

Elección y dimensionamiento de las unidades de tratamiento de aguas residuales industriales para el nuevo centro aeronautico MRO (*Maintenance, Repair, and Overhaul*) en Rionegro – Antioquia

Selection and sizing of industrial waste water treatment units required at the new maintenance, repair and overhaul (MRO) aircraft facility owned by Avianca S.A. In Rionegro – Antioquia

Cortés Ortiz William Giovanni, Ortiz Moreno Natalia, Muñoz Monroy Andrés

Resumen

En el presente artículo se plantea una alternativa de tratamiento para las aguas residuales industriales producto de las actividades de mantenimiento de Avianca S.A., que iniciarán su operación en el nuevo centro aeronáutico denominado MRO (*Maintenance, Repair, and Overhaul*) en Rionegro – Antioquia. Luego de determinar las características físicas y químicas del agua residual, se eligieron las mejores unidades o alternativas de tratamiento para someterlas a una metodología de evaluación que consideró costos de operación, mantenimiento, construcción y requerimientos de área, para posteriormente configurar un tren de tratamiento. Como resultado de la evaluación y dimensionamiento, se encontró que no era viable la construcción de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales, ya que el caudal de diseño arrojó un valor muy pequeño (0,296 L/s) afectando el dimensionamiento de las unidades, y por tanto, fue necesario diseñar otra alternativa de tratamiento. La opción planteada

Abstract

This paper proposes an alternative way to treat the industrial wastewater that will be coming out from the new Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) aircraft facility owned by Avianca S.A. in Rionegro, Antioquia. After determining the physicochemical characteristics of the wastewater, the most suitable treatment alternatives were chosen in order to evaluate the construction, operation and maintenance cost to build a fully functional treatment plan. As a result, it was determined that the construction of a wastewater treatment plant is not feasible, given that the estimated water flow rate (0.296 L/s) coming out of the facility is too small and this has a direct impact in the sizing of the units. For that reason an alternative solution proposes to treat the industrial wastewater coming out of the new MRO facility as a hazardous waste material.

Key words: Waste water, Waste eater treatment.

Recibido / Received: Noviembre 23 de 2015 Aprobado / Approved: Diciembre 01 de 2015

Tipo de artículo / Type of paper: Investigación Científica y Tecnológica terminada.

Afiliación Institucional de los autores / Institutional Affiliation of authors: Universidad El Bosque Facultad de Ingeniería Programa Ambiental.

Autor para comunicaciones / Author communications: Cortés Ortiz William Giovanni, Ortiz cortesgiovanni@unbosque.edu.co

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

consistió en optar por el manejo del agua residual industrial como residuo peligroso con un gestor autorizado para su tratamiento en Rionegro (Quimetales S.A.S.). Para ello fue necesario considerar el dimensionamiento de un tanque de recolección y almacenamiento cuyas medidas fueron: Alto: 3,5 m; ancho: 3,5 m; y profundidad: 2,4 m., cuyos materiales de construcción propuestos fueron los comunes para una obra civil: concreto, acero y ladrillo.

Palabras clave: Aguas residuales, tratamiento de desperdicios

Introducción

La elección y dimensionamiento de las unidades de tratamiento de aguas residuales industriales para el nuevo “Maintenance, Repair and Overhaul” (MRO) de Avianca en Rionegro – Colombia, surge dentro de las consideraciones de la empresa para iniciar sus actividades en el nuevo centro aeronáutico, cubriendo todos los temas que se relacionan con los aspectos e impactos ambientales más significativos por su operación.

Las actividades hoy desarrolladas para el mantenimiento de las aeronaves de Avianca, tienen lugar en el Terminal Puente Aéreo, cuya infraestructura, especialmente del alcantarillado, presenta muchas dificultades por su antigüedad, como la combinación de diferentes tipos de aguas residuales, y deficiencias en los puntos de inspección de vertimientos para aforar un caudal. Es por esto que se revitaliza la importancia de contar con sistemas actualizados y proyectados para el futuro.

El presente documento contiene la identificación de las áreas donde se generan vertimientos, sus caracterizaciones (estimación de caudales, determinación de las características físicas y químicas del agua residual) y la elección de la mejor alternativa para tratar las aguas de estudio, bajo una evaluación diseñada para considerar costos y requerimientos de área, con base en factores ponderados que tienden a hacer más objetiva la selección de la tecnología, herramientas o del tren de tratamiento de las aguas residuales.

La investigación previa a la elección de cualquier tratamiento del agua, permite ahorrar costos de inversión y de mantenimiento a un tratamiento que no se adecúa

a las características del agua residual, lo cual es hoy un problema fundamental en América Latina (Noyola, Morgan - Sagastume, & Güereca, 2013).

Con el objetivo de contribuir al cambio necesario para el desarrollo sostenible, este artículo busca ser un apoyo para los responsables de la toma de decisiones en lo que respecta al tratamiento de aguas residuales en el ámbito industrial. Para ello se debe contar con los criterios para elegir adecuadamente una tecnología que resuelva el problema del manejo de las aguas residuales.

Materiales y métodos

En este apartado se presentará la metodología empleada en la investigación para encontrar las áreas generadoras de vertimientos, los caudales y las características fisico-químicas de los mismos, así como la metodología para la evaluación y elección de las unidades de tratamiento para las aguas residuales identificadas.

Identificación de áreas generadoras de vertimientos

Para la identificación de las áreas generadoras de vertimientos se elaboró una matriz con el fin de: A. Identificar la ubicación espacial del área en las instalaciones del Terminal Puente Aéreo. B. Especificar su traslado al MRO para su posterior inclusión en los cálculos y proyecciones en el dimensionamiento del tratamiento. C. Determinar si su actividad genera un “vertimiento significativo” (si la actividad genera algún caudal de vertimiento y emplea

sustancias químicas de interés de acuerdo con la Resolución colombiana 631 de 2015), y D. El término control que se incluye con el fin de determinar si existirá un mecanismo de control en la fuente de generación del vertimiento que lo prevenga y que por lo tanto no llegue al tratamiento.

Estimación de caudales

Se realizaron mediciones en campo de los caudales experimentales generados en las áreas de interés resultantes, teniendo en cuenta el equipo o herramienta que se emplea en cada área, el tiempo que tardó en llenarse un contenedor, y el volumen del mismo. Para los caudales experimentales se encontró la desviación estándar y el coeficiente de variación de los diferentes ensayos de medición, para verificar su homogeneidad y su precisión. Posterior a esto, los caudales experimentales fueron comparados con los caudales teóricos para hallar un error porcentual.

Análisis de la calidad del agua

Para determinar las características fisicoquímicas del agua residual en estudio, se tuvo en cuenta el histórico de monitoreos que Avianca ha realizado anualmente desde el año 2008 con *Ivonne Bernier Laboratorio LTDA.*, para los puntos donde confluyen las aguas residuales de interés que aplican a la investigación. Se encontró un promedio para cada parámetro y posteriormente se comparó con la normatividad (Resolución 631 de 2015).

Elección de la mejor alternativa de tratamiento

De acuerdo con una revisión bibliográfica se identificaron los mejores tratamientos de aguas residuales relativos a la actividad aeronáutica. De la revisión se eligieron los tratamientos que mejor porcentaje de remoción presentaran para cada parámetro, y se elaboró una calificación de los criterios: Costos de construcción, Costos de Operación y Mantenimiento, y Requerimientos de Área. A continuación se especifica con detalle cómo fueron evaluados estos criterios.

Costos de construcción

Se empleó una relación de costos de sistemas de tratamiento de aguas residuales propuesta por Romero Rojas

(2013), quien sugiere que el costo de inversión de un sistema depende de su localización y de los precios en el momento de su construcción; y que la relación de los costos actuales y pasados se expresa mediante “índices de costos de construcción”. En Estados Unidos, el índice de costos de construcción compilado por *Engineering News Record* asigna un valor a los costos de los diferentes años, es decir que presenta un histórico de índices de costos para poder calcular el costo del año presente (ecuación 1).

(1)

$$\text{Costo actual} = \frac{(\text{costo año de referencia})(\text{índice actual})}{(\text{índice del año de referencia})}$$

Para las unidades de tratamiento elegidas y estudiadas, se estimó el costo general de inversión, utilizando fórmulas de cálculo deducidas por la USEPA (citadas en Romero Rojas (2013)), que incluyen costos no constructivos de planeamiento, administración, legalización, ingeniería básica, e imprevistos. El valor está dado en dólares de enero de 1978, con base en el caudal tratado por cada proceso unitario individual. Con el cálculo obtenido del año de referencia, se utilizó la ecuación 4 para obtener el valor actual. Posteriormente se encontró el valor en pesos colombianos.

De acuerdo con los costos de inversión estimados para cada unidad de tratamiento, se asignó un valor de uno (1) a los tratamientos más costosos: entre los \$51'000.000 y \$189'000.000 en pesos colombianos. Se asignó un valor de dos (2), a los tratamientos cuyos costos fueron intermedios: entre \$21'000.000 y \$50'000.000 en pesos colombianos; y se asignó un valor de tres (3) a las unidades cuyos costos de inversión fueron más económicos: menores a \$10'000.000 a \$20'000.000.

Costos de operación y mantenimiento

Para la estimación de los costos de operación y mantenimiento se usaron también las fórmulas de cálculo de la USEPA, citadas en Romero Rojas (2013) y la ecuación 4 para hallar el costo actual.

De acuerdo con los costos de operación y mantenimiento estimados para cada unidad de tratamiento, se asignó un valor de uno (1) a los tratamientos más costosos: entre los \$6'000.000 y \$15'000.000 anuales, en pesos colombianos.

Se asignó un valor de dos (2), a los tratamientos cuyos costos fueron intermedios: entre \$4'000.000 y \$5'900.000 anuales, en pesos colombianos.

Se asignó un valor de tres (3) a las unidades cuyos costos de inversión fueron más económicos: entre los \$1'000.000 y los \$3'900.000 anuales, en pesos colombianos.

Los costos de operación y mantenimiento incluyen costos de insumos (reactivos), costos de la energía, gastos administrativos y de personal, y costos de refracciones y material de mantenimiento

Requerimientos de área

Para el presente estudio fue necesario tener en cuenta la poca disponibilidad de terreno. El sistema de tratamiento no puede superar los 90 m².

De acuerdo con lo consultado en la literatura, se estimó el área promedio que la unidad requiere, y así, se les asignó un valor de uno (1) a las unidades que requieren gran terreno, un valor de dos (2) si la necesidad de terreno es media, y un valor de tres (3) si el área requerida es pequeña.

Habiendo asignado un valor a los criterios anteriormente descritos a cada una de las unidades de tratamiento, se procede a identificar las mejores unidades que se pueden emplear por parámetro y seguidamente se construye una matriz de calificación por parámetro para ejecutar la ecuación 2, formulada para la evaluar las unidades en su totalidad:

(2)

$$\text{Calificación de la unidad} = 3\%R + CC + 2COP + 2A$$

Dónde:

%R: porcentaje de remoción

CC: Costos de construcción

COM: Costos de operación y mantenimiento

A: Área requerida

La calificación del criterio 'porcentaje de remoción' depende del parámetro que remueva, y por ello, su calificación entra en juego a partir de ahora, que se observarán las unidades de tratamiento de acuerdo con el parámetro que más remuevan. Se asignará un valor de uno (1), si la unidad remueve el parámetro entre el 1% y el 35%, dos (2), si la unidad remueve entre el 36% y el 70%, y se

asignará un valor de tres (3) si la unidad remueve entre el 71% y el 100%. Los porcentajes de remoción fueron tomados de la literatura, y se pueden observar a partir de la sección de Resultados, numeral D.

Según se observa en la ecuación 2, el valor del porcentaje de remoción se multiplica por un factor de 3, debido a que se considera el criterio más importante para evaluar y tomar la decisión. Los costos de operación y mantenimiento se multiplican por 2, a diferencia de los costos de construcción que no se multiplican por ningún factor, debido a que serán tenidos en cuenta una vez en el tiempo. En la presente investigación se dio más importancia a los costos asociados a la vida útil de la unidad, que a la inversión. Así mismo, el área requerida se multiplica por 2, ya que se considera muy importante no sobrepasar un total de 90 m².

Proyección del tratamiento elegido

De acuerdo con la evaluación de las unidades por parámetro, se elegirá el mejor sistema de tratamiento para las aguas residuales de estudio de acuerdo con la literatura, y se dimensionará para finalmente proyectar un esquema completo de tratamiento.

Resultados

Identificación de áreas generadoras de vertimientos

De cincuenta y tres (53) áreas establecidas en el Terminal Puente Aéreo, cincuenta y uno (51) se trasladarán al MRO Rionegro. Cinco (5) de estas áreas generan un caudal de vertimiento de las cuales tres (3), utilizan sustancias químicas de interés contempladas en la normatividad colombiana y no utilizarán algún mecanismo de control en la fuente.

Las tres áreas de interés finales son el casino, el lavado de aeronaves y el taller de Pruebas No Destructivas, denominado también taller de NDT por sus siglas en inglés (*Non Destructive Tests*).

Dentro de los planes para el manejo de las aguas residuales del MRO Rionegro, se contempló manejar por aparte el vertimiento del casino, direccionándolo hacia la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas

con la que cuenta el Aeropuerto Internacional José María Córdoba, debido a que cumple con las características requeridas para tratarla. De esta forma, el tratamiento a elegir debe estar basado en los caudales del lavado de aeronaves y del taller de NDT.

Lavado de aeronaves

En el lavado de las aeronaves se emplean diferentes sustancias químicas, principalmente para la remoción de sellantes y desengrasantes y para el enjuague general de los trenes de aterrizaje y otras secciones del avión.

Taller de NDT

El taller de Pruebas No Destructivas ó NDT (*Non Destructive Tests*), realiza inspecciones a los diferentes componentes de las aeronaves a través de diferentes métodos para detectar fisuras que intervengan en la seguridad de los vuelos. Dentro de los métodos de análisis se encuentra el de Tinta Penetrante, donde se utiliza tinta tipo 1 (fluorescente) método A (lavable con agua) de Magnaflux – Zyglo.

Para la inspección de los componentes, se aplica la tinta penetrante con brocha o aerosol, se deja treinta minutos para su completa penetración y se enjuaga el exceso de tinta. Este enjuague es lo que representa el vertimiento del área.

Estimación de caudales

Lavado de aeronaves

El contenedor empleado para hallar el caudal experimental tenía una capacidad de 16.05 L. Después de 5 ensayos, se determinó el tiempo (en minutos) en el que tardó el contenedor en llenarse. Con estos datos, volumen y tiempo, se estimó el caudal para cada ensayo, obteniendo un caudal promedio de 12.02 L/min.

De acuerdo con los datos de los ensayos anteriores, el promedio de caudales fue 12.02 L/min y la desviación estándar fue de ± 0.30 L/min. El rango en el que se encuentran los caudales estimados es 11.72 -12.30 L/min.

Con el caudal promedio se halló el coeficiente de variación, expresado en porcentaje, el cual resultó siendo de 2.5%. El caudal teórico utilizado para el cálculo del porcentaje de

error fue el encontrado en el manual de especificaciones técnicas de la hidrolavadora empleada para la actividad, el cual es de 15 L/min (4 gal/min) (Masisa: Equipos Profesionales de Limpieza, 2015). El porcentaje de error encontrado entre el caudal experimental y el caudal teórico fue del 20%.

Por otro lado, se halló el volumen promedio de agua generado por el lavado de aeronaves, utilizando un tiempo promedio de lavado observado en campo para el lavado de cada tipo de avión.

El volumen promedio generado por el lavado de las aeronaves es de 2777.94 L. Los aviones que más agua consumen son aquellos que tienen dimensiones más grandes: Airbus A330, con un promedio de 3972 L. La aeronave más pequeña, consume 61.5 L de agua en promedio.

Taller de NDT

Para el cálculo del caudal experimental se empleó el mismo método para hallar el caudal experimental del lavado de aeronaves. El contenedor utilizado para hallar el caudal experimental tenía una capacidad de 15 L.

El caudal promedio es de 5.74 L/min y la desviación estándar fue de ± 0.025 L/min. El rango en el que se encuentran los caudales estimados es 5.74 – 5.77 L/min. El coeficiente de variación fue de 0.43%.

Para el caudal teórico de esta actividad se tuvo en cuenta el libro de control y registro de las piezas y componentes que entran a inspección por tintas, para calcular la cantidad, por tipo, que fueron analizadas mensualmente en el año 2014 hasta junio de 2015. Se estimó la duración del lavado de las diferentes piezas y componentes, después de haber aplicado en ellos las tintas penetrantes, y habiendo calculado la cantidad de piezas y componentes que ingresaron, y el tiempo promedio de lavado para cada uno, se obtuvo un tiempo promedio mensual de lavado.

De acuerdo con el registro interno de residuos peligrosos manejados en Avianca, se determinó la cantidad de isotanques, y por lo tanto la cantidad total de tinta penetrante enviada mensualmente con el gestor, *Ecoprocesamiento Ltda.*, en el año 2014 hasta junio de 2015. Empleando el volumen de tinta manejada con el gestor mensualmente, y el tiempo promedio mensual de lavado, se estimó un caudal promedio, identificado como caudal teórico.

El caudal teórico para el taller de NDT, fue entonces de 3.7 L/min. El porcentaje de error resultante entre el caudal experimental y el teórico fue de 55.1%.

Debido a que los caudales experimentales hallados arrojaron desviaciones estándar que indican que los datos son homogéneos, y coeficientes de variación que demuestran que son datos precisos, se eligieron para los cálculos que posteriormente se realizarán. El tratamiento a elegir estará basado en la suma de los caudales del lavado de aeronaves y del taller de tintas:

$$\text{Caudal de diseño} = 12.02 \frac{\text{L}}{\text{min}} + 5.74 \frac{\text{L}}{\text{min}} = 17.76 \text{ L/min}$$

Análisis de la calidad del agua

De acuerdo con la revisión del historial de análisis físico-químicos, los valores promedio para cada parámetro de las aguas residuales “Lavado de Aeronaves + Tintas penetrantes” son como se enuncian en la tabla I, donde se muestra también su relación con la norma colombiana vigente sobre el tema y se establece el porcentaje de remoción necesario para cada parámetro:

Elección de la mejor alternativa de tratamiento

Se realizó el consolidado de los costos estimados de construcción, operación, mantenimiento, el aproximado del área requerida, por unidad de tratamiento, y además, el cálculo del puntaje otorgado para cada criterio según se explicó anteriormente en la metodología.

Con esta información consolidada como insumo, se calificaron las diferentes unidades por parámetro, introduciendo el término de porcentaje de remoción. Como resultado se obtuvo que para la remoción de grasas y aceites, la mejor unidad de tratamiento es la trampa de grasas, la cual fue evaluada junto con el separador API y la flotación DAF. Para la remoción de la DBO5 y la DQO se evaluó el filtro anaerobio, el reactor anaerobio de flujo ascendente UASB, el reactor biológico secuencial SBR, filtro percolador, lodos activados, biodiscos y lagunas aireadas. Las unidades que mejor calificación obtuvieron para la remoción de estos parámetros fueron los reactores UASB y SBR, y se eligió el reactor SBR debido a que presenta mayores porcentajes de remoción. Más adelante se encuentra que el reactor SBR

Tabla 1. Características aguas residuales “lavado de aeronaves + tinta penetrante”

Parámetro	Vertimiento: Lavado de aeronaves + tinta penetrante	Norma (Resolución 631 de 2015)	Porcentaje de remoción necesario: %
DBO5 (mg/L)	1211.7	50	95.8
DQO (mg/L)	9494.3	150	98.4
Fenoles (mg/L)	0.3	0.20	33.3
Grasas y aceites (mg/L)	108.2	10	90.8
pH (unidades)	10.1	6 a 9	10.9
DBO5 (mg/L)	1211.7	50	95.8
DQO (mg/L)	9494.3	150	98.4
Fenoles (mg/L)	0.3	0.20	33.3
Grasas y aceites (mg/L)	108.2	10	90.8
SAAM (mg/L)	21.2	Análisis y reporte = se espera llegar a los 20 mg/L	5.7
Sólidos sedimentables (mL/L)	0.9	1.0	Cumple con la norma
Sólidos suspendidos (mL/L)	984.1	50	94.9
Color (UPC)	389	Análisis y reporte = se espera llegar a 50 UPC	87.1

Fuente: Ortiz, N. 2015

resulta ser también la mejor unidad de tratamiento para la remoción de fenoles, frente al carbón activado y el ozono.

Para la remoción de SAAM, o sustancias activas al azul de metileno se encuentra que el carbón activado, el filtro percolador y los lodos activados obtuvieron los resultados más altos. Los lodos activados representan grandes costos de inversión. El filtro percolador presenta altos costos de operación y mantenimiento, al igual que el carbón activado. Debido a que el carbón activado se puede implementar en el reactor SBR y además remover fenoles, fue el tratamiento elegido. Los resultados más altos para la remoción de color fueron los del carbón activado, y los reactores UASB y SBR. Con esta calificación se comprueba que el carbón activado es el mejor lecho para el reactor SBR, ya que presenta porcentajes de remoción muy buenos y remueve casi todos los parámetros, junto con el reactor SBR; y finalmente, para los sólidos suspendidos se encuentra que el sedimentador es la mejor opción de tratamiento. En la tabla II se muestra el consolidado de esta evaluación.

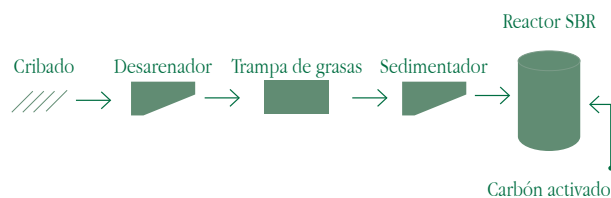
Tabla 2. Unidades de tratamiento seleccionadas

Parámetro a remover	Unidades de tratamiento elegidas
Aceites y grasas	Trampa de grasas
DBO5 y DQO	Reactor SBR
Fenoles	Reactor SBR
SAAM	Carbón activado
Color	Carbón activado
Sólidos suspendidos	Sedimentador

Ortiz, N. 2015

El tren de tratamiento resultante de la calificación es el siguiente:

Figura 1. Tren de tratamiento propuesto



Fuente: Ortiz, N. 2015

Dimensionamiento del tren de tratamiento

Como resultados se encontró que al aplicar las ecuaciones de diseño, las unidades presentaron dimensiones muy pequeñas. Por ejemplo, las rejillas de cribado tendrían un área transversal de 0.00049 m², y el ancho de canal sería de 0.032 m (3.2 cm). El desarenador presentó un área superficial de 0.024 m² y un área transversal de 5.8 x10⁻⁴ m². El sedimentador por su parte, presentó un área superficial de 0.8 m².

Debido a que el sedimentador necesita de las unidades anteriores para asegurar su buen funcionamiento, y éstas no son viables, la sedimentación no sería un proceso correcto, y según esto, el reactor SBR no funcionaría tampoco porque necesita obligatoriamente la remoción previa de grasas y aceites así como de los sólidos suspendidos.

Proyección del tratamiento elegido

Debido a los resultados del dimensionamiento, se propuso manejar las aguas provenientes del lavado de las aeronaves y del taller de NDT, como residuos peligrosos con un gestor autorizado. Esta propuesta no fue sólo por el tamaño de las unidades de tratamiento, sino por las características fisicoquímicas del agua y los grandes porcentajes de remoción que necesita para poder disponerla en un cuerpo de agua superficial. No es posible manejar las aguas del lavado combinadas con las de NDT, debido a que los gestores de residuos realizan un tratamiento diferente a cada una.

Para manejar las aguas del lavado de aeronaves como un residuo peligroso es necesario recolectar las aguas en un tanque de almacenamiento (construido bajo suelo, enterrado, al final del hangar, donde confluyan todos los canales perimetrales que recojan las aguas de lavado), el cual se dimensionó teniendo como base el volumen de agua generada por tipo de avión cuando se realiza el lavado, y el registro de lavados del año 2014. Con esto, se calculó la capacidad máxima del tanque, para que le empresa gestora haga la recolección cada 15 días, el cual resultó de 42,4 m³ de capacidad, teniendo en cuenta un volumen de emergencia de 25% sobre el volumen calculado, y muros de 25 cm de grosor. Sus dimensiones son: Largo: 3,5 m, ancho: 3,5 m y profundidad: 2,65 m (figura II).

Estimación de costos

El proveedor elegido para tratar el agua residual del lavado de aeronaves es Quimetales S.A.S. en Rionegro, Antioquia. La empresa recolectaría las aguas a través de un vehículo tipo carrotanque, con bomba de succión, y tratarían el agua a través de biorremediación, a \$508/Kg, lo que se traduciría en \$20'822.930/mes.

Para estimar los costos de construcción se tuvo en cuenta el área a descapotar, el volumen de tierra a excavar, la cantidad y los tipos de materiales de construcción y un angeo o malla filtrante para prevenir la acumulación de sólidos en el tanque, los cuales serían limpiados por el personal de aseo, tarea que es desarrollada normalmente y actualmente en las actividades del Terminal Puente Aéreo. El costo de construcción estimado fue de \$8'440.000.

La empresa Quimetales S.A.S., dentro de su cotización incluye el manejo de las tintas para incineración a \$1.600/Kg. El costo mensual, de acuerdo con el volumen de generación sería de \$5'156.000/mes.

Discusión de resultados

Evaluación de las características físicas y químicas del agua

De acuerdo con los resultados obtenidos de la estimación de caudales, se observa que para ambos casos, lavado de aeronaves y taller de NDT, el error porcentual entre los caudales teóricos y experimentales fue grande, resultando de 20% y 55.1%, respectivamente. Se asume que el error para el lavado de aeronaves, es por la antigüedad del equipo, cuyo caudal teórico no satisface a lo expuesto en el manual técnico. Y para el caso del taller de NDT, se encuentra que existen pérdidas en el momento del lavado de tinta, y por lo tanto, la cantidad de agua enviada mensualmente con el gestor, no satisface al caudal experimental comparado, pues gran cantidad de esa agua no alcanza a ser recolectada, direccionándose hacia alcantarillado.

Aunque los errores porcentuales hayan sido grandes, se observa que los valores de la desviación estándar para ambos casos fueron bajos, 0.30 L/min para el lavado de aeronaves, y 0.025 L/min para el taller de NDT. Esto

indica el grado de dispersión de los datos con respecto al promedio, y ambos son datos homogéneos, que no se desfasan del caudal medio calculado. Así mismo, los coeficientes de variación fueron de 2.50% para el lavado de aeronaves y 0.43% para las tintas; y según el DANE (2008), este porcentaje se puede interpretar como información muy precisa.

El lavado de las aeronaves requiere de sustancias químicas muy fuertes que en su composición tienen SAAM, y pueden llegar a incidir en el valor de la DBO y DQO. Como se pudo observar en los resultados de los análisis fisicoquímicos, el valor de la DQO (9494,3 mg/L), fue el parámetro que requirió de mayor porcentaje de remoción.

Para esto existen los ensayos de tratabilidad los cuales se consideran muy buena opción para determinar si es viable un diseño de planta o tratamiento de aguas residuales (Moncayo & Ayala, 2009). Estos estudios consisten en recrear a nivel de laboratorio el tratamiento por microorganismos para eliminar la materia oxidable (alimento) (tiempo de retención hidráulico) y la relación concentración de alimento vs. Cantidad de microorganismos.

Elección de la mejor alternativa de tratamiento

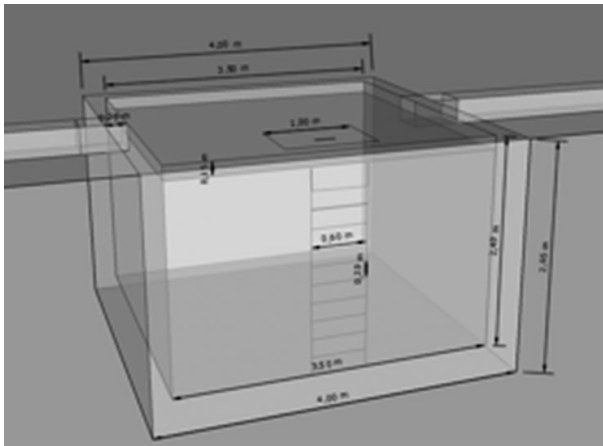
Aunque no se haya podido dimensionar, dentro de las unidades de tratamiento sometidas a evaluación, se encontró que el carbón activado es el mejor tratamiento ya que presenta una gran capacidad de adsorción de un amplio rango de contaminantes, dentro de los que incluye hidrocarburos, detergentes, tintes solubles, fenoles, derivados de grupos hidroxilos, etc.; contaminantes presentes en la caracterización del agua residual de estudio, y además, se adapta a casi cualquier unidad de tratamiento como lecho filtrante (Solís Fuentes, Morales Tellez, Ayala Tirado, & Durán de Bazúa, 2012). El problema de esta opción de tratamiento, es el costo de operación y mantenimiento elevado, debido a su extracción y cambio cuando se acumulen los residuos adsorbidos, y por la adquisición de nuevo carbón. Existe un método para recuperar el carbón a través de calentamiento, pero esta tecnología también es muy costosa.

En el momento de dimensionar se encontró que al ejecutar ecuaciones que involucraran el caudal, resul-

taban valores muy pequeños. En la literatura, o en ejemplos de plantas pequeñas, se utilizan caudales “pequeños” que en relación con el caudal manejado en esta investigación, son muy altos (mayores a 1.2 L/s). Este fue el factor obstructor para diseñar el tratamiento para el agua residual de estudio.

Los costos de construcción del tanque de almacenamiento fueron hallados a través de una cotización con “Depósito, Ferretería y Materiales Rionegro”, arrojando un valor de \$6'224.151,5, considerándose económico frente a los enunciados por Romero Rojas (2013) para la evaluación de las unidades de tratamiento. Sin embargo, los costos de su operación suben, porque la recolección con bomba succionadora, y el tratamiento de las aguas por biorremediación significarían \$20'000.000 mensuales aproximadamente, más la limpieza de la malla del tanque, aunque esta operación la realizaría el personal de aseo de Cohyndra.

Figura 2. Esquema del tanque de almacenamiento de aguas residuales propuesto



Fuente: Ortiz, N. 2015

Conclusiones

- Se realizó un reconocimiento de todas las áreas que comprenden el mantenimiento de aeronaves de Avianca y una identificación de aquellas que se trasladan al MRO Rionegro, encontrando como áreas de interés el casino, el taller de NDT y el área para lavado de aeronaves, ya que generan un vertimiento con sustancias químicas de interés de acuerdo con la Resolución 631 de 2015 y sin algún mecanismo de control en la fuente.

- La desviación estándar para los caudales experimentales del lavado de aeronaves y de NDT fueron de ± 0.30 y ± 0.025 L/min respectivamente. El coeficiente de variación los caudales experimentales fue de 2.5% para el lavado de aeronaves y de 0.43% para NDT. Estos datos numéricos determinaron que los valores son muy homogéneos, que no hay dispersión entre los datos con respecto al promedio, y que son valores muy precisos. Por tanto, fue confiable su uso en los cálculos de diseño posteriores.
- La revisión de los datos históricos de los análisis de laboratorio realizados en los distintos puntos de vertimiento permitió identificar que la DBO5 y la DQO, son los parámetros con mayor porcentaje de incumplimiento, siendo de 1211,7 y 9494,3 mg/L respectivamente, seguidos por los sólidos suspendidos y las grasas y aceites resultando de 984,1 y 108,2 mg/L respectivamente. La relación de estas características con la nueva norma (resolución 631 de 2015), muestra que las necesidades de remoción aumentaron, especialmente para la disposición en un cuerpo de agua superficial.
- La proyección de la propuesta final de tratamiento elegida para el agua residual de estudio es la ideal de acuerdo con los requerimientos normativos, de diseño, y de las mismas características del agua. No es posible dimensionar unidades de tratamiento de acuerdo con los parámetros establecidos en la literatura, y por lo tanto no se puede cumplir con las características físicas y químicas permisibles para disponer en un cuerpo de agua. El agua residual industrial del estudio presenta contaminantes de naturaleza no biodegradable, por lo que la mejor alternativa de tratamiento es su manejo como residuo peligroso, dando cumplimiento con el manejo del vertimiento generado en la operación de Avianca.

Agradecimientos

Este proyecto se realizó con el apoyo del profesor William Giovanni Cortés Ortiz y el ingeniero Andrés Muñoz Monroy, cuyas orientaciones y observaciones enriquecieron enormemente la elaboración de esta investigación. Igualmente, el apoyo del personal de mantenimiento de Avianca determinó el desarrollo de este proyecto.

Referencias

- [1] Araujo, I., Perruolo, T., Tärre, Y., Flores, K., Trujillo, A., Saules, L., & Yabroudi, S. (2006). Remoción de nutrientes en un reactor discontinuo secuencial. *Revista de ciencia y tecnología de América*, 31, 787-793.
- [2] Benavides, L. d., & Posada, R. E. (2004). Remoción de color de los lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda por adsorción sobre carbón activado. Manizales: Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Ingeniería y Arquitectura - Departamento de Ingeniería Química.
- [3] Bermúdez, R. C., Rodríguez, S., Martínez, M. d., & Terrym, A. I. (2007). Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para obtención de biogas. Cuba: Centro de Estudios de Biotecnología Industrial, Universidad de Oriente.
- [4] Berruela, J., & Castrillon, L. (1997). Efecto del N-NH₄⁺ sobre el tratamiento anaerobio de lixiviados de vertederos. *Ingeniería Química*.
- [5] DANE. (2008). Estimación e interpretación del coeficiente de variación de la encuesta cocensal: Censo General 2005 -CGRAL. Bogotá, Colombia: DANE.
- [6] Díez, M., Villouta, F., Montoya, M., Vidal, G., & Bomhardt, C. (26 de Noviembre de 2005). Tratamiento combinado de lodos activados de lecho fijo sumergido para tratar efluentes de celulosa kraft blanqueada. (A. d. Sarriá, Ed.) *Afinidad*. *Revista de química teórica y aplicada*, 515, 35-41.
- [7] González, Y., Rincón, N., López, F., & Díaz, A. (2010). Organic matter removal from the petroleum effluents by sequencing batch reactor (SBR). Maracaibo, Venezuela: *Revista Técnica de Ingeniería - Universidad de Zulia*.
- [8] Henry, G., & Heinke, G. (1999). *Ingeniería Ambiental*. Segunda edición. México D.F: Prentice Hall.
- [9] Jiménez Cisneros, B. E. (2001). La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. México, D.F.: Limusa Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA.
- [10] Lozano Rivas, W. (2012). *Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales*. Bogotá, D.C.: Universidad Antonio Nariño.
- [11] McGauhey, P. (1968). *Engineering Management of Water Quality*. McGraw Hill.
- [12] Moncayo, I., & Ayala, D. (2009). Estudio de turbididad biológica de aguas residuales domésticas para optimizar resultados a escala real. Quito, Pichincha, Ecuador: Soluciones Ambientales.
- [13] Varila Quiroga, J. A., & Díaz López, F. E. (Diciembre de 2008). Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio. *Revista de Tecnología*, 7, 21-28.
- [14] Noyola, A., Morgan - Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales: Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [15] Parra Rodríguez, L. M. (2006). Operación de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) hasta alcanzar el estado estable. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- [16] Piris da Motta, M. R. (2008). Eficiencias de lagunas aireadas aeróbicas durante el período inicial de funcionamiento. Universidad Nacional de Misiones, Cátedra de Estadística. Misiones, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales.
- [17] Rancaño, A. (2004). Caracterización de la biodegradación de las aguas residuales de la industria conservera, en reactores discontinuo secuenciales. *Tecnología del agua: captación, tratamiento, distribución y depuración del agua y su impacto medioambiental*, 68-77.
- [18] Romero Rojas, J. A. (2013). *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- [19] Solís Fuentes, J. A., Morales Tellez, M., Ayala Tirado, R. C., & Durán de Bazúa, M. d. (2012). Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 36-48.

- [20] Zaldumbide Ortiz, F. X., & Barrera Díaz, C. (2009). Remoción de Color en Aguas Contaminadas con tintas, pretratadas electroquímicamente mediante Ozono en medio alcalino. Quivera - Universidad Autónoma del Estado de México, 68-76.
- [21] Tchobanoglous, G. (1974). Wastewater Treatment for Small Communities. Public Works.
- [22] Navarro Sarmiento, J. D. (2008). Diseño, construcción y evaluación de filtros anaerobios de flujo ascendente para el tratamiento de las aguas residuales de la lavandería y del casino en el campamento Payoa de Petrosantander (Colombia) Inc. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Especialización en Química Ambiental.

Los Autores



Natalia Ortiz Moreno

Ingeniera Ambiental de la Universidad El Bosque. Actualmente se desempeña como Gestora Ambiental en JE Jaimes Ingenieros S.A. coordinando el Sistema de Gestión Ambiental que los diferentes proyectos de transformación y transmisión de energía adjudicados demandan.

Cuenta con experiencia en el tratamiento de aguas residuales industriales, gestión integral de residuos peligrosos y convencionales, además de apoyar el sistema de gestión ambiental durante un año en Avianca S.A. Como expectativas académicas y profesionales espera continuar la línea de investigación en agua potable y saneamiento básico con énfasis en tecnología para el tratamiento de aguas residuales.



William Giovanni Cortés Ortiz

Licenciado en Química, Magister en Ciencias Ambientales y actualmente estudiante de Doctorado en Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales; enfoca sus estudios en el tratamiento de aguas y aprovechamiento de residuos agroindustriales mediante procesos catalíticos, con el fin de conseguir materias primas útiles para la obtención de productos químicos de interés comercial.



Andrés Muñoz Monroy

Ingeniero Ambiental y Sanitario, especialista en Higiene y Seguridad Industrial, con 11 años de experiencia en sistemas de gestión ambiental. Actualmente desempeñándose como Gerente de Medio Ambiente para Avianca Holdings, cuya misión es liderar la implementación de la estrategia de desarrollo sostenible en cada uno de los países donde opera la compañía.