Concentrado Proceso 3	Permeado Proceso 3	Concentrado Proceso 4	Permeado Proceso 4
***Fósforo Total (P)**	72,5	7,12	2,38	482	>LD	8,48	>LD
Decreto 3930/2010	5	5	5	5	5	5	5

*Los valores están expresados en mg/L.

Tabla A. 8 Resultados de laboratorio Sulfatos.

PARAMETRO	Lixiviado Vaso II	Proceso 1	Proceso 2	Concentrado Proceso 3	Permeado Proceso 3	Concentrado Proceso 4	Permeado Proceso 4
***Sulfatos (SO_4^{-2})**	375	137	207	928	210	107	59,3
Decreto 1594/1984	400	400	400	400	400	400	400
Decreto 3930/2010	300	300	300	300	300	300	300

*Los valores están expresados en mg/L.

ANEXO 4

Marco Legal relacionado a residuos sólidos urbanos en Colombia.

Tabla A.9 Leyes y Decretos sobre el tema de Residuos Sólidos y Reciclaje

NORMA	EXPIDE	DESCRIPCIÓN
Constitución Política de 1991	Asamblea Nacional Constituyente	Contiene 49 artículos alusivos al medio ambiente.
PGIRS	Ministerio de Medio Ambiente.	Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos de 1998
PNPL	Ministerio de Medio Ambiente.	Política Nacional de Producción mas Limpia de 1998
Ley 23 de 1973	Congreso de la República	Por el cual se concede facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir el código de recursos naturales y de protección al medio ambiente.
Ley 99 de 1993	Congreso de la República	Crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.
Ley 142 de 1994	Congreso de la República	Contiene el Régimen de Servicios Públicos Domiciliarios. Se asigna a los municipios el deber de garantizar la provisión de servicios Públicos.
Ley 491 de 1999	Congreso de la República	Establece por primera vez la tipificación de los delitos penales orientada a sancionar a los responsables de la contaminación.
Decreto Ley 2811 de 1974		Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y Protección del Medio Ambiente
Decreto 1541 de 1978		Reglamenta parcialmente el Decreto ley 2811 de 1974. Prohíbe el vertimiento de residuos sólidos a los cuerpos de agua.
Decreto 1594 de 1984		Reglamenta parcialmente la Ley 9 de 1974 en lo relacionado al uso del agua y residuos líquidos. Prohíbe la disposición de sedimentos, lodos y sustancias solidas provenientes de sistemas de tratamiento de agua o equipos de contaminación ambiental y otras como cenizas, cachaza y bagazo en las áreas superficiales, subterráneas, marinas, estuarinas o sistemas de alcantarillado.
Decreto 605 de 1996	Ministerio de Desarrollo Económico	Estatuto Nacional de usuarios de los Servicios Públicos Domiciliarios.
Decreto 1180 de 2003	Presidencia de la República	Establece la competencia de las Corporaciones Autónomas Regionales para expedir la licencia ambiental para la construcción y operación de rellenos sanitarios.
Decreto 1220 de 2005		Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.
Decreto 838 de 2005	Presidencia de la República	Modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos, localización, construcción y operación de rellenos sanitarios y consideraciones ambientales de la puesta en marcha de rellenos.
Resolución 133 de 2000	Corporación Regional Autónoma	Planes de manejo ambiental para rellenos sanitarios.

ANEXO 5

En este anexo se muestra la información que fue suministrada a los actores que fueron seleccionados para realizar la evaluación multicriterial de las tecnologías. En el documento que fue entregado, se incluye información técnica de cada tecnología, la escala de tres niveles que debían aplicar (0-50-100/Malo-Regular-Bueno) al momento de ponderar y el detalle de cada uno de los criterios de cada dimensión.

ANÁLISIS MULTICRITERIO DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA ADECUAR EL TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO ANTANAS

La normativa ambiental para el vertimiento puntual a sistemas de alcantarillado público y cuerpos de aguas continentales superficiales, de generadores que desarrollen actividades industriales, comerciales o servicios, se controla actualmente mediante el decreto 3930 de 2010 que exige el cumplimiento de valores límites máximos permisibles de diversos parámetros. Por esta razón mediante un estudio de caso, se pretende evaluar diferentes alternativas complementarias para el tratamiento de lixiviados provenientes del relleno sanitario Antanas en la ciudad de Pasto en Colombia.

Actualmente el relleno cuenta con un tren de tratamiento de lixiviados (TTL), conformado por cinco unidades que corresponden a tratamiento biológico y una unidad que corresponde a tratamiento fisicoquímico (tratamiento primario avanzado), de la siguiente forma; un reactor UASB, una laguna de igualación, una laguna facultativa aireada, una planta fisicoquímica, un reactor sulfidogénico y la laguna de maduración. La finalidad de la tecnología instalada en la planta es reducir el valor de los parámetros como DQO, DBO, SST y, Grasas y Aceites principalmente. De acuerdo con el decreto 1594 de 1984, donde se requiere una remoción mínima del 80%, la planta llego alcanzar un alto nivel de funcionamiento.

Para el cumplimiento de la nueva normativa no se alcanzan los niveles límites establecidos con el TTL por lo cual se evalúa la posibilidad de incorporar una tecnología o proceso que contribuya al mejoramiento de los niveles de descarga de la planta.

Para evaluar las tecnologías propuestas en este estudio se utilizara una técnica multicriterial, que permita ponderar diferentes aspectos de cada tecnología, no solamente el técnico. El análisis multicriterio es una alternativa que busca integrar las diferentes dimensiones de una realidad en un solo marco de análisis para dar

una visión integral más completa que el convencional análisis costo-beneficio. Además, es una herramienta adecuada para tomar decisiones que encierren conflictos sociales, económicos y objetivos de conservación del medio ambiente, teniendo presente las escalas de medición: físicas, monetarias, cualitativas, etc. Este análisis también posibilita la participación de los diferentes actores involucrados en un problema a través de la elección de los criterios de evaluación en un marco de amplia participación social y la calificación directa de las distintas alternativas de elección por parte de dichos actores.

A continuación se realiza una descripción de las diferentes alternativas que se han tenido en cuenta en el estudio. Le solicitamos en base a sus conocimientos técnicos evaluar cuantitativamente cada tecnología utilizando la escala de valoración establecida y teniendo en cuenta los criterios definidos para cada una de las cuatro dimensiones consideradas (económica, social, ambiental, político-institucional).

- **Técnicas Alternativas para mejorar el Tratamiento de Lixiviados en el Relleno Sanitario Antanas - Pasto- Colombia**

Sistemas Naturales: Las lagunas y humedales artificiales, tienen un sistema de operación simple y pueden lograr diferentes niveles de tratamiento, desde un pretratamiento hasta un tratamiento terciario, de acuerdo al caso. Estos sistemas pueden manejar adecuadamente muchos de los problemas que aparecen en otras tecnologías como son la acumulación de precipitados, la formación de espumas, la toxicidad a los microorganismos, y las variaciones en cargas hidráulicas y orgánicas. Esto se logra al tener tiempos de retención hidráulica muy altos y volúmenes de procesos igualmente grandes, que permiten acondicionar variaciones en caudal, acumulaciones de precipitados junto con una baja producción de gases y por lo tanto de espumas. Requieren poco o ningún tipo de energía eléctrica.

Estos sistemas remueven en forma confiable la DBO, la DQO y los SST, y con tiempos de retención suficientemente largos también pueden producir bajas concentraciones de nitrógeno y fósforo. Los metales son también removidos eficazmente. La tecnología requiere gran cantidad de terreno para localizar los procesos, estos terrenos se pueden relacionar con las áreas de amortiguamiento visual, de ruido y de olores que deben tener los rellenos sanitarios.

Evaporación Forzada: La evaporación forzada se fundamenta en la utilización de paneles evaporadores atmosféricos. En ellos se va a eliminar el agua contenida en

el lixiviado mediante un proceso de transferencia hacia el aire atmosférico no saturado. Su objetivo es concentrar la disolución por evaporación del agua en régimen atmosférico, hasta reducirlo a un lodo inerte con un volumen del orden del 7% del correspondiente al vertido bruto. Las variables climatológicas significativas para el proceso de evaporación mecanizada son la temperatura y la humedad relativa del aire. Se fijan como límites los siguientes valores: Humedad relativa máxima: 75% y Temperatura anual media: 17ºC. El rendimiento del tratamiento dependiendo del tipo de lixiviado.

El proceso de evaporación atmosférica no depende del tipo de residuo a tratar sino de las características que tenga, siendo sensible únicamente a los siguientes parámetros: cantidad de sólidos totales que determina la máxima cantidad de agua que se puede evaporar, de forma que el lodo concentrado obtenido se mantenga bombeable y aspersable. el tipo y las características de los sólidos contenidos determinan el límite de concentración en el lodo y, por lo tanto, el límite de evaporación. El contenido de volátiles debe estar limitado por mantener la presencia en el aire húmedo de contaminantes y olores por debajo de los límites autorizados en el aire emitido. En algunos casos existe la necesidad de hacer un post-quemado de la mezcla gas-vapor de agua que sale del evaporador para lograr la destrucción de emisiones de COVs que se arrastran durante el proceso de evaporación, de tal manera que la cantidad requerida de energía para combustión se aumenta con respecto a los cálculos termodinámicos normales. Sin embargo, una vez quemados los COVs las emisiones del proceso se limitan a vapor de agua y a un lodo espesado.

La energía necesaria para la evaporación del lixiviado puede ser suministrada por la combustión del metano generado en la misma planta de tratamiento de residuos, solucionando así, los dos principales problemas que tienen los rellenos sanitarios: emisión de gases y de lixiviado. Esta alternativa requiere de tecnología simple en los equipos que utiliza y bajos costos al ser comparada con otras tecnologías similares.

Tratamiento por Membranas: Las membranas más utilizadas en el tratamiento de lixiviados son las de ósmosis inversa ya que produce un efluente de acuerdo a las exigencias más estrictas de la normativa ambiental, con estos sistemas la reducción de contaminantes en casi todos los casos es elevada obteniéndose más de un 98 % de eliminación de DQO y nitrógeno amoniacal. Esta tecnología reporta excelentes rendimientos para la remoción de la mayoría de los contaminantes. En el caso de lixiviados, funciona mejor para lixiviados viejos o lixiviados que han sufrido un pretratamiento, por que trata eficientemente DBO_5 de valores bajos. Con el fin de aumentar la eficacia del tratamiento, la ósmosis inversa puede

combinarse con otros tipos de membrana; por ejemplo mediante un proceso combinado de membranas de ultrafiltración y ósmosis inversa, se logra una gran eliminación de DQO, color y conductividad (entre el 98-99%).

El mayor problema de los tratamientos con membranas es el fácil ensuciamiento de las mismas que hace que su vida útil sea reducida. Para evitar esto se ha empezado a utilizar las membranas vibratorias (VSEP) que permiten, simultáneamente al filtrado del lixiviado, la limpieza de la membrana aumentando de ese modo el tiempo de duración de la misma en condiciones de funcionamiento.

- **Evaluación Técnicas Alternativas para el Mejoramiento del Tren de Tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario Antanas.**

A continuación se definen los criterios utilizados para cada una de las cuatro dimensiones consideradas para el proceso de evaluación de tecnologías para el mejoramiento de la planta de tratamiento del relleno sanitario Antanas.

Escala de Valoración

100	Bueno
50	Regular
0	Malo

Dimensión Técnico-Económica:

Criterio 1: Complejidad de la tecnología.

La tecnología resulta compleja en el contexto regional de aplicación?

100	La tecnología no resulta compleja
50	La tecnología resulta compleja
0	La tecnología resulta muy compleja

Criterio 2: Grado de aceptación de la tecnología.

Que grado de aceptación tiene la tecnología?

100	La tecnología tiene un alto grado de aceptación
50	La tecnologías aceptada
0	La tecnología tiene un bajo grado de aceptación

Criterio 3: Capacidad de implementación de la tecnología.

Que capacidad de implementación tiene la tecnología?

100	La tecnología tiene alta capacidad de implementación
50	La tecnología tiene capacidad de implementación
0	La tecnología tiene baja capacidad de implementación

Criterio 4: Desarrollo local de tecnología.

La tecnología promueve actividades productivas directas o indirectas a partir de su desarrollo a nivel local?

100	La tecnología promueve el desarrollo de actividades productivas locales
50	La tecnología no promueve el desarrollo de actividades productivas locales
0	La tecnología perjudica el desarrollo de actividades productivas locales

Criterio 5: Uso de la tierra.

La tecnología compromete el uso de la tierra que pudiera ser destinado a otras actividades productivas de menor impacto?

100	La tecnología no compromete uso de la tierra
50	La tecnología compromete el uso de la tierra
0	La tecnología compromete el uso de la tierra y genera alto impacto en su entorno

Criterio 6: Costos.

La tecnología compite con costos específicos ($/kWh, $/kJ) respecto de tecnologías convencionales?

100	La tecnología presenta mejores costos específicos que las tecnologías convencionales
50	La tecnología compite con costos específicos de tecnologías convencionales
0	La tecnología presenta costos específicos superiores a los de tecnologías convencionales

***Dimensión Social*:**

Criterio 7: Cantidad del empleo.

La tecnología genera demanda de mano de obra de bajo nivel de especialización?

100	La tecnología genera alta demanda de mano de obra de bajo nivel de especialización
50	La tecnología genera demanda de mano de obra de bajo nivel de especialización
0	La tecnología no genera demanda de mano de obra de bajo nivel de especialización

Criterio 8: Empleo calidad.

La tecnología genera demanda de mano de obra calificada?

100	La tecnología genera alta demanda de mano de obra calificada
50	La tecnología genera demanda de mano de obra calificada
0	La tecnología no genera demanda de mano de obra calificada

Criterio 9: Salud.

La tecnología contribuye a mejorar la salud de la población?

100	La tecnología contribuye a mejorar la salud de la población
50	La tecnología no contribuye a mejorar la salud de la población
0	La tecnología puede afectar la salud de la población

***Dimensión Ambiental*:**

Criterio 10: GEIs.

La tecnología produce GEIs?

Se considera como escenario de línea de base la situación actual de manejo de RSU basada en basurales a cielo abierto, rellenos semi controlados y algunos rellenos sanitarios.

100	La tecnología no produce GEIs
50	La tecnología produce GEIs
0	La tecnología aumenta la generación de GEIs

Criterio 11: Calidad de aire.

La tecnología contribuye a mejorar la calidad de aire ambiente?

Se supone que la calidad de aire ambiente no es buena u óptima

100	La tecnología contribuye a mejorar la calidad de aire ambiente
50	La tecnología no modifica la calidad de aire ambiente
0	La tecnología empeora la calidad de aire ambiente

Criterio 12: Agua.

La tecnología mejora aspectos o contribuye a la protección de la calidad de aguas superficiales y/o subterráneas (CASy/oS)?

100	La tecnología contribuye a la protección de la CASy/oS
50	La tecnología no contribuye a la protección de la CASy/oS
0	La tecnología afecta la CASy/oS

Criterio 13: Energía.

La tecnología contribuye a disminuir el consumo de energía fósil?

100	La tecnología contribuye a disminuir el consumo de energía fósil
50	La tecnología no modifica el consumo de energía fósil
0	La tecnología incrementa el consumo de energía fósil

***Dimensión Política/Institucional*:**

Criterio 14: Aceptación social.

La tecnología cuenta con consenso social para su implementación y permanencia en el tiempo?

100	La tecnología cuenta con consenso social para su implementación y permanencia en el tiempo
50	La tecnología no cuenta con consenso social para su implementación y permanencia en el tiempo
0	La tecnología está en total disenso social para su implementación y permanencia en el tiempo

Criterio 15: Marco regulatorio.

La tecnología dispone de un marco regulatorio para su desarrollo e implementación?

100	La tecnología dispone de un marco regulatorio para su desarrollo e implementación
50	La tecnología dispone de algunas reglamentaciones para su desarrollo e implementación
0	La tecnología no dispone de reglamentaciones para su desarrollo e implementación

Criterio 16: Cumplimiento de la normativa ambiental.

La tecnología cumple con los máximos permisible de parámetros que la normativa ambiental promueve para vertimientos en cuerpos de agua superficiales.

100	La tecnología cumple con todos los máximos permisibles
50	La tecnología cumple con algunos de los máximos permisibles
0	La tecnología no cumple con ninguno los máximos permisibles

Criterio 17: Compatibilidad con programas existentes.

La tecnología es compatible con las políticas/estrategias existentes?

100	La tecnología es compatible con las políticas/estrategias existentes
50	La tecnología es compatible con algunas políticas/estrategias existentes
0	La tecnología es incompatible con las políticas/estrategias existentes

Tabla 1. Análisis Multicriterio de las tecnologías evaluadas para la adecuación de la planta de tratamiento de lixiviados

Tecnología			Sistemas Naturales	Evaporación	Sistemas de Membrana
Dimensión	**Criterio**				
Técnico-económica	**1**	Complejidad de la tecnología			
	2	Grado de aceptación de la tecnología			
	3	capacidad de Implementación de la tecnología			
	4	Desarrollo local de tecnología			
	5	Uso de la tierra			
	6	Costos específicos			
Social	**7**	Empleo (cantidad)			
	8	Empleo (Calidad)			
	9	Salud			
Ambiental	**10**	GEIs			
	11	Calidad de aire			
	12	Agua			
	13	Disminución uso energía fósil			
Político/Inst.	**14**	Acept. social			
	15	Marco regulatorio			
	16	Cumplimiento de la Normativa Ambiental			
	17	Compatibilidad c/programas existentes			

Agradecemos su valiosa colaboración.

A continuación se Anexan las fichas completas de la evaluación realizada a los diferentes actores que participaron en el análisis multicriterial.

Tabla A.10. Evaluación multicriterial – Actor Educación

Tecnología			Sistemas Naturales	Evaporación	Sistemas Membrana
Dimensión	**Criterio**				
Técnico-económica	**1**	Complejidad de la tecnología	100	100	100
	2	Grado de aceptación de la tecnología	50	100	100
	3	capacidad de Implementación de la tecnología	50	100	100
	4	Desarrollo local de tecnología	50	50	100
	5	Uso de la tierra	0	50	50
	6	Costos específicos	100	50	50
Subtotal Económico			**58,3**	**75,0**	**83,3**
Social	**7**	Empleo (cantidad)	50	50	100
	8	Empleo (Calidad)	50	50	100
	9	Salud	50	50	50
Subtotal Social			**50,0**	**50,0**	**83,3**
Ambiental	**10**	GEIs	50	50	100
	11	Calidad de aire	50	50	50
	12	Agua	50	50	50
	13	Disminución uso energía fósil	100	100	100
Subtotal Ambiental			**62,5**	**62,5**	**75**
Político/Inst.	**14**	Acept. social	50	50	100
	15	Marco regulatorio	100	100	100
	16	Cumplimiento de la Normativa Ambiental	100	100	100
	17	Compatibilidad c/programas existentes	50	100	100
Subtotal Político/Institucional			**75,0**	**87,5**	**100,0**
Total Normalizado			**61**	**69**	**85**

Tabla A.11. Evaluación multicriterial - Actor Institucional.

Tecnología			Sistemas Naturales	Evaporación	Sistemas Membrana
Dimensión	**Criterio**				
Técnico-económica	**1**	Complejidad de la tecnología	100	100	100
	2	Grado de aceptación de la tecnología	100	100	100
	3	capacidad de Implementación de la tecnología	100	100	100
	4	Desarrollo local de tecnología	100	100	100
	5	Uso de la tierra	0	50	100
	6	Costos específicos	0	100	100
Subtotal Económico			**66,7**	**91,7**	**100,0**
Social	**7**	Empleo (cantidad)	0	0	0
	8	Empleo (Calidad)	50	100	100
	9	Salud	100	100	100
Subtotal Social			**50,0**	**66,7**	**66,7**
Ambiental	**10**	GEIs	100	100	100
	11	Calidad de aire	100	100	100
	12	Agua	100	100	100
	13	Disminución uso energía fósil	100	100	100
Subtotal Ambiental			**100**	**100**	**100**
Político/Inst.	**14**	Acept. social	100	100	100
	15	Marco regulatorio	100	100	100
	16	Cumplimiento de la Normativa Ambiental	100	100	100
	17	Compatibilidad c/programas existentes	100	100	100
Subtotal Político/Institucional			**100,0**	**100,0**	**100,0**
Total Normalizado			**79**	**90**	**92**

Tabla A.12 Evaluación multicriterial - Actor Técnico/económico

Tecnología			Sistemas Naturales	Evaporación	Sistemas Membrana
Dimensión	**Criterio**				
Técnico-económica	**1**	Complejidad de la tecnología	0	50	100
	2	Grado de aceptación de la tecnología	0	0	100
	3	capacidad de Implementación de la tecnología	0	100	100
	4	Desarrollo local de tecnología	50	50	50
	5	Uso de la tierra	0	50	50
	6	Costos específicos	50	0	0
Subtotal Económico			**16,7**	**41,7**	**66,7**
Social	**7**	Empleo (cantidad)	50	50	0
	8	Empleo (Calidad)	50	50	100
	9	Salud	0	0	50
Subtotal Social			**33,3**	**33,3**	**50,0**
Ambiental	**10**	GEIs	50	0	100
	11	Calidad de aire	0	0	50
	12	Agua	0	0	50
	13	Disminución uso energía fósil	50	50	50
Subtotal Ambiental			**25**	**12,5**	**62,5**
Político/Inst.	**14**	Acept. social	50	50	50
	15	Marco regulatorio	100	100	100
	16	Cumplimiento de la Normativa Ambiental	100	100	100
	17	Compatibilidad c/programas existentes	100	100	100
Subtotal Político/Institucional			**87,5**	**87,5**	**87,5**
Total Normalizado			**41**	**44**	**67**

Tabla A.13. Evaluación multicriterial - Actor Político

Tecnología			Sistemas Naturales	Evaporación	Sistemas de Membrana
Dimensión	**Criterio**				
Técnico-económica	**1**	Complejidad de la tecnología	0	50	100
	2	Grado de aceptación de la tecnología	50	0	50
	3	capacidad de Implementación de la tecnología	50	50	50
	4	Desarrollo local de tecnología	0	0	0
	5	Uso de la tierra	0	50	100
	6	Costos específicos	100	50	100
Subtotal Económico			**33,3**	**33,3**	**66,7**
Social	**7**	Empleo (cantidad)	50	50	0
	8	Empleo (Calidad)	50	50	100
	9	Salud	50	0	50
Subtotal Social			**50,0**	**33,3**	**50,0**
Ambiental	**10**	GEIs	50	0	100
	11	Calidad de aire	50	0	50
	12	Agua	50	50	100
	13	Disminución uso energía fósil	100	50	100
Subtotal Ambiental			**62,5**	**25**	**87,5**
Político/Inst.	**14**	Acept. social	50	50	50
	15	Marco regulatorio	50	50	50
	16	Cumplimiento de la Normativa Ambiental	50	50	50
	17	Compatibilidad c/programas existentes	50	50	50
Subtotal Político/Institucional			**50,0**	**50,0**	**50,0**
Total Normalizado			**49**	**35**	**64**