

DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN EL LAVADO DE EQUIPOS
LITOGRAFICOS Y SELECCIÓN DE UNA ESTRATEGIA PARA EL TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN CARBOLSAS LTDA

JHON ALEJANDRO DIAZ GONZALEZ

ANDRÉS FELIPE RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2018

DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN EL LAVADO DE EQUIPOS
LITOGRAFICOS Y SELECCIÓN DE UNA ESTRATEGIA PARA EL TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN CARBOLSAS LTDA

JHON ALEJANDRO DIAZ GONZALEZ

ANDRÉS FELIPE RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ

Trabajo de grado presentado para optar al título de: Ingeniero Químico

Directora

Prof. LUZ MARINA BALLESTEROS RUEDA

Ph D. Electroquímica ciencia y tecnología

Codirectores

HERNANDO GUERRERO AMAYA

Ph D. Electroquímica ciencia y tecnología

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2018

DEDICATORIA

A Dios y la Virgen de Chiquinquirá por permitirme alcanzar una meta profesional más en mi vida y que será el comienzo de la gran búsqueda de mis sueños.

A mi madre Martha Hernández Suárez por acompañar y apoyar cada paso dado en este camino y brindarme su amor incondicional.

A mi padre que desde el cielo me acompañó y me seguirá acompañando en cada paso que dé en mi vida.

A mis abuelos y demás miembros de mi familia que con su amor y apoyo incondicional me dieron fuerza para la consecución de este gran logro personal.

A mi gran amigo y compañero de tesis Jhon Alejandro Diaz por su apoyo y compañía durante este largo camino llamado universidad.

Andres Felipe Rodríguez Hernández

DEDICATORIA

A Dios y la Virgen María por escuchar todas mis oraciones, por acompañarme en cada paso que daba, por darme fortaleza, sabiduría y paciencia para lograr este gran sueño.

A mis padres Gloria Gonzalez y Miguel Diaz, a mis hermanos Luis Miguel Diaz y Yesenia Diaz, a mi sobrinita Natalia Diaz, porque gracias a todos ellos estoy donde estoy, con cada llamada diaria hacían que no me rindiera y no me sintiera solo, por sus enseñanzas, por el ejemplo que me daban, por ser las personas que más amo en mi vida y por ser el motivo para lograr todos mis sueños.

A mi abuela Teresa Bernal y toda mi familia, por su apoyo incondicional, por la unión familiar que tanto me inspira a seguir adelante y que logran en mí una felicidad día a día.

A mi compañero de proyecto Andrés Rodríguez, por la compañía, por sus consejos, por inspirarme a seguir creciendo día a día como persona y como ingeniero.

A todos ellos con mucho amor y cariño les dedico este trabajo que es fruto de todos mis esfuerzos, que es el inicio para emprender mi camino como Ingeniero Químico, y que para mí es un sueño cumplido.

Jhon Alejandro Diaz Gonzalez

AGRADECIMIENTOS

A Carbolsas LTDA en especial a Myriam Caicedo gerente de la empresa, por permitirnos realizar esta práctica.

A nuestra directora de proyecto, Luz Marina Ballesteros, por encaminarnos a lograr esta meta con su conocimiento, orientación y dedicación.

A la directora de la planta de producción Sandra Prada y el ingeniero de producción Jaime Díaz, por ser nuestros orientadores y colaboradores en la planta de producción de la empresa.

A los trabajadores en general y en especial a los litógrafos por permitir realizar todas nuestras pruebas y ayudarnos en cada problema presentado con su experiencia y conocimiento.

A los profesores Hernando Guerrero y Enrique Mejía, por su invaluable colaboración en las labores de investigación.

Al centro de investigaciones en catálisis (CICAT), por brindarnos espacios para realizar nuestro proyecto.

A los miembros del Laboratorio de Espectroscopía Atómica molecular (LEAM), por asesorarnos en cada dificultad presentada y ofrecernos espacios y equipos.

A la Escuela de Ingeniería química de nuestra alma máter y los miembros de su laboratorio por su invaluable colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A los integrantes del laboratorio químico de consultas industriales de la Universidad Industrial de Santander.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	23
1. ALCANCE	33
2. METODOLOGÍA	34
2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	34
2.2. BALANCE Y DISMINUCIÓN DEL AGUA RESIDUAL	35
2.3. TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL.....	35
2.3.1. Prueba de Jarras.....	36
2.3.2. Selección del medio filtrante.	36
2.3.3. Evaluación de la corrosividad y reactividad de los lodos residuales	37
2.3.4. Evaluación de la actividad fotocatalítica con TiO ₂	38
2.3.5. Evaluación de la adsorción en el filtro de carbón activado.....	39
2.4. ANÁLISIS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA.....	39

3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	40
3.1.	DISMINUCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EMPLEADO PARA LOS PROCESOS DE LAVADO	40
3.2.	AGUA RESIDUAL DE CARBOLSAS LTDA	42
3.3.	TRATAMIENTO FASE PESADA.....	45
3.3.1.	Coagulación.....	45
3.3.1.1.	Dosis óptima de coagulante.....	45
3.3.1.2.	pH óptimo para cada coagulante	46
3.3.1.3.	Separación de lodos resultantes.....	47
3.3.1.4.	Análisis de corrosividad y reactividad de lodos residuales.....	47
3.3.2.	Fotocatálisis con TiO ₂	49
3.3.3.	Filtración con Carbón activado.....	51
3.4.	SELECCIÓN DE TRATAMIENTO.....	52
4.	CONCLUSIONES.....	55
5.	RECOMENDACIONES.....	56

BIBLIOGRAFIA.....57

ANEXOS58

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Estrategias planteadas para la disminución del consumo de agua.....	40
Tabla 2. Resultados para la dosis óptima de cada coagulante	45
Tabla 3. Selección de medio filtrante	47
Tabla 4. Resultados de la prueba de corrosividad para testigos empleados	49
Tabla 5. Resultados para los parámetros de caracterización o seguimiento	52
Tabla 6. Cuantificación inicial del recurso hídrico empleado en Carbolsas LTDA .	58
Tabla 7. Seguimiento de la estrategia seleccionada para la disminución del recurso hídrico	62
Tabla 8. Compuestos presentes en el efluente residual	63
Tabla 9. Prueba de jarras para el sulfato de aluminio.....	67
Tabla 10. Prueba de jarras para el policloruro de aluminio	68
Tabla 11. Prueba de jarras para el cloruro férrico.....	68
Tabla 12. pH óptimo para el sulfato de aluminio.....	69

Tabla 13. pH óptimo para el policloruro de aluminio	69
Tabla 14. pH óptimo para el cloruro férrico	69
Tabla 15. Costos operacionales de tratamiento con cada coagulante.....	70
Tabla 16. Lotes realizados para la generación de lodo residual	71
Tabla 17. Curva de calibración para los procesos fotocatalíticos	74

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso de impresión litográfica en Carbolsas LTDA.....	24
Figura 2. Tipos de tratamientos de aguas residuales	26
Figura 3. Proceso de coagulación.....	27
Figura 4. Fotocatálisis heterogénea; a) Esquema del proceso. b) Mecanismo de reacción	29
Figura 5. Adsorción con carbón activado.....	30
Figura 6. Metodología experimental.....	34
Figura 7. Proceso de lavado inicial en los procesos de impresión.....	35
Figura 8. Esquema de tratamiento del agua residual de Carbolsas LTDA	36
Figura 9. Consumo de recurso hídrico pre y post estrategia	42
Figura 10. Comparación cualitativa de espectros IR para fase liviana.....	43
Figura 11. Comparación cualitativa de espectros IR para fase pesada	43

Figura 12. Separación y adecuación de fase pesada. a y b) Separación de fases del agua residual de Carbolsas LTDA, c) Trampa grasa para la fase pesada	44
Figura 13. a) Dosis óptima para cada coagulante b) pH óptimo para cada coagulante	46
Figura 14. a) Prueba de corrosividad a testigos. b) Prueba de reactividad a lodos ..	48
Figura 15. Resultados de la adsorción y degradación fotocatalítica con TiO ₂	51
Figura 16. Seguimiento de la turbiedad en un filtro de carbón activado	52
Figura 17. Remoción de color en el tratamiento	54
Figura 18. Ficha guía para la implementación de la estrategia 1	59
Figura 19. Ficha guía para la implementación de la estrategia 2	60
Figura 20. Ficha guía para la implementación de la estrategia 3	61
Figura 21. Prueba 1 de solubilidad Clean Wash- Agua	64
Figura 22. Prueba 2 de solubilidad Goma Proysol- Agua	64
Figura 23. Prueba 3 de solubilidad Clean Wash- Tinta	65
Figura 24. Prueba 4 de solubilidad Tinta- Agua	65
Figura 25. Prueba 5 de solubilidad de todos los componentes	66

Figura 26. Procedimiento para el análisis de la corrosividad del lodo residual	73
Figura 27. Curva de calibración para el pico presentado en 485nm	75
Figura 28. Curva de calibración para el pico presentado en 600nm	75
Figura 29. Registro fotográfico del trabajo realizado en Carbolsas LTDA.	81
Figura 30. Continuación registro fotográfico trabajo realizado Carbolsas LTDA....	82

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Disminución del recurso hídrico	58
ANEXO B. Compuestos, solubilidad, y análisis de fases presentes en el agua residual de Carbolsas LTDA.....	63
ANEXO C. Prueba de jarras	67
ANEXO D. Análisis de corrosividad y reactividad de lodos residuales.	71
ANEXO E. Degradación fotocatalítica con Dióxido de Titanio.	74
ANEXO F. Caracterizaciones realizadas al agua residual de Carbolsas LTDA.....	76
ANEXO G. Registro fotográfico del trabajo realizado en Carbolsas LTDA.	81

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM	American Society of Testing Materials
CICAT	Centro de investigación en catálisis
DBO₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de oxígeno
HTP	Hidrocarburos totales
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
LEAM	Laboratorio de espectroscopia atómica molecular
LTDA	Sociedad Limitada
MSDS	Material safety data sheet
NTU	Unidades nefelométricas
PAC	Policloruro de aluminio
PAOs	Procesos de oxidación avanzada
PTG	Parque tecnológico Guatiguará
rpm	Revoluciones por minuto

Rxn	Reacción
SST	Sólidos suspendidos totales
SSED	Sólidos sedimentables
UIS	Universidad Industrial de Santander
UV-VIS	Ultravioleta visible

RESUMEN

TÍTULO: DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN EL LAVADO DE EQUIPOS LITOGRAFICOS Y SELECCIÓN DE UNA ESTRATEGIA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN CARBOLSAS LTDA*

AUTORES: JHON ALEJANDRO DIAZ GONZALEZ, ANDRÉS FELIPE RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ.**

PALABRAS CLAVES: DISMINUCIÓN, TRATAMIENTO, COAGULACIÓN, FOTOCATALISIS, TiO₂, ADSORCIÓN, CARBÓN ACTIVADO.

DESCRIPCIÓN:

Este proyecto, tiene como principal objetivo establecer una estrategia para la disminución y tratamiento de las aguas residuales generadas por la empresa Carbolsas LTDA, por medio de tratamientos primarios como la coagulación y terciarios como la fotocatalisis con TiO₂ o la adsorción con carbón activado.

El desarrollo del proyecto cuenta con un reconocimiento inicial de los procesos de lavado donde se generan los efluentes residuales. En base a lo documentado, se plantean 3 estrategias para la disminución del consumo de agua obteniéndose una reducción del 64,31%. Luego, se lleva a cabo una prueba de jarras para tres coagulantes diferentes: Sulfato de aluminio, cloruro férrico y PAC con el propósito de determinar una concentración y pH óptimo para cada uno de ellos. Se selecciona el PAC (1,93-2,54 g/L) debido a la turbidez del sobrenadante obtenido y su poca dependencia al pH. Para los lodos residuales generados en el tratamiento primario, se selecciona el dril súper 8 como medio filtrante más adecuado y se analiza la corrosividad y reactividad de estos. En cuanto a los tratamientos terciarios, estos se realizan al sobrenadante que resulta del proceso de coagulación. La fotocatalisis con TiO₂ se evalúa mediante espectroscopia UV-VIS para unas concentraciones de catalizador de 0,02 g/L, 0,016 g/L y 0,013 g/L. La adsorción con carbón activado se ejecuta mediante un filtro a nivel laboratorio al cual se le realiza un seguimiento mediante turbidez hasta su saturación.

Por último, la selección del tratamiento final de las aguas residuales de Carbolsas LTDA se realiza por medio del comportamiento de parámetros como DBO₅, DQO, Grasas y aceites, SST, SSED, y HTP. En base a la legislación, la adsorción no cumple con sólo dos parámetros (DQO y DBO₅) y presenta porcentajes de remoción superiores al 90% por lo cual es seleccionado como el tratamiento terciario a seguir.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora: Luz Marina Ballesteros Rueda, Ingeniera Química, M. Sc., PhD.

ABSTRACT

TITLE: DECREASE OF WATER CONSUMPTION IN THE WASHING OF LITHOGRAPHIC EQUIPMENT AND SELECTION OF A STRATEGY FOR THE TREATMENT OF RESIDUAL WATERS GENERATED IN CARBOLSAS LTDA *

AUTHORS: JHON ALEJANDRO DIAZ GONZALEZ, ANDRÉS FELIPE RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ.**

KEYWORDS: DECREASE, TREATMENT, COAGULATION, PHOTOCATALYSIS, TiO_2 , ADSORPTION, ACTIVATED CARBON.

DESCRIPTION:

The main objective of this project is to establish a strategy for the decrease and treatment of wastewater generated by the company Carbolsas LTDA, by means of primary treatments such as coagulation and tertiary treatments such as photocatalysis with TiO_2 or adsorption with activated carbon.

The development of the project has an initial recognition of the washing processes where residual effluents are generated. Based on documented information, three strategies are proposed for the reduction of water, obtaining a reduction of 64,31%. Then, a jar test is made for three different coagulants: Aluminum sulfate, ferric chloride and PAC with the purpose of determining an optimal concentration and pH for each one of them. The PAC is selected (1,93-2,54 g / L) due to the turbidity of the supernatant obtained and its low pH dependence. For the residual sludge generated in the primary treatment, Super 8 drill is selected as the most suitable filtering medium and the corrosivity and reactivity of these are analyzed. As for the tertiary treatments, these are made to the supernatant that results from the coagulation process. The photocatalysis with TiO_2 is evaluated by UV-VIS spectroscopy for catalyst concentrations of 0,02 g/L, 0,016 g/L and 0,013g/L. The adsorption with activated carbon is done through a laboratory scale filter which is monitored by turbidity until saturation.

Finally, the selection of the final treatment to the wastewater of Carbolsas LTDA is carried out through the behavior of parameters such as DBO_5 , DQO, SST, SSED, fats and oils and HTP. Based on the legislation, the adsorption does not comply with only two parameters (DQO and DBO_5) and has removal percentages higher than 90%, which is why it is selected as the tertiary treatment to follow.

* Final project

**Physical-Chemical Engineering Department. Chemical Engineering School. Director: Luz Marina Ballesteros Rueda, Chemical Engineer, M. Sc., PhD.

INTRODUCCIÓN

Dentro del sector de las artes gráficas se encuentra Carbolsas LTDA, una empresa fundada en 1984, ubicada en Bucaramanga, Santander. Inicialmente, Carbolsas LTDA se dedicó a la comercialización de cajas de cartón, bolsas y rollos de papel; a través de los años y con las necesidades propias del mercado se incursionó en la industria de las artes gráficas imprimiendo empaques con máquinas tipográficas, convirtiéndose en una empresa especializada para dicha labor. Posteriormente, se encarga de todo el proceso de elaboración de empaques de cartón utilizando la litografía como su método actual de impresión. La entidad cuenta con una capacidad de producción mensual de 1 millón de cajas en condiciones de operabilidad normal y es reconocida a nivel nacional por cubrir las necesidades de sus clientes en diferentes líneas de producción (Calzado, alimentos, confección y de lujo). Además, cuenta con certificación de la norma ISO 9000 de INCONTEC¹.

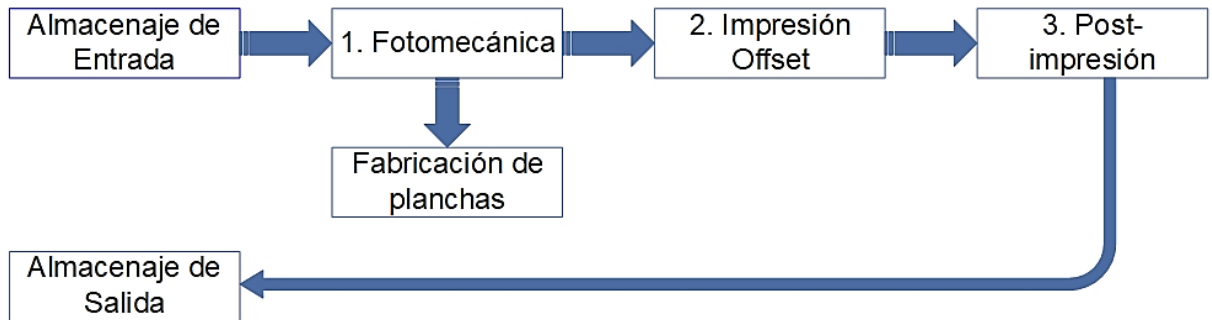
En Carbolsas LTDA el proceso de impresión litográfica se puede dividir en 3 etapas como se muestra en la **Figura 1**, la etapa preliminar comprende la fotomecánica donde se fabrica una plancha mediante procedimientos de toma reprográfica, allí se obtienen un positivo y negativo traslúcidos, en la etapa de impresión Offset las planchas son dispuestas en un cilindro rotatorio, donde la imagen se transfiere a un medio conformado por una solución de humidificación con agua y tinta, la imagen es transferida desde una capa a un sustrato, seguido de su secado y en la etapa final de post-impresión ocurre el cortado, plegado y embalaje del producto impreso^{2 3}.

¹ ENTREVISTA con Sandra Prada. Directora planta de producción Carbolsas LTDA. Bucaramanga, Santander, 12 de marzo de 2018.

² FUNDACIÓN ENTORNO EMPRESA Y MEDIO AMBIENTE. Informe Medioambiental del Sector Artes Gráficas. Capítulo 1: Artes Gráficas. Madrid (España) : s.n., 1988. p. 2-5

³ COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. Guía para el control y prevención de la contaminación industrial, 1999. p. 3-6.

Figura 1. Proceso de impresión litográfica en Carbolsas LTDA



Durante la etapa de impresión se utiliza agua proveniente del acueducto para el lavado de los equipos, en Carbolsas LTDA el consumo de agua aproximado es de 644 L mensuales, generando elevados volúmenes de agua residual que contiene restos de tintas, disolventes y productos de limpieza que son causantes de un alto contenido de colorantes, carga orgánica y considerables niveles de toxicidad en el agua residual. Estos residuos generados resultan ser no adecuados para el vertimiento. Por tanto, Carbolsas LTDA busca reducir el consumo mensual de agua y realizar un correcto manejo de los efluentes, cumpliendo con los requerimientos exigidos en la resolución 631 de 2015 del ministerio de Ambiente y desarrollo de Colombia⁴.

La necesidad de Carbolsas LTDA para mejorar la calidad de sus vertimientos es fundamentada en la premisa que el agua es el elemento más importante para la vida de cualquier ser vivo y es esta la principal razón para tener una preocupación por el cuidado de esta después de cualquier tipo de uso, una muestra de esto es la inclusión del objetivo “Agua limpia y saneamiento” dentro de los 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en el mundo por parte del programa de las naciones unidas para

⁴ IDEAM. Estrategias para la prevención y minimización de residuos peligrosos en los sectores de artes gráficas y metalmecánico. [En línea]. 2008, p. 13-15. (Recuperado en 20 de marzo de 2018.) Disponible en <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=6038>.

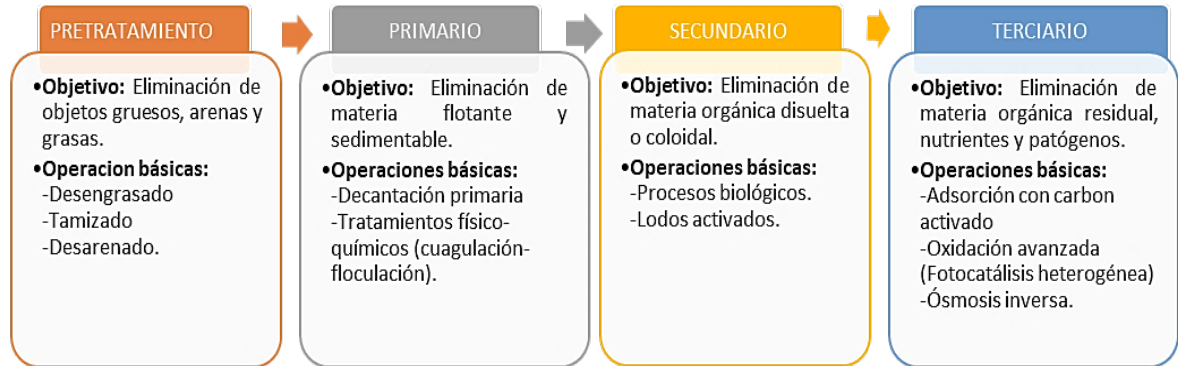
el desarrollo, siendo este uno de los motores para el cumplimiento de otros como lo son salud, bienestar, clima, entre otros⁵. Por lo anterior, el 16 de diciembre de 2005, el Consejo Nacional Ambiental aprobó la Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos en Colombia. En ésta, se ha establecido como prioridad ambiental lograr la prevención y reducción de los residuos o desechos peligrosos generados en el país, a través de la intervención en sectores altamente generadores de este tipo de residuos, dentro de los cuales se encuentra el sector de artes gráficas. Por lo tanto, Carbolsas LTDA comprometida con el desarrollo sostenible ha decidido evaluar diferentes alternativas de tratamiento de las aguas residuales generadas⁶.

El tratamiento de las aguas residuales abarca una serie de procesos que involucran la integración de técnicas de carácter biológico, físico y químico en simultáneo como se muestra en la **Figura 2**, el fin de dichos tratamientos es remover o reducir contaminantes que generan en el agua alta Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) y Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos suspendidos, partículas de color, microorganismos, gases disueltos, minerales y otros. En base a lo anterior, se ha centrado la atención en estudiar diferentes estrategias altamente efectivas para el tratamiento del agua residual generada en Carbolsas LTDA, como es el caso de la decantación, coagulación y filtración como tratamiento primario y la fotocatalisis heterogénea o adsorción con carbón activado como tratamiento terciario.

⁵ PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO. Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento. [En línea]. (Recuperado en 20 de marzo de 2018.) Disponible en <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html>.

⁶ MINAMBIENTE. Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos. [En línea]. Diciembre de 2005, p. 7-9. (Recuperado en 20 de marzo de 2018.) Disponible en http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosAmbientalesySectorialyUrbana/pdf/Polit%C3%ACcas_de_la_Direcci%C3%B3n/Pol%C3%ADtica_Ambiental_para_la_Gesti%C3%B3n_Integral_de_Residuos_o_Desechos_Peligrosos.pdf.

Figura 2.Tipos de tratamientos de aguas residuales



Fuente: Modificada de C, Bernardo. Limpiando aguas residuales. CeTeMe la tragedia Blogspot. [En línea]. 14 de febrero de 2014. (Recuperado en 20 de marzo de 2018.) Disponible en <http://ceteme.blogspot.com.co/2014/02/limpiando-aguas-residuales.html>.

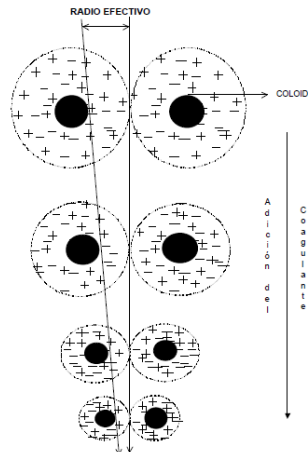
El agua contiene una variedad de impurezas, solubles e insolubles; entre estas últimas se destacan las partículas coloidales. Para que estas impurezas puedan ser removidas es preciso alterar algunas características del agua a través de procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración. Estos procesos se encuentran dentro de los tratamientos primarios del agua residual de Carbolsas LTDA⁷.

La *Coagulación* es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la aplicación de la energía de mezclado y la adición de coagulantes químicos como el sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$), Cloruro Férrico ($FeCl_3$), o Policloruro de Aluminio ($Al_2(OH)_3Cl$). En la **Figura 3** se muestra como las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas de la superficie del coloide permitiendo que estas se aglomeren formando flóculos que se sedimentan logrando en el agua la

⁷ VARGAS, Lidia. Tratamiento de agua para consumo humano. Manual I: Teoría Tomo I. Capítulo 4. Coagulación. Lima: s.n., 2004. p. 151-184

remoción de turbiedad (La turbidez es la medida del grado de transparencia que pierde el agua por la presencia de partículas en suspensión y sirve como parámetro para saber la calidad del agua, a mayor turbidez, la calidad del agua es menor⁸.)

Figura 3. Proceso de coagulación



Fuente: CÁRDENAS, Yolanda Andía. Tratamiento de agua coagulación floculación. SEDAPAL. Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico Lima: s.n., 2000. p. 10.

Como tratamientos terciarios, se han estudiado los procesos de oxidación avanzada (PAOs) que consisten básicamente en la formación de radicales hidroxilos altamente oxidantes, los cuales contribuyen a la mineralización total de los compuestos contaminantes presentes en los efluentes industriales⁹. Entre los procesos más utilizados se encuentra la fotocatalisis heterogénea que consiste en la aceleración de una fotorreacción mediante un catalizador y la luz solar. El dióxido de titanio (TiO₂) Degussa P25 con composición 75% anatasa y 25% rutilo es el catalizador más

⁸ CÁRDENAS, Yolanda Andía. Tratamiento de agua coagulación floculación. SEDAPAL. Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico Lima: s.n., 2000. p. 5-10

⁹ GARCÉS, Luis; MEJÍA, Edwin y SANTAMARÍA, Jorge. Revista Lasallista de Investigación. La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Antioquia, Colombia: s.n., 2004. Vol. 1. p. 83-92

utilizado y estudiado en procesos de fotocatalisis para la degradación de contaminantes orgánicos del agua debido a su estabilidad química y térmica, alta actividad catalítica, alto potencial oxidativo, bajo costo, fácil producción y muy baja toxicidad^{10 11}.

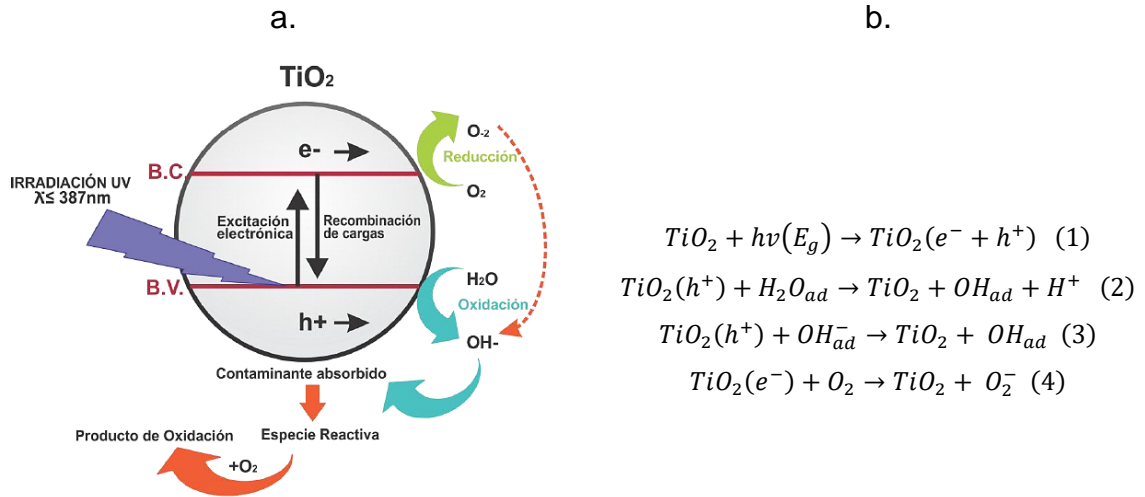
El proceso de fotocatalisis con TiO₂ se lleva a cabo cuando este recibe una radiación con una energía al menos igual a la energía de la banda prohibida del semiconductor (3,2 eV), promoviendo así la transferencia de un electrón de la banda de valencia (BV) a la banda de conducción (BC). Esta transferencia genera pares electrón hueco (e⁻/h⁺) en la superficie del sólido (**Figura 4-b**), Rxn1), los huecos fotogenerados dan paso a las reacciones de oxidación, mientras que los electrones de la banda de conducción dan lugar a las reacciones de reducción como se muestra en la **Figura 4-a**)¹².

¹⁰ ANDREOZZI, Roberto, et al. Selective Oxidation Processes of Organic Substances by Means of Photocatalytic Systems. Napoli NA, Italia : Department of Chemical Faculty of Engineering. University of Naples. Italy, 2011. p. 1

¹¹ UDDIN, M.J, et al. Photoactive TiO₂ films on cellulose fibres: synthesis and characterization. Journal of Photochemistry and Photobiology A Chemistry. 2007. p. 1

¹² FLOREZ, Diego y SUÁREZ, Milena. Modificación del pH y la concentración de TiO₂ en suspensión para el estudio de la distribución de catalizador inmovilizado sobre fibras de algodón crudo y su efecto en la actividad fotocatalítica. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, 2016. p. 20-21

Figura 4. Fotocatálisis heterogénea; a) Esquema del proceso. b) Mecanismo de reacción



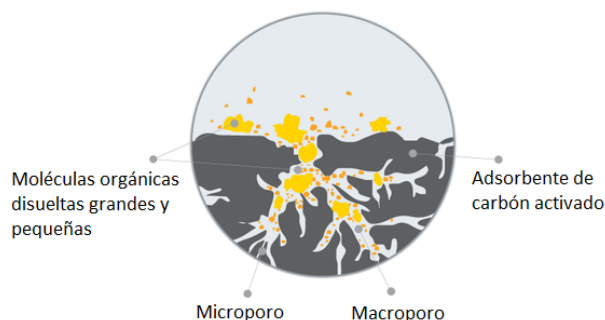
Fuente: Modificada de MOKHBI, Yasmina, et al. Treatment Heterogeneous Photocatalysis; Factors Influencing the Photocatalytic Degradation by TiO₂. Ouargla, Argelia: s.n., 2014. p. 562.

En la superficie del semiconductor se generan diferentes tipos de radicales, estos radicales generalmente OH^{*} son producidos cuando los huecos reaccionan con agua, (**Figura 4-b**, Rxn 2) o con iones OH⁻ (**Figura 4-b**, Rxn 3). En el caso de los electrones de la banda de conducción estos pueden ser atrapados por oxígeno molecular, los cuales están adsorbidos sobre las partículas de TiO₂, reduciéndose para formar el anión radical superóxido, (**Figura 4-b**, Rxn 4) que contribuye a la oxidación durante el proceso de degradación de contaminantes. La generación suficiente de pares electrón-hueco previenen la recombinación de estos siendo un factor clave que permiten aumentar la eficiencia de la actividad fotocatalítica¹³.

¹³ FLOREZ, Diego y SUÁREZ, Milena. Modificación del pH y la concentración de TiO₂ en suspensión para el estudio de la distribución de catalizador inmovilizado sobre fibras de algodón crudo y su efecto en la actividad fotocatalítica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, 2016. p. 20-21

Otro tratamiento terciario es la adsorción con carbón activado, este se utiliza con buena eficiencia en la purificación de aguas residuales de industrias que pueden contener colorantes, y en general contaminantes orgánicos e inorgánicos. El carbón activado es un adsorbente que presenta un elevado y variado grado de porosidad como se muestra en la **Figura 5**, una considerable superficie interna y un cierto contenido de grupos químicos superficiales; estas características son las responsables de sus propiedades adsorbentes, utilizadas para retener contaminantes poco polares, covalentes y no disociados que suelen ser los de origen orgánico en cualquier concentración^{14 15}.

Figura 5. Adsorción con carbón activado



Fuente: Modificada de CARBÓN VERDE. Carbón activado. [En línea]. 3 de febrero de 2016. (Recuperado en 21 de marzo de 2018.) Disponible en <https://carbonverde.wordpress.com/2016/02/03/antecedentes/>.

La alta efectividad en la remoción o adsorción de compuestos se debe a que el carbón activado tiene una gran área o superficie disponible para que puedan

¹⁴ CASTILLA, Carlos Moreno. Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. Granada, España: Departamento de Química Inorgánica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Campus Fuentenueva, 18071, 2004. p. 83-94

¹⁵ NEVSKAIA, Daniela M., et al. Effects of the surface chemistry of carbons materials on the adsorption of phenol-aniline mixtures from water. Madrid, España: Departamento de Química Inorgánica y Química Técnica, Facultad de Ciencias, UNED, Paseo Senda del Rey 9, 2004. p. 653–665

interactuar las moléculas de la sustancia que se adsorbe. Esta gran superficie se adquiere cuando el material carbonáceo se somete a altas temperaturas y se le inyecta súbitamente vapor de agua, nitrógeno, bióxido de carbono, argón o algún otro gas inerte. Este repentino cambio en la estructura interna del material provoca un gran número de huecos de tamaño microscópico, cuya superficie es receptiva a la retención de moléculas con una cierta estructura o estereoquímica¹⁶.

En el presente trabajo, el proceso de coagulación se analiza mediante una prueba de jarras que consiste en la adición de diferentes dosis de coagulante (PAC, Sulfato de aluminio y Cloruro férrico), seguido de una agitación rápida y lenta para finalmente sedimentar sin presencia de agitación. La selección de coagulante se hace en base a la remoción de turbiedad en condiciones de dosis y pH óptimos para cada coagulante. El tratamiento anterior tiene una generación de lodos que son removidos mediante filtración.

Debido a que el proceso de Coagulación es un tratamiento primario, se han estudiado 2 alternativas de tratamiento terciario como lo son los procesos de oxidación avanzada (PAOs) y la adsorción con carbón activado. El análisis de la efectividad de estos tratamientos se evalúa por medio de la reducción o remoción de parámetros como lo son grasas y aceites, DQO, DBO₅, SST, SSED y HTP.

Por lo anterior, como **objetivo general** se plantea establecer una estrategia para la reducción del consumo de agua en el lavado de equipos litográficos y seleccionar un tratamiento para las aguas residuales de la empresa Carbolsas LTDA. Se trazan los

¹⁶ OOCITIES. Tratamiento con Carbón Activado. [En línea]. (Recuperado en 21 de marzo de 2018.) Disponible en <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/carbon6.pdf>.

siguientes objetivos específicos con la finalidad de cumplir con el objetivo de esta práctica empresarial:

- Establecer estrategias para la disminución del consumo de agua en los procesos de lavado en la impresión Offset.
- Evaluar procesos fisicoquímicos para el tratamiento de las aguas residuales de la empresa Carbolsas LTDA.
- Seleccionar una estrategia de tratamiento que cumpla con los requerimientos exigidos en la resolución 631 de 2015.

Finalmente, los resultados y conclusiones de este trabajo serán el inicio para evaluar la implementación de un tratamiento de los efluentes residuales en la empresa Carbolsas LTDA.

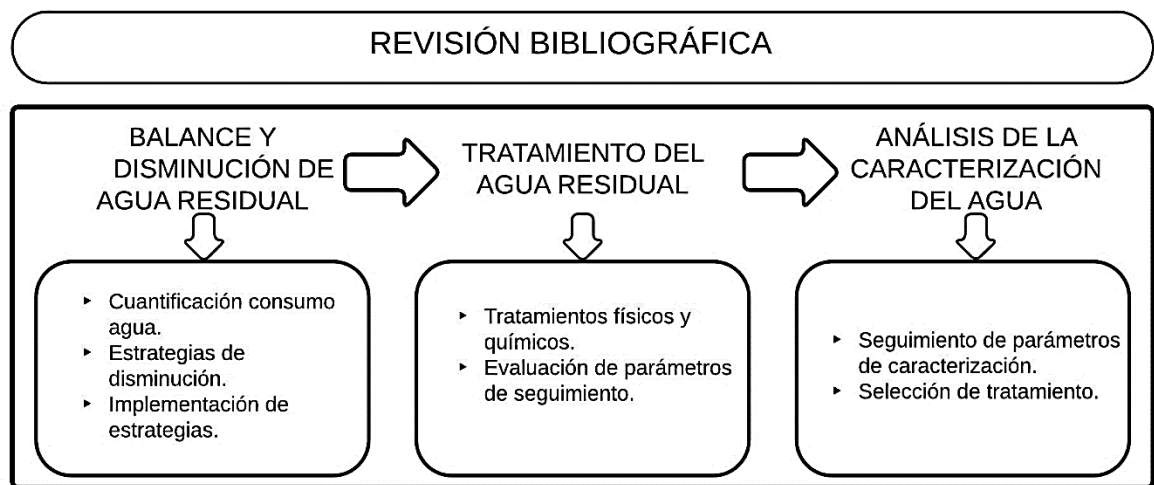
ALCANCE

Esta práctica empresarial busca disminuir el alto consumo de agua para los procesos de lavado de la empresa Carbolsas LTDA, debido a que al comienzo de la práctica el consumo de agua mensual en los procesos era alrededor de los 644 L mensuales. La importancia de la reducción del recurso hídrico utilizado radica en que está directamente relacionado con la cantidad de efluentes residuales de los procesos de producción. Posteriormente, se busca describir diferentes alternativas para el tratamiento de los efluentes generados por la empresa Carbolsas LTDA, enfocándose en tratamientos físicos y químicos que logren dar cumplimiento a las normas exigidas para el vertimiento de residuos líquidos en la industria colombiana. Para esto, se buscará evaluar diferentes alternativas desde el punto de vista científico e ingenieril para el tratamiento de los vertimientos, siguiendo parámetros importantes como lo son pH, turbiedad y color. Cada alternativa será evaluada de forma muy general en factores importantes como DBO₅, DQO, SST, SSED, Grasas y aceites, HTP y disposición de algunos elementos residuales que puedan generarse para finalmente seleccionar un proceso amigable con el medio ambiente y que ofrezca una solución a la problemática de la empresa. La investigación será realizada en un tiempo de 10 meses en la empresa de interés ubicada en la ciudad de Bucaramanga y contará con el apoyo de laboratorios y personal del grupo de investigación CICAT de la Universidad Industrial de Santander.

METODOLOGÍA

En la **Figura 6** se muestra la metodología empleada para dar solución a la problemática presentada en Carbolsas LTDA.

Figura 6. Metodología experimental



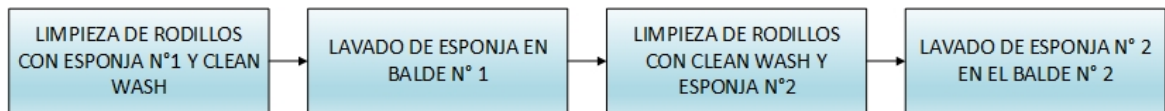
1.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realiza el reconocimiento del proceso de producción de la empresa Carbolsas LTDA haciendo énfasis en los procesos de lavado de tintero, rodillos y mantillas, ya que es en esta área donde se generan los efluentes de interés. Además, se realiza un reconocimiento de los materiales empleados como lo son tintas, solventes y agentes antioxidantes que se emplean en este proceso recibiendo el *Material safety data sheet (MSDS)* de cada componente.

1.2. BALANCE Y DISMINUCIÓN DEL AGUA RESIDUAL

La **Figura 7** muestra el proceso de lavado inicial de la empresa Carbolsas LTDA.

Figura 7. Proceso de lavado inicial en los procesos de impresión

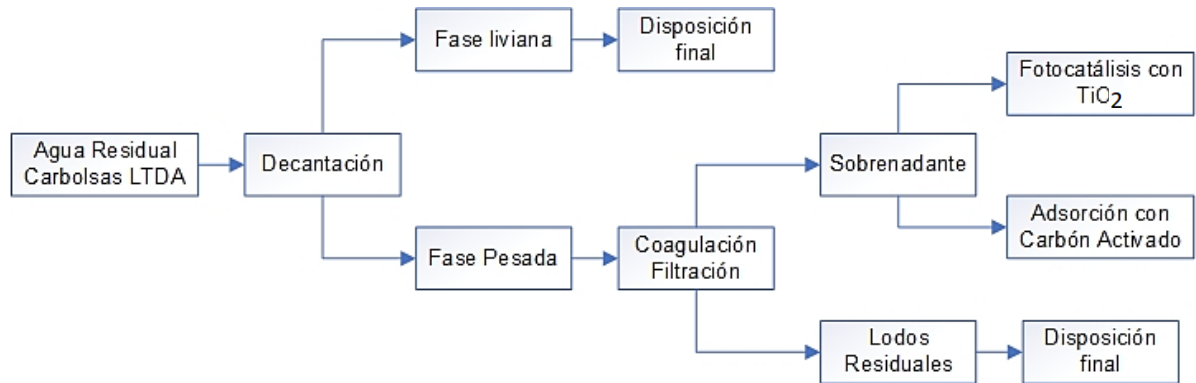


La disminución de los residuos líquidos generados en la empresa se abordó mediante el consumo de agua actual en los procesos de lavado, teniendo como principal parámetro el volumen mensual promedio empleado para este procedimiento y el planteamiento de 3 estrategias basadas en algunos aspectos fundamentales como: procedimiento de lavado actual, cantidad – tiempo de duración del agua empleada y experiencia del litógrafo. La evaluación posterior a la aplicación de la estrategia seleccionada se realiza mediante la medición del volumen mensual promedio por un periodo de 3 meses.

1.3. TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL

La **Figura 8** muestra el proceso de tratamiento al cuál es sometido el agua residual proveniente de los procesos de lavado de Carbolsas LTDA.

Figura 8. Esquema de tratamiento del agua residual de Carbolsas LTDA



1.3.1. Prueba de Jarras. Se evalúan 3 coagulantes de uso industrial: PAC, Sulfato de Aluminio y Cloruro férrico. Para cada compuesto se busca una dosis y pH óptimos a trabajar. Para determinar la dosis óptima se preparan 5 soluciones de Fase pesada–Coagulante de concentraciones diferentes con un volumen de 80 mL, estas se someten a una agitación de 500 rpm durante 2 minutos, posteriormente se agita a 200 rpm durante 15 minutos y finalmente se deja sedimentar sin agitación hasta que el volumen de los lodos generados se mantenga constante. Cada concentración se evalúa por medio de la remoción de turbiedad en la muestra la cual es tomada por medio de un Turbidímetro HACH 2100Q de la escuela de ingeniería química UIS. En cuanto al pH óptimo, se preparan 4 muestras de agua residual, cada una con un pH inicial diferente, posteriormente se agrega la dosis óptima de coagulante y se somete a un proceso de agitación y sedimentación igual al mencionado anteriormente. Durante el proceso de agitación se debe realizar un seguimiento del pH el cual se realiza con un medidor de pH Hanna HI 5522 ubicado en el PTG, ejerciendo un control por medio de soluciones de NaOH al 10% y HNO₃ al 65%.

1.3.2. Selección del medio filtrante. Para la selección del medio filtrante se evalúan diferentes medios de filtración como lo son: Filtro para café #8, tela dril súper 8, tela polo Lacoste y Wypall. Se someten diferentes muestras resultantes del

coagulante seleccionado y se analizan parámetros como volumen de sobrenadante recuperado y remoción de turbiedad.

1.3.3. Evaluación de la corrosividad y reactividad de los lodos residuales. Para el análisis de los lodos residuales generados, se realiza una neutralización previa al sobrenadante y al lodo resultante para posteriormente hacer un seguimiento a los siguientes parámetros:

Corrosividad: La corrosión se determinará por el método de pérdida de peso, el cual relaciona el daño causado por la corrosión con la pérdida de peso en placas de hierro, cobre y zinc, conocidos como testigos. Cada testigo es llevado a un proceso de lijado y limpieza con Acetona Sigma-Aldrich (No. CAS 67-64-1). La norma ASTM G31-03 recomienda que la relación de volumen de la disolución con el área de exposición de testigos sea de 20 a 40 cm³/cm² de superficie de la muestra¹⁷. Cada testigo es sumergido en cierta cantidad de lodo, esto se debe realizar en vasos de plástico y contará con un periodo de duración de 6 días. Posteriormente, cada testigo debe ser lijado, supervisado visualmente y limpiado cuidadosamente con jabón y acetona, luego, debe ser llevado a un horno para eliminar su humedad y finalmente se llevará una hora a un desecador para así finalmente registrar su peso final.

Reactividad: Una muestra se considera reactiva cuando bajo condiciones normales se pone en contacto con soluciones de pH ácido (HNO₃ 1,0 N) o básico (NaOH 1,0 N) y reacciona violentamente generando gases, vapores o humos. Se toma 1 g de

¹⁷ TORRES, Guillermo. Tratamiento de aguas residuales mediante la combinación de técnicas avanzadas de oxidación y biofiltros. Ingeniería de procesos, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria, España : s.n., 2014. p. 109-111

lodo residual y se agrega 1 mL de soluciones de NaOH y HNO₃ en recipientes diferentes y se observan los cambios presentados.

1.3.4. Evaluación de la actividad fotocatalítica con TiO₂. La evaluación de la actividad fotocatalítica se realiza por medio de dos procedimientos principales que son:

Curva de calibración: para esta se toma una muestra de 4 ml del sobrenadante proveniente de los procesos de coagulación que se realizan con anterioridad al agua residual y se analiza por medio de Espectroscopia UV-VIS en el equipo HP 8452 ubicado en PTG, registrando los picos representativos de absorbancia y su respectiva longitud de onda. Luego, se realizan diferentes diluciones con agua destilada y se someten al mismo procedimiento para registrar la absorbancia de los picos seleccionados.

Pruebas de degradación: La degradación se lleva a cabo mediante fotocatalisis con TiO₂, realizándose en 3 reactores de borosilicato con un volumen de sobrenadante de 60 mL; cada prueba contiene una dosis diferente de catalizador y cada reactor se somete a radiación solar con una agitación magnética a 200 rpm. Además, se realiza una prueba de adsorción por medio de un proceso de agitación magnética a 200 rpm en completa oscuridad durante 30 min. El seguimiento de la concentración de contaminantes se realiza por medio de espectroscopía U-VIS en el equipo HP8452 a intervalos de 30 minutos. Para evitar la distorsión en la lectura de absorbancia, se retiran las partículas de catalizador suspendidas en la muestra usando un filtro de 0,2 µm.

1.3.5. Evaluación de la adsorción en el filtro de carbón activado. La evaluación de la adsorción en el filtro de carbón activado se realiza por medio de una jeringa para insulina de 0,5 mL. El filtro consta de una capa de algodón la cuál servirá para soportar la siguiente capa de carbón activado en polvo. La masa de carbón utilizada es de 0,054g con una altura de 1,5 cm y un volumen de 0,15 cm³ para el filtro. El proceso de filtración del sobrenadante se evaluará mediante la turbidez en lotes de 15 mL con un turbidímetro HACH 2100Q y se dará por terminado cuando la turbidez se mantenga o se presente taponamiento. El sobrenadante es bombeado al filtro con una bomba peristáltica MasterFlex C/L que se encuentra en el PTG y que cuenta con un rango de flujo de 0,002-12,3 mL/min.

1.4. ANÁLISIS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

La caracterización del agua de Carbolsas LTDA se realiza a 4 muestras representativas del proceso de tratamiento: Agua residual inicial, fase pesada y aguas resultantes de los procesos fotocatalíticos y de adsorción. Dentro de los parámetros que se midieron para el seguimiento se encuentran DQO, DBO₅, SST, SSED, grasas y aceites y HTP. La medición de dichos parámetros fue realizada por el Laboratorio Químico de Consultas Industriales ubicado en la Universidad industrial de Santander el cual está acreditado por el IDEAM, según la resolución No. 1111 del 25 de junio de 2015 y resolución 0921 del 17 de mayo de 2016.

Para la selección del tratamiento se hizo el seguimiento de cada uno de los parámetros para cada una de las muestras caracterizadas y se compararon con los requeridos para el vertimiento de agua exigidos en la resolución 631 de 2015 del ministerio de ambiente y desarrollo de Colombia.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

1.5. DISMINUCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EMPLEADO PARA LOS PROCESOS DE LAVADO

La disminución del consumo de agua para los procesos de lavado de la empresa Carbolsas LTDA, se realiza mediante la reducción en la cantidad de agua empleada para este tipo de actividades. Una cuantificación inicial del volumen empleado para este propósito da como resultado un volumen aproximado de 644,49 L mensuales. Debido al alto consumo que se presenta, se realizan diferentes modificaciones al proceso de lavado actual que se muestran en la **Tabla 1**, dando así origen a 3 estrategias que tienen en cuenta aspectos como el procedimiento de lavado, opinión de la gerente y experiencia del litógrafo. El proceso de disminución y el planteamiento detallado de cada estrategia se puede observar en el **ANEXO A**.

Tabla 1. Estrategias planteadas para la disminución del consumo de agua

Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3
La principal modificación al proceso de lavado actual es el uso de 3 baldes donde el primero de ellos servirá para el escurrimiento de la esponja sin ser sumergida directamente al agua y los otros baldes funcionarán de la misma forma sólo que cambia su volumen a 4 litros.	La segunda estrategia varía de la primera en el uso de detergente 1A en el agua del balde número 2.	La tercera estrategia consta del uso de 3 baldes donde el primero servirá de suministro de agua para los otros dos (5 L), el balde 2 y 3 tendrán 3 litros. Con esta estrategia se busca que la saturación del balde 2 y 3 disminuya al ser diluida con el agua del balde 1.

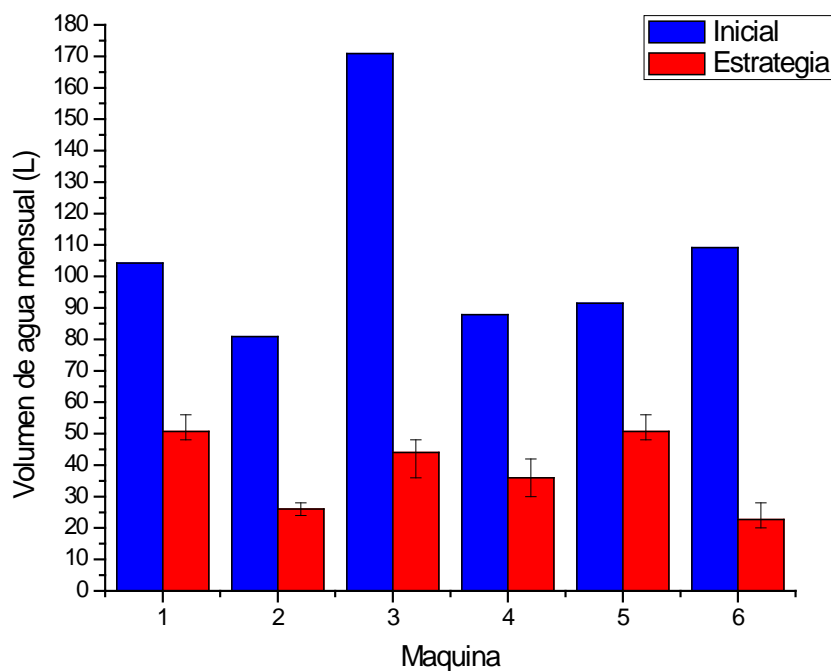
Posteriormente, se realiza una aplicación de cada una de las estrategias con los litógrafos. Al finalizar la implementación de cada estrategia, los litógrafos

concluyeron que la estrategia 1 fue la más eficiente, esto debido a que las demás presentaban inconvenientes cómo:

- La estrategia 2 presenta irregularidades en la adhesión de la tinta al cartón debido a la presencia del jabón. Genera problemas a la hora de la impresión.
- La estrategia 3 se asimila mucho a la modalidad actual de lavado, por lo cual, se decide no abordarla. Además, el consumo de agua era evidentemente mayor al que ellos tenían y su duración no variaba a la presentada en la situación inicial.

La estrategia seleccionada (#1) se lleva a un proceso de seguimiento durante tres meses, se miran factores como la periodicidad en el cambio del recurso hídrico y la cantidad mensual promedio usada, estos resultados se muestran en más detalle en el **ANEXO A**. La **Figura 9** muestra la disminución global del consumo de agua por máquina para los procesos de Carbolsas LTDA. La reducción total del consumo del recurso hídrico es de 64,31% lo cual determina el buen funcionamiento de la estrategia aplicada.

Figura 9. Consumo de recurso hídrico pre y post estrategia



1.6. AGUA RESIDUAL DE CARBOLSAS LTDA

El agua residual de Carbolsas LTDA consta de una mezcla de diferentes compuestos, entre los cuales se resaltan: *Clean Wash**, Tintas y Goma Proysol** cuyos infrarrojos se muestran en la **Figura 10** y **Figura 11**, composición y solubilidad se muestran en el **ANEXO B**.

* *Clean Wash* es el solvente utilizado para facilitar la limpieza de rodillos, mantillas y baterías.

** Goma Proysol es utilizada para evitar la corrosión en las planchas de las máquinas litográficas.

Figura 10. Comparación cualitativa de espectros IR para fase liviana

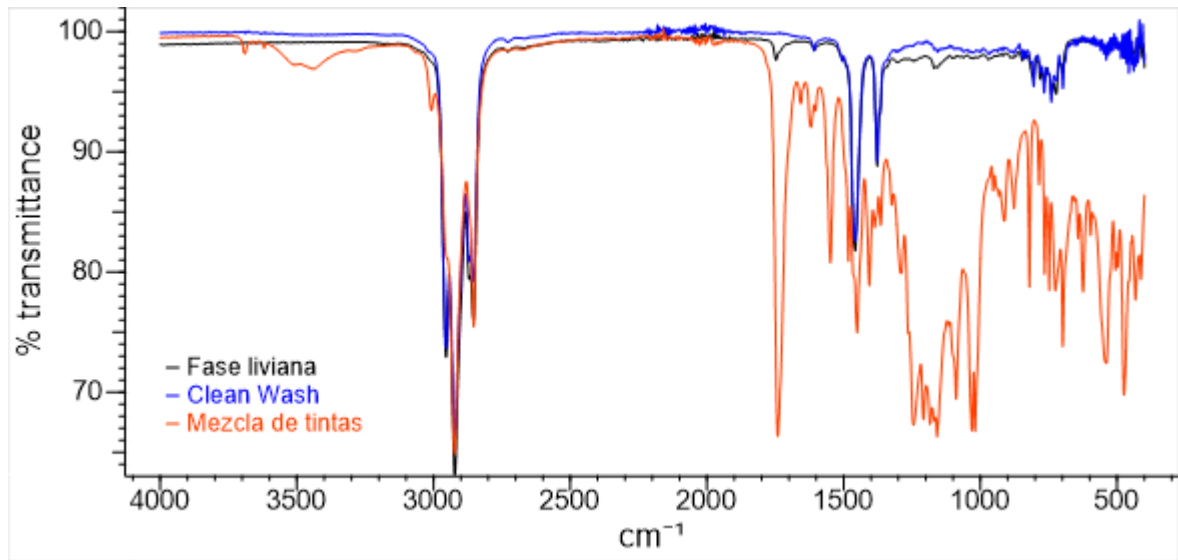
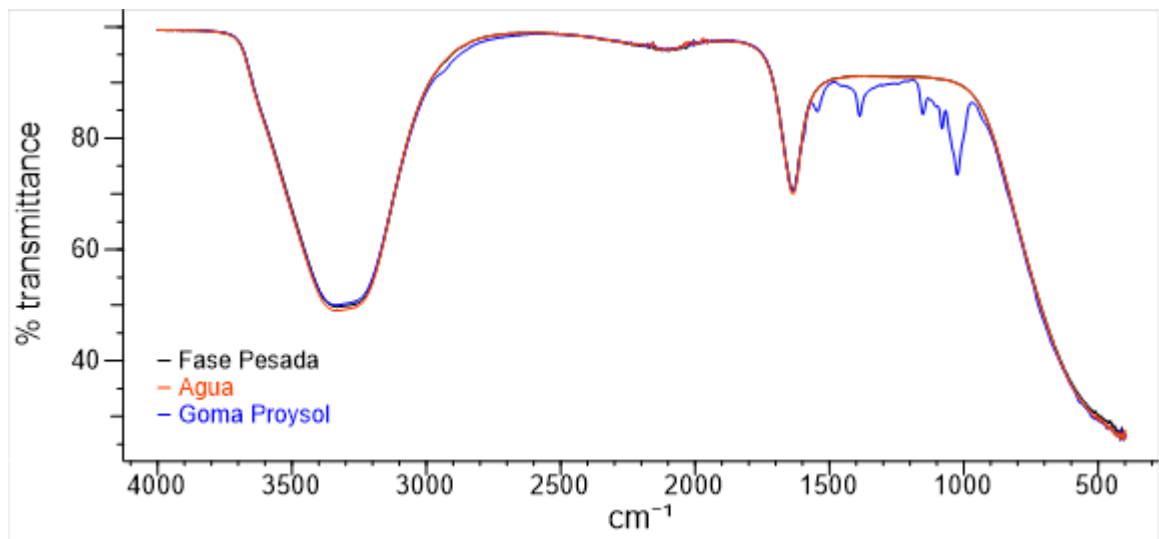


Figura 11. Comparación cualitativa de espectros IR para fase pesada



Debido a la presencia de compuestos insolubles, el agua residual presenta 2 fases, una fase liviana y una fase pesada como se muestra en la **Figura 12**. La separación de las fases se realiza por medio de un proceso de decantación (20 L agua residual),

obteniéndose un 85% de fase pesada (efluente de interés). Posterior a la separación, la fase pesada es llevada a un tratamiento para quitar la mayor cantidad de grasa o hidrocarburo que haya quedado, esto se hace por medio de una trampa grasa*.

Figura 12. Separación y adecuación de fase pesada. a y b) Separación de fases del agua residual de Carbolsas LTDA, c) Trampa grasa para la fase pesada



a)



b)



c)

Cada una de las fases se analiza inicialmente por medio de espectroscopia infrarroja de forma cualitativa, esto se realiza con el objetivo de conocer la posible composición de cada una de las fases. En el **ANEXO B** se puede observar que por espectroscopia IR la composición de la fase pesada es agua y goma proysol mientras que la fase liviana contiene Clean Wash y tintas. Para esta última, es importante señalar que no será sometida a ningún tratamiento debido a que quedará a disposición de una entidad para su manejo.

* Trampa grasa construido por los autores con material reciclable y tubos PVC. Consta de 3 compartimientos para separar la grasa por diferencia de densidad.

1.7. TRATAMIENTO FASE PESADA

La fase pesada que constituye el 85% de todo el efluente residual, es sometida a los procesos de tratamiento que se muestran en la **Figura 8**.

1.7.1. Coagulación. La prueba de jarras como método de análisis del proceso de coagulación, se enfoca en encontrar una dosis óptima para cada compuesto y un pH óptimo a trabajar, este procedimiento se puede detallar en el **ANEXO C**. La turbiedad inicial de la fase pesada es de 4970 unidades nefelométricas (NTU).

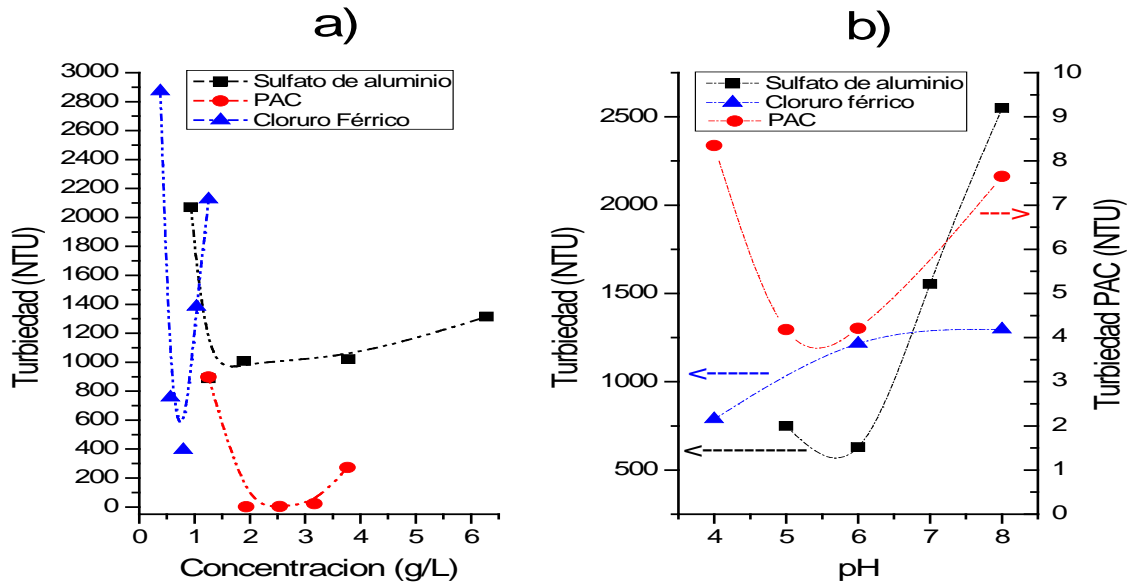
3.3.1.1. Dosis óptima de coagulante. En la **Tabla 2** se analizan los resultados obtenidos para cada coagulante con su respectiva dosis óptima.

Tabla 2. Resultados para la dosis óptima de cada coagulante

SULFATO DE ALUMINIO	PAC	CLORURO FÉRRICO
La dosis óptima para este coagulante es de 0,10 g, correspondiente a una concentración de 1,25 g/L. La remoción total de turbiedad para este compuesto es de 82,13%.	El PAC es el coagulante que presenta los mejores resultados de remoción en la turbiedad, obteniéndose un valor máximo de 99,96% de eliminación. Su dosis óptima está en el rango de 0,15g – 0,2g, las cuales corresponde a una concentración de 1,93 g/L – 2,54 g/L.	La dosis óptima para este coagulante es de 0,065 g perteneciente a una concentración de 0,8 g/L. Se presenta una remoción del 92,00% en la turbiedad.

La **Figura 13-a)** muestra las curvas de dosis óptimas para los diferentes coagulantes, siendo el PAC el coagulante con mejores rendimientos en remoción de la turbiedad.

Figura 13. a) Dosis óptima para cada coagulante b) pH óptimo para cada coagulante



3.3.1.2. pH óptimo para cada coagulante. La **Figura 13-b)** muestra el pH óptimo de cada coagulante, para esto se realizan pruebas con las dosis óptimas de cada uno, variando el carácter ácido, neutro o básico del efluente. Se obtiene que para el sulfato de aluminio el pH óptimo está comprendido entre 5 y 6 con una remoción del 87,32% en turbiedad; el cloruro férrico tiene como pH óptimo 4 con una remoción del 84,12% en turbiedad, esto debido a que para un pH de 3 no se logra una precipitación de los lodos residuales. Finalmente, el PAC es el coagulante que logra una mejor remoción de turbiedad con un 99,92% y su rango de pH óptimo está comprendido entre 5 y 6. En cuanto a la cantidad de lodos resultantes, se puede observar que, para 80 mL de muestra se obtiene un volumen aparente de lodos del 38% para el PAC y de un 25% para el sulfato de aluminio y cloruro férrico.

De este modo, se escoge el PAC como el coagulante de tratamiento, esto debido a su alto porcentaje de remoción en turbiedad, bajo costo y poca dependencia de pH.

Además, tiene un costo de \$24 COP/ L de agua residual tratada, siendo inferior al costo de los demás coagulantes como se muestra en el **ANEXO C**.

3.3.1.3. Separación de lodos resultantes. La separación de los lodos residuales se realiza por medio de un proceso de filtración. La **Tabla 3** indica 4 tipo de filtros que son usados para separar los 80 mL de muestra sedimentada con el coagulante seleccionado y los valores de turbiedad obtenidos.

Tabla 3. Selección de medio filtrante

FILTRO	Volumen recuperado (mL)	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	%Remoción turbiedad filtro
FILTRO CAFÉ # 8	65	94,3	99,8	-
POLO LACOSTE	61	20,8	14,7	29%
DRIL SUPER 8	62	7,65	3,09	60%
WYPALL	56	4,21	17,4	-

Se puede observar que los filtros con mejor recuperación de volumen de líquido son la tela dril súper 8 y el filtro para café, con porcentajes de recuperación del 77% y 81%, respectivamente. Para la turbiedad post filtro, la tela poliéster presenta una remoción del 60% que es muy superior a la obtenida con el filtro de café donde la turbiedad aumentó, es por ello, que el medio filtrante seleccionado es la tela dril.

3.3.1.4. Análisis de corrosividad y reactividad de lodos residuales. Para generar una cantidad elevada de lodo, se realiza un proceso de coagulación con *PAC* en sus condiciones óptimas para 11 lotes de 400 mL de fase pesada cada uno como se

muestra en el **ANEXO D**. Los lodos residuales generados son neutralizados y llevados a 2 pruebas para medir su corrosividad y reactividad.

Corrosividad: en la **Figura 14-a)** se puede observar el aspecto de cada testigo antes y después de ser sometidos a la prueba de corrosividad con una duración de 6 días. La inspección visual de cada testigo muestra que la única placa que presenta un cambio significativo es la de hierro, debido a que presenta cierta cantidad de óxido en la superficie. Además, en la **Tabla 4** se muestra que la velocidad de corrosión es muy baja para cada uno de los testigos, demostrando la baja peligrosidad de este residuo respecto a este fenómeno.

Figura 14. a) Prueba de corrosividad a testigos. b) Prueba de reactividad a lodos.

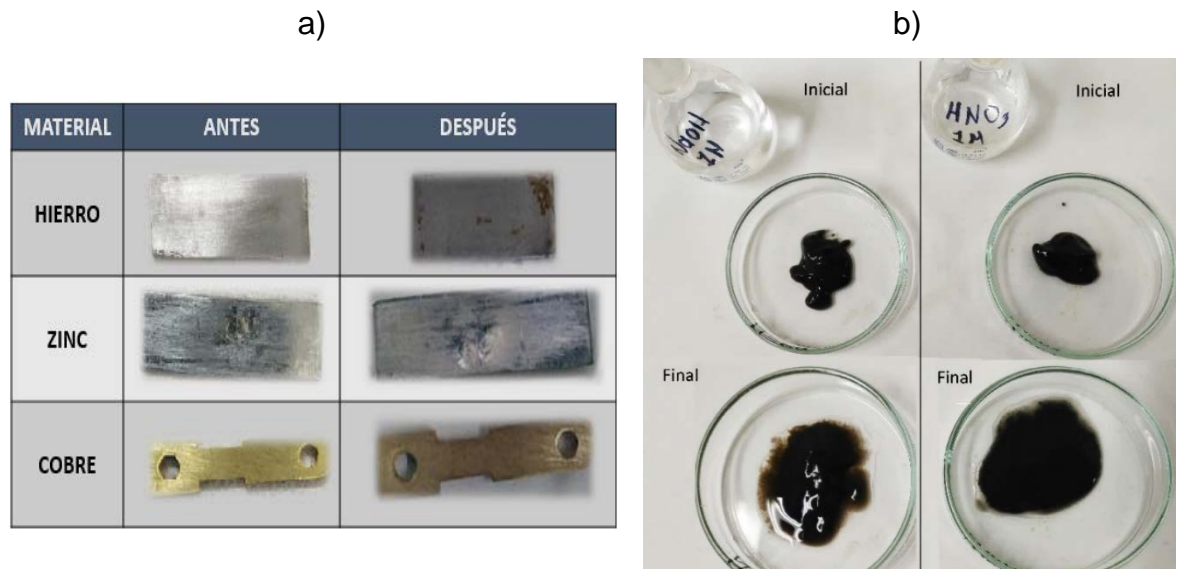


Tabla 4. Resultados de la prueba de corrosividad para testigos empleados

Característica	TESTIGOS		
	Hierro	Zinc	Cobre
Peso inicial (g)	3,1264	3,1528	2,6275
Área superficial (cm ²)	4,8575	4,8	1,8
Volumen lodo (cm ³)	97,15	96	36
Peso final (g)	3,1245	3,1491	2,6263
Relación Volumen / Área	20	20	20
Tiempo (días)	6	6	6
Densidad metal (g/cm ³)	7870	7140	8960
Velocidad de corrosión (mm/año)	3,02*10 ⁻⁰⁵	6,57*10 ⁻⁰⁵	4,53*10 ⁻⁰⁵

Reactividad: se analiza visualmente por el comportamiento que tiene 1 g de sólido residual en presencia de una solución ácida (HNO₃ 1N) y básica (NaOH 1N) como se muestra en la **Figura 14-b**). La prueba no arroja presencia de vapores ni humos, sólo se registra un cambio leve de color debido al cambio de pH de estos (pH_{inicial}=7). Por lo anterior, la peligrosidad de los lodos hacia este fenómeno es mínima.

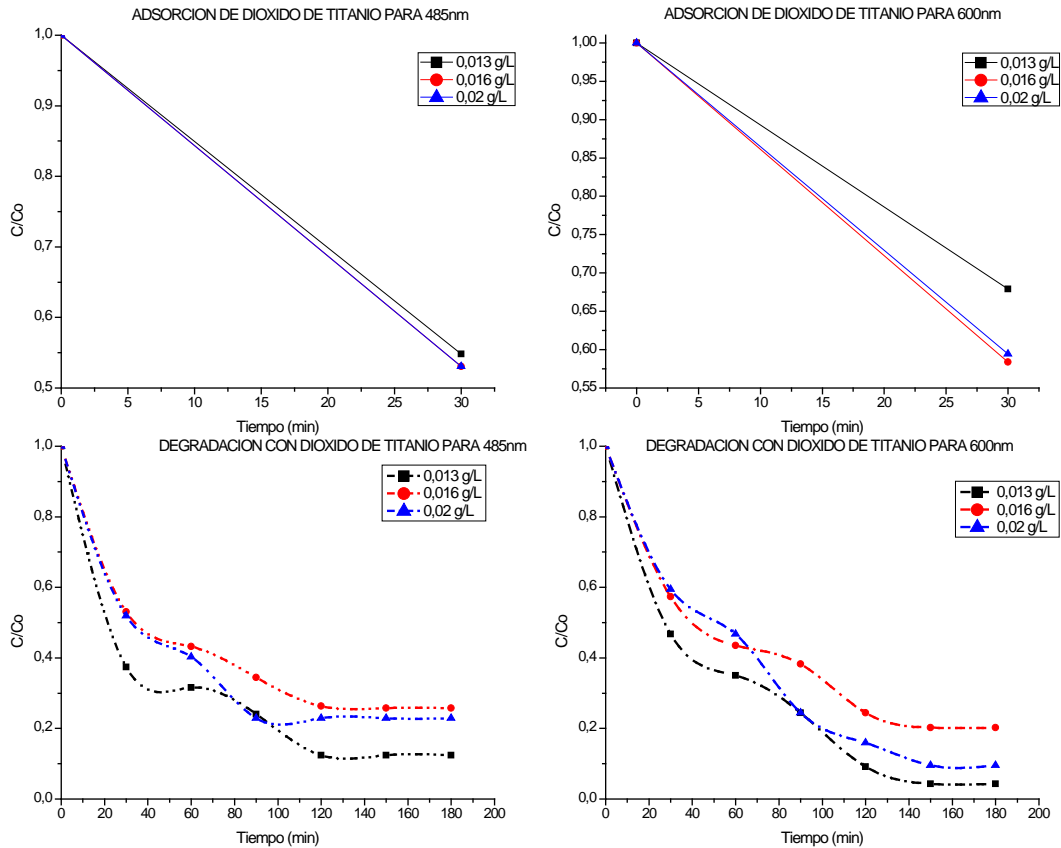
1.7.2. Fotocatálisis con TiO₂. Para la degradación fotocatalítica con TiO₂ se realiza una calibración para el sobrenadante proveniente de los procesos de coagulación, el espectro UV-VIS arroja dos picos (485 nm y 600 nm) que sirven de indicativo para el seguimiento de la degradación. Teniendo en cuenta la calibración que se muestra en el **ANEXO E**, se realiza un proceso de adsorción y degradación para 3 cantidades de TiO₂.

La **Figura 15** muestra los resultados de disminución en la concentración de los contaminantes presentes en el sobrenadante residual por los procesos de adsorción y degradación.

Con base a estos resultados se tiene que el porcentaje de adsorción para el pico 1 (485 nm) es de 45,2% para una concentración de catalizador de 0,013 g/L y es menor al presentado por las demás concentraciones de catalizador (0,016 g/L y 0,02 g/L). Para el pico 2 (600 nm) se presenta el mismo comportamiento con un porcentaje de adsorción del 32,07%.

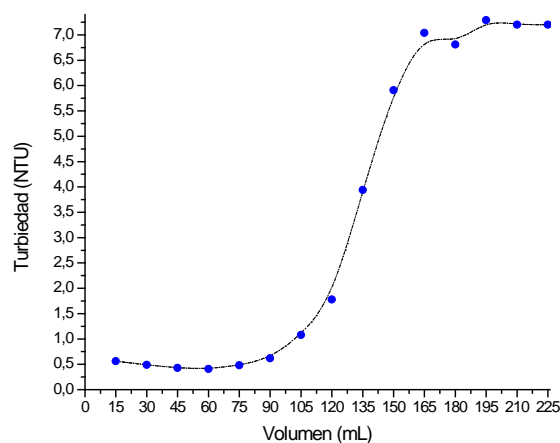
En cuanto al proceso de degradación, transcurridas 3 horas de exposición a la luz del sol, la presencia de los dos picos presentados desapareció. Además, se presentan porcentajes de remoción de contaminantes del 88% y 96% para los picos 1 y 2 respectivamente; teniendo en común una concentración de catalizador de 0,013 g/L, la cual corresponde a la concentración óptima a trabajar.

Figura 15. Resultados de la adsorción y degradación fotocatalítica con TiO₂



1.7.3. Filtración con Carbón activado. La **Figura 16** muestra el comportamiento que tiene la turbidez de una muestra de sobrenadante al ser sometida a un proceso de filtración con carbón activado. Se tiene que, para un proceso con 15 mL, el filtro presenta un buen rendimiento después de ser usado 6 veces y una saturación después de 15 ya que se presenta una estabilización de la turbiedad y un taponamiento del filtro. Por lo tanto, el volumen de sobrenadante óptimo es de 90 mL para una masa de Carbón activado de 0,054g y una altura de filtro de 1,5 cm. De este modo, se tiene que la cantidad de carbón activado es de 0,6 g Carbón activado/L de sobrenadante a tratar.

Figura 16. Seguimiento de la turbiedad en un filtro de carbón activado



1.8. SELECCIÓN DE TRATAMIENTO

La **Tabla 5** muestra los resultados obtenidos para los parámetros de seguimiento escogidos para cada una de las 3 fases seleccionadas en el tratamiento (Muestra inicial, Fase pesada y tratamiento terciario).

Tabla 5. Resultados para los parámetros de caracterización o seguimiento

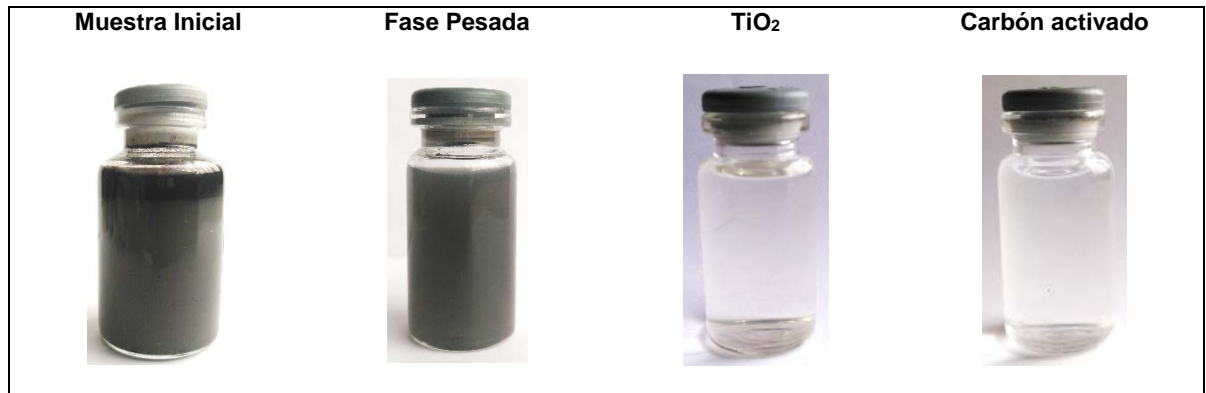
PARÁMETRO	MUESTRA	FASE	CARBÓN	TiO ₂	REQUERIMIENTO	% Remoción	% Remoción
	INICIAL	PESADA	ACTIVADO		Res. 631 2015	Carbón	TiO ₂
DBO ₅	23700	8917,5	1305	1850	100	94,49%	92,19%
DQO	29820	13929	2316,26	1920,4	200	92,23%	93,56%
SST	4224	50	7	24	50	99,83%	99,43%
SSED	4,5	1,5	<0,1	0,2	1	97,78%	95,56%
Grasas y Aceites	42750,6	81,14	3,39	69,25	10	99,99%	99,84%
HTP	15483,3	35,68	<2,4	9,25	10	99,98%	99,94%

En base a los resultados obtenidos se tiene que posterior a la decantación, parámetros como DBO₅ y DQO presentan una reducción del 62% y 53% respectivamente. En cuanto a los parámetros que hacen referencia a los sólidos presentes, se tiene una remoción del 99% para los SST y 67% para los SSED. Para los parámetros como Grasas y aceites y HTP se logran remociones cercanas al 100% corroborando de esta forma que el hidrocarburo presente en el agua es debido a la presencia de *Clean Wash*. Además, los procesos de decantación y trampa grasa poseen una alta eficiencia en la eliminación de estos.

En cuanto a los tratamientos terciarios, la fotocatalisis con TiO₂ presenta una disminución en DBO₅ y DQO del 79% y 86% respectivamente, siendo inferior a la presentada en la adsorción con carbón activado para DBO₅ y superior para DQO (85% y 83%). La remoción de sólidos presentes es de 52% para los SST y 87% para los SSED siendo menor a la obtenida mediante el proceso de adsorción (86% y 93%). Los parámetros como grasas y aceites y HTP presentan reducciones del 15% y 74% respectivamente, lo cual es significativamente menor a las remociones presentadas con carbón activado (96% y 93%).

En la **Figura 17**, se puede evidenciar visualmente la remoción de color presentada en cada fase de tratamiento.

Figura 17. Remoción de color en el tratamiento



De manera general, los tratamientos con el procedimiento 1 (Decantación, trampa grasa, coagulación y fotocátalisis) y el procedimiento 2 (Decantación, trampa grasa, coagulación y adsorción) presentan remociones totales superiores al 90% en cada uno de los parámetros como se muestra en la **Tabla 5**. En cuanto a los requerimientos exigidos por la ley, los procedimientos 1 y 2 no cumplen con los parámetros DBO₅ y DQO. Además, el procedimiento 1 incumple el valor permitido para el parámetro de Grasas y aceites por lo cual, el procedimiento 2 es seleccionado como el mejor tratamiento debido a que presenta mejores porcentajes de remoción globales y mejor cumplimiento a los requerimientos exigidos por la resolución.

CONCLUSIONES

- La aplicación de la estrategia 1 como método de lavado de las máquinas de impresión, resulta ser favorable, ya que se reduce en un 64,31% el consumo de agua en Carbolsas LTDA.
- La evaluación de la coagulación como tratamiento primario del agua residual sugiere el uso del PAC como agente coagulante, logrando una remoción del 99,96% de turbiedad, con concentración de 1,93 g/L y pH entre 5 y 6. Asimismo, los lodos generados no resultan ser corrosivos ni reactivos.
- En cuanto a los tratamientos terciarios la degradación fotocatalítica con TiO_2 (0,013g fotocatalizador/L sobrenadante) evidencia tasas de degradación del 88% y 96% para longitudes de onda de 485nm y 600nm respectivamente. Por su parte la filtración con carbón activado infiere el uso de 0,6 g de carbón por litro de agua removiendo 66% de turbiedad.
- Se selecciona el procedimiento 2 (Decantación, trampa grasa, coagulación y adsorción con carbón activado) como estrategia de tratamiento al agua residual generada por Carbolsas LTDA debido a que presenta mejores remociones globales (Superiores al 90%) y da mayor cumplimiento a cada uno de los parámetros exigidos por la legislación colombiana, sin cumplirlos a cabalidad.

RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas de lavado de los equipos litográficos con el agua tratada mediante los procedimientos primarios y terciarios y evaluar la posibilidad de ser utilizada para los procesos litográficos de la empresa, conllevando esto en un ahorro aún mayor del agua captada del acueducto.
- Realizar estudios complementarios a nivel industrial, con la finalidad de observar la estabilidad del PAC como agente coagulante para diferentes muestras y volúmenes de agua, esto debido a que la composición del agua residual es muy variable.
- Evaluar la actividad fotocatalítica en dispositivos que logren captar de mejor forma la energía solar incidente, por ejemplo, en un Colector Parabólico Compuesto (CPC) y evaluar si con esta implementación se cumplen los requerimientos de la legislación colombiana.
- Realizar el estudio técnico-económico de una planta piloto de tratamiento de agua residual en Carbolsas LTDA, para el diseño conceptual planteado en este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

CÁRDENAS, Yolanda Andía. Tratamiento de agua coagulación floculación. SEDAPAL. valuación de Platas y Desarrollo Tecnológico Lima: s.n., 2000.

CRISTANCHO, Angie y NOY, Andrés. Diseño Conceptual De Una Planta De Tratamiento De Aguas Residuales Para Pelikan Colombia S.A.S. Fundación Universidad De América. Facultad De Ingenierías. Programa De Ingeniería Química. Bogotá D.C. 2016

FLOREZ, Diego y SUÁREZ, Milena. Modificación del pH y la concentración de TiO_2 en suspensión para el estudio de la distribución de catalizador inmovilizado sobre fibras de algodón crudo y su efecto en la actividad fotocatalítica. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, 2016.

OROZCO, Aarón y RUIZ, Leonardo José. Degradación Fotocatalítica de una tinta usada en la industria de impresión litográfica de cuadernos. Universidad De Cartagena. Facultad De Ingeniería. Programa De Ingeniería Química Cartagena De Indias, D.T. y C. 2013

TORRES, Guillermo. Tratamiento de aguas residuales mediante la combinación de técnicas avanzadas de oxidación y biofiltros. Ingeniería de procesos, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria, España : s.n., 2014. pág. 110, Tesis doctoral.

ANEXOS

ANEXO A. Disminución del recurso hídrico

El balance inicial del recurso hídrico se realiza con la medición del volumen empleado durante un día y su duración promedio según la experiencia del trabajador. Para llevar cada cantidad diaria empleada a una cantidad mensual, se tiene en cuenta que el número de días trabajados por cada máquina es de 26 días al mes.

$$\text{Volumen mensual (L)} = \frac{\text{Volumen diario (ml)}}{1000} * 26 \text{ días}$$

Tabla 6. Cuantificación inicial del recurso hídrico empleado en Carbolsas LTDA

MÁQUINA	VOLUMEN (mL)	DURACIÓN (Días)	OBSERVACIÓN	VOLUMEN DIARIO (mL)	VOLUMEN MENSUAL (L)
1	20040	5	Cambia el agua cada 5 días	4,01	104,21
2	12440	4	Cambia el agua cada 4 días	3,11	80,86
3	13140	2	Cambia el agua cada 2 días	6,57	170,82
4	16900	5	Cambia el agua cada 5 días	3,38	87,88
5	17600	5	Cambia el agua cada 5 días	3,52	91,52
6	21000	5	Cambia el agua cada 5 días	4,20	109,20
TOTAL				24,79	644,49

Debido al alto consumo de agua en la empresa, se deciden plantear 3 estrategias que se resumen en las siguientes fichas:

Figura 18. Ficha guía para la implementación de la estrategia 1


FICHA N° 1. DISMINUCIÓN DEL USO DE AGUA EN EL LAVADO DE RODILLOS Y MANTILLAS - ESTRATEGIA 1	
OBJETIVO	Desarrollar un plan de mejoramiento para la limpieza de rodillos y mantillas en las máquinas de impresión Offset
ASPECTO AMBIENTAL	El uso de limpiadores que varían de acuerdo a su composición química hace que no exista un método estándar de limpieza. Esto ocasiona que se generen algunos residuos que pueden ser de tipo peligroso o no apto para el medio ambiente. En este caso, Carbolsas LTDA busca reducir la cantidad de agua utilizada para la misma operación.
TIPO DE MEDIDA	Preventiva
ACTIVIDADES A DESARROLLAR	<p>Es conveniente realizar un plan de mejoramiento en la limpieza teniendo como principales aspectos los siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Se emplearán 3 baldes de un tamaño considerable. 2. En el balde número 1 se realizará un escurrimiento de la espuma apenas sea limpiado el rodillo y la mantilla, esto con el objetivo de generar un residuo puro en tinta y disminuir la contaminación en el agua. 3. El balde número dos servirá como enjuague para la espuma posterior al escurrimiento inicial, el volumen de agua en este será de 4 Litros. Al saturarse el agua de este recipiente será reemplazada por la del balde 3. 4. El tercer recipiente servirá como enjuague de la esponja que contiene el limpiador de rodillos y mantillas, siendo esta la menos contaminada con tinta de impresión; el volumen para este será de 4 litros y será el recipiente en el que se cambiara el agua, siendo llenado de nuevo a 4 litros. <p>IMPORTANTE: El uso de guantes para la protección del trabajador.</p> 
BENEFICIOS	Disminución en el uso de agua para el lavado de los rodillos y mantillas, teniendo una disposición final de los residuos de tinta más sencilla y un tratamiento de la misma menos costoso.
LUGAR DE APLICACIÓN	Área de impresión de Carbolsas LTDA
RESPONSABLES DE EJECUCIÓN	Propietarios y/o gerentes y jefes de producción.

Figura 19. Ficha guía para la implementación de la estrategia 2


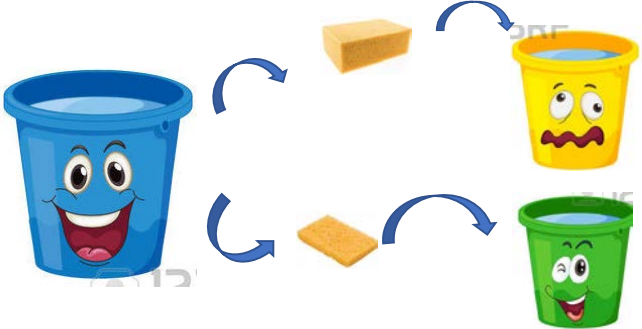
FICHA N° 2. DISMINUCIÓN DEL USO DE AGUA EN EL LAVADO DE RODILLOS Y MANTILLAS - ESTRATEGIA 2	
OBJETIVO	Desarrollar un plan de mejoramiento para la limpieza de rodillos y mantillas en las máquinas de impresión Offset
ASPECTO AMBIENTAL	El uso de limpiadores que varían de acuerdo a su composición química hace que no exista un método estándar de limpieza. Esto ocasiona que se generen algunos residuos que pueden ser de tipo peligroso o no apto para el medio ambiente. En este caso, Carbolsas LTDA busca reducir la cantidad de agua utilizada para la misma operación.
TIPO DE MEDIDA	Preventiva
ACTIVIDADES A DESARROLLAR	<p>Es conveniente realizar un plan de mejoramiento en la limpieza teniendo como principales aspectos los siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Uso de detergente 1A en solución para el lavado de los rodillos y mantillas, esto se deberá realizar por medio de un recipiente lavador que será entregado a cada trabajador diariamente, controlando de esta forma el uso del mismo. 2. Se emplearán 3 baldes de un tamaño considerable. 2. En el balde número 1 se realizará un escurrimiento de la espuma apenas sea limpiado el rodillo y la mantilla, esto con el objetivo de generar un residuo puro en tinta y disminuir la contaminación en el agua. 3. El balde número dos servirá como enjuague para la espuma posterior al escurrimiento inicial, el volumen de agua en este será de 4 Litros y será reemplazado por el contenido del balde 3 cuando este llegue a su saturación. 4. El tercer recipiente servirá como enjuague de la esponja que contiene el limpiador de rodillos y mantillas, siendo esta la menos contaminada con tinta de impresión; el volumen para este será de 4 litros y será cambiada al momento de ser vertida al balde 2. <p>NOTA: Revisar el comportamiento del detergente debido a la posibilidad de presencia de hongos y al no presentarse esto, servirán para disminuir la tensión superficial presente ayudando a la acción que también tiene el limpiador.</p> 
BENEFICIOS	Disminución en el uso de agua para el lavado de los rodillos y mantillas, teniendo una disposición final de los residuos de tinta más sencilla y un tratamiento de la misma menos costoso.
LUGAR DE APLICACIÓN	Área de impresión de Carbolsas LTDA
RESPONSABLES DE EJECUCIÓN	Propietarios y/o gerentes y jefes de producción.

Figura 20.Ficha guía para la implementación de la estrategia 3

FICHA N° 3. DISMINUCIÓN DEL USO DE AGUA EN EL LAVADO DE RODILLOS Y MANTILLAS - ESTRATEGIA 3	
OBJETIVO	Desarrollar un plan de mejoramiento para la limpieza de rodillos y mantillas en las máquinas de impresión Offset
ASPECTO AMBIENTAL	El uso de limpiadores que varían de acuerdo a su composición química hace que no exista un método estándar de limpieza. Esto ocasiona que se generen algunos residuos que pueden ser de tipo peligroso o no apto para el medio ambiente. En este caso, Carbolsas LTDA busca reducir la cantidad de agua utilizada para la misma operación.
TIPO DE MEDIDA	Preventiva
ACTIVIDADES A DESARROLLAR	<p>Es conveniente realizar un plan de mejoramiento en la limpieza teniendo como principales aspectos los siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Se emplearán 3 baldes. 2. En el balde número 1 será el de mayor volumen y tendrá una cantidad de 5 litros para cada trabajador de agua totalmente limpia y servirá para proveer de agua al balde 2 y 3 cada vez que el operario requiera pertinente. 3. El balde número dos tendrá un volumen de 3 litros en el cuál se realizará el enjuague de la esponja posterior a la limpieza de los rodillos y mantillas. 4. El tercer recipiente servirá como enjuague de la esponja que contiene el limpiador de rodillos y mantillas, siendo esta la menos contaminada con tinta de impresión; el volumen para este será de 3 litros.  <p>El diagrama ilustra el proceso de limpieza con tres baldes: un balde azul grande (5 litros) que proporciona agua al balde amarillo (3 litros) y al balde verde (3 litros). Se muestran esponjas que se usan para limpiar y luego se enjuagan en los baldes correspondientes.</p>
BENEFICIOS A ESPERAR	Disminución en el uso de agua para el lavado de los rodillos y mantillas, teniendo una disposición final de los residuos de tinta más sencilla y un tratamiento de la misma menos costoso.
LUGAR DE APLICACIÓN	Área de impresión de Carbolsas LTDA
RESPONSABLES DE EJECUCIÓN	Propietarios y/o gerentes y jefes de producción.

La cuantificación de la estrategia seleccionada (Estrategia 1) durante 3 meses, se realiza por medio de planillas que son entregadas a los litógrafos quienes deben registrar el día y la hora de cambio de los 4 litros del 3 recipiente. Obteniendo así los siguientes resultados:




Tabla 7. Seguimiento de la estrategia seleccionada para la disminución del recurso hídrico

MÁQUINA	VOLUMEN MES 1 (L)	VOLUMEN MES 2 (L)	VOLUMEN MES 3 (L)	PROMEDIO (L)	% Disminución
1	56	48	48	50,67	51%
2	24	26	28	26,00	68%
3	48	48	36	44,00	74%
4	42	36	30	36,00	59%
5	56	48	48	50,67	45%
6	28	20	20	22,67	79%
TOTAL				230,00	64%

ANEXO B. Compuestos, solubilidad, y análisis de fases presentes en el agua residual de Carbolsas LTDA.

Compuestos presentes en el efluente residual

Tabla 8. Compuestos presentes en el efluente residual

COMPUESTO	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
Clean Wash (80-90% Nafta pesada hidrogenada)	Es utilizado para la limpieza de rodillos, mantillas y baterías, contiene solventes orgánicos, aceites vegetales, y antioxidantes, no es inflamable y no contamina el medio ambiente.	
Tintas (Tipo Offset)	Las tintas de impresión son una fina dispersión de pigmentos o derivados de colorantes en un medio líquido de viscosidad variable llamado vehículo o ligante (comúnmente barniz).	
Goma Proysol (13% P/P)	Es utilizada para evitar la corrosión en las planchas de las maquinas litográficas, proveen protección y aumenta la vida útil de las máquinas. Contiene una mezcla de varios polisacáridos mezclados con preservantes adecuados.	

Pruebas de solubilidad de productos empleados en los procesos de lavado

➤ Prueba 1: Mezcla de Clean wash y Agua, presentándose una solubilidad nula entre los componentes.

Figura 21. Prueba 1 de solubilidad Clean Wash- Agua



➤ Prueba 2: Mezcla de Goma proysol y agua proveniente del acueducto, presentándose una solubilidad para los componentes positiva.

Figura 22. Prueba 2 de solubilidad Goma Proysol- Agua



- Prueba 3: Mezcla de Tinta y Clean Wash, se presenta una solubilidad entre los dos componentes.

Figura 23. Prueba 3 de solubilidad Clean Wash- Tinta



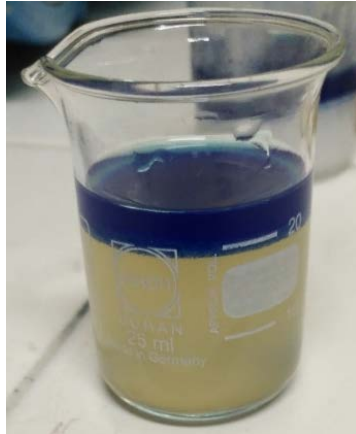
- Prueba 4: Mezcla de tinta y Agua, se presenta no solubilidad entre los componentes.

Figura 24. Prueba 4 de solubilidad Tinta- Agua



➤ Prueba 5: Mezcla de agua, goma proysol, tinta y Clean Wash, se observa una interfase que separa una fase liviana y una fase pesada.

Figura 25. Prueba 5 de solubilidad de todos los componentes



ANEXO C. Prueba de jarras

La determinación de la Turbiedad inicial se realiza por medio de un turbidímetro HACH 2100 Q, para esto es necesario utilizar un factor de dilución de 5 debido al alto valor inicial para esta propiedad, obteniéndose así una turbiedad inicial de 4970 NTU.

$$\text{Factor de dilución (FD)} = \frac{C_i}{C_f} = \frac{V_f}{V_i}$$

Donde, C indica la concentración y V representa el volumen; los subíndices i y f indican la propiedad en su estado inicial y final.

La prueba de Jarras se realiza con un volumen de 80 mL para cada prueba que se realiza con cada coagulante, obteniendo los siguientes resultados:

Sulfato de aluminio

Tabla 9. Prueba de jarras para el sulfato de aluminio

Prueba No,	Peso Teórico (g)	Peso Experimental (g)	Concentración (g/L)	FD	Turbiedad Final (NTU)	% Remoción
1	0,075	0,0749	0,94	3	2070	58,35%
2	0,1	0,1002	1,25	3	888	82,13%
3	0,15	0,1516	1,90	3	1008	79,72%
4	0,3	0,3024	3,78	3	1020	79,48%
5	0,5	0,5027	6,28	3	1314	73,56%

Policloruro de aluminio

Tabla 10. Prueba de jarras para el policloruro de aluminio

Prueba No,	Peso Teórico (g)	Peso Experimental (g)	Concentración (g/L)	FD	Turbiedad Final (NTU)	% Remoción
1	0,1	0,1004	1,26	2	898	81,93%
2	0,15	0,1546	1,93	1	1,83	99,96%
3	0,2	0,2035	2,54	1	2,05	99,96%
4	0,25	0,2536	3,17	1	22,4	99,55%
5	0,3	0,3016	3,77	1	273	94,51%

Cloruro férrico

Tabla 11. Prueba de jarras para el cloruro férrico

Prueba No,	Peso Teórico (g)	Peso Experimental (g)	Concentración (g/L)	FD	Turbiedad Final (NTU)	% Remoción
1	0,03	0,0305	0,38	4	2872	42,21%
2	0,04	0,045	0,56	3	756	84,79%
3	0,065	0,064	0,80	3	393	92,09%
4	0,075	0,083	1,04	3	1383	72,17%
5	0,1	0,1002	1,25	3	2124	57,26%

Para conocer el pH adecuado a trabajar para cada uno de los compuestos, estos se llevan a pruebas con diferente pH para cada dosis óptima de cada coagulante, obteniéndose:

Sulfato de aluminio (1,25 g/L)

Tabla 12. pH óptimo para el sulfato de aluminio

pH	Concentración (g/L)	FD	Turbiedad Final (NTU)	% Remoción
5	1,25	3	750	84,91%
6	1,25	3	630	87,32%
7	1,25	3	1554	68,73%
8	1,25	3	2550	48,69%

Policloruro de aluminio (1,93 g/L)

Tabla 13. pH óptimo para el policloruro de aluminio

pH	Concentración (g/L)	FD	Turbiedad Final (NTU)	% Remoción
4	1,875	1	8,35	99,83%
5	1,875	1	4,18	99,92%
6	1,875	1	4,21	99,92%
8	1,875	1	7,65	99,85%

Cloruro férrico (0,8 g/L)

Tabla 14. pH óptimo para el cloruro férrico

pH	Concentración (g/L)	FD	Turbiedad Final (NTU)	% Remoción
3	0,8125		LODOS FLOTAN	
4	0,8125	3	789	84,12%
6	0,8125	3	1215	75,55%
8	0,8125	3	1296	73,92%

Para la selección del coagulante más favorable, se tienen en cuenta aspectos como: Costo, % de remoción de turbiedad, pH de trabajo y volumen de lodos generados.

Tabla 15. Costos operacionales de tratamiento con cada coagulante

Coagulante	Precio (\$COP/kg)	Dosis óptima (g)/ 80ml	pH	% Remoción	Volumen de agua tratada (l)/ kg coagulante	Costo de tratamiento (\$COP) /L	%Volumen aparente de lodos
Sulfato de aluminio	3800	0,1	[5 - 6]	87,32%	125	30,40	25%
PAC	4500	0,15	[5 - 6]	99,92%	187,5	24,00	37,5%
Cloruro férrico	6000	0,065	4	84,12%	81,25	73,85	25%

ANEXO D. Análisis de corrosividad y reactividad de lodos residuales.

Para generar una cantidad elevada de lodo, se realiza un proceso de coagulación con PAC en sus condiciones óptimas para 11 lotes de 400 mL de fase pesada como muestra la **Tabla 16**, teniendo en cuenta una turbiedad inicial de agua residual de 4970 NTU.

Tabla 16. Lotes realizados para la generación de lodo residual

LOTE	Volumen aparente lodo (mL)	Volumen final agua (mL)	% Recuperación agua	Turbiedad Final (NTU)	% Remoción Coagulación	Turbiedad Final filtro (NTU)	% Remoción Filtro	%Total remoción
1	150	330	83%	1,8	99,96%	1,62	10%	99,97%
2	170	360	90%	3,64	99,93%	1,74	52%	99,96%
3	180	340	85%	4,31	99,91%	1,45	66%	99,97%
4	180	340	85%	6,91	99,86%	1,44	79%	99,97%
5	120	320	80%	1,97	99,96%	1,47	25%	99,97%
6	200	340	85%	2,15	99,96%	1,25	42%	99,97%
7	180	360	90%	2,46	99,95%	1,42	42%	99,97%
8	190	340	85%	1	99,98%	0,98	2%	99,98%
9	180	325	81%	1,49	99,97%	1,23	17%	99,98%
10	150	340	85%	2,45	99,95%	2,35	4%	99,95%
11	120	330	83%	2,1	99,96%	1,64	22%	99,97%
TOTAL	1820	3725						
PROMEDIO	165,45	338,64	84,7%	2,75	99,94%	1,51	32,97%	99,97%

La corrosividad se realiza por el método de pérdida de peso la cual relaciona la velocidad de corrosión con la pérdida de peso en la placa. La velocidad de corrosión para cada testigo en mm/año se realiza de la siguiente forma:

$$V_c = \frac{(m_i - m_f)}{t} * \frac{365}{\rho_{placa}} * \frac{10}{A_{placa}}$$

Donde:

m_f y m_i son la masa final e inicial de la placa en gramos.

t es el tiempo en días que estuvo introducida la placa.

A_{placa} es el área superficial total de la placa en cm^2 .

ρ_{placa} es la densidad de la placa en g/cm^3 .

A continuación, se muestra un esquema del procedimiento seguido para el análisis de corrosividad de los lodos residuales.

Figura 26. Procedimiento para el análisis de la corrosividad del lodo residual



ANEXO E. Degradación fotocatalítica con Dióxido de Titanio.

El seguimiento de la degradación fotocatalítica de los contaminantes que se tienen en el sobrenadante del proceso de coagulación se realiza por medio de espectroscopía UV-VIS.

Curva de calibración. La curva de calibración se obtiene de los valores de absorbancia obtenidos para varias diluciones del sobrenadante en agua destilada. La **Tabla 17** muestra las diferentes diluciones para los dos picos obtenidos en el espectro.

Tabla 17. Curva de calibración para los procesos fotocatalíticos

Cantidad sobrenadante (μL)	Cantidad Base (Agua destilada) (μL)	Porcentaje volumen (μL sobrenadante / μL agua destilada)	Longitud de onda (nm)	
			485	600
			Absorbancia	Absorbancia
0	3000	0,00%	0	0
2000	15000	11,76%	0,009	0,007
2000	13000	13,33%	0,01	0,0075
7000	40000	14,89%	0,0125	0,008
4000	10000	28,57%	0,0265	0,012
4000	7000	36,36%	0,033	0,017
4000	5000	44,44%	0,039	0,02
4000	3000	57,14%	0,055	0,032
4000	1000	80,00%	0,068	0,0375
4000	0	100,00%	0,083	0,046

Las **Figura 27** y **Figura 28** muestran las curvas de calibración para cada uno de los picos presentados.

Figura 27. Curva de calibración para el pico presentado en 485nm

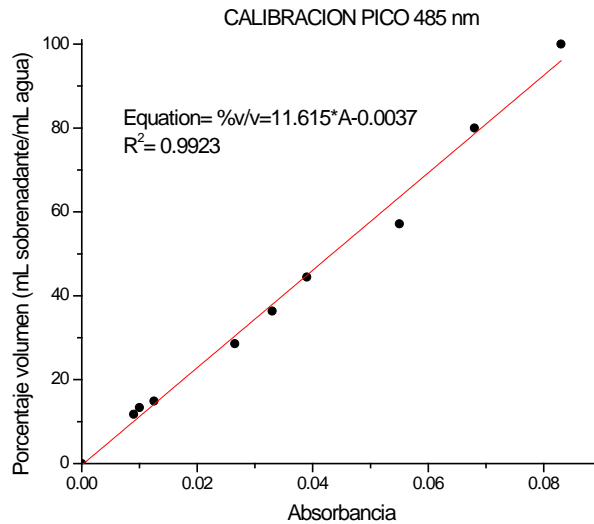
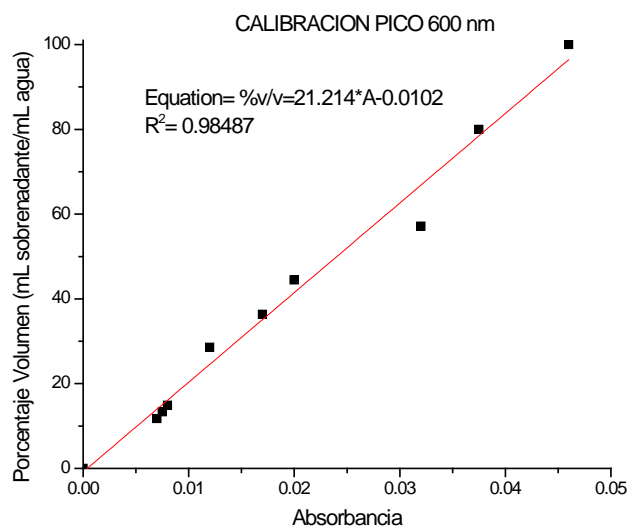


Figura 28. Curva de calibración para el pico presentado en 600nm



ANEXO F. Caracterizaciones realizadas al agua residual de Carbolsas LTDA.

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALÍTICO	Versión: 08	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/08/08	
		Página 1 de 5	



"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1111 de 2015 y Resolución 0921 de 2016, en los parámetros pH, DBO₅, DQO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites, hidrocarburos en agua, metales totales y disueltos en agua, pH y metales totales en suelos, TCLP en residuos peligrosos y toma de muestras puntuales y compuestas"



"Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano"

Informe de resultados No.	I-18-193	Fecha de emisión:	Mayo 08 de 2018
Ciente:	EMPRESA CARBOLSAS LTDA		
Dirección del cliente:	Carrera 13 No. 19 A -45		
Solicitud de servicio No.	18-158	No. de muestras:	04
Fecha de recepción de las muestras:	Abril 17 de 2018		
Muestras recibidas por:	Amparo López		
Fecha de análisis:	Abril 17 de 2018 – Mayo 07 de 2018		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	18-158-01	Tipo de muestra:	Compuesta
Identificación de la muestra:	MUESTRA INICIAL		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Bucaramanga / Empresa CARBOLSAS LTDA		
Fecha del muestreo:	Marzo 22 de 2018		

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
Demanda Bioquímica Oxígeno (mg O ₂ /L)	23700	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química Oxígeno (mg O ₂ /L)	29820	Titrimétrico-Reflujo Cerrado/SM 5220 C
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	4224	Gravimétrico/ SM 2540 D
Sólidos Sedimentables (ml/L)	4,5	Cono Imhoff / SM 2540 F
Grasas y Aceites (mg/L)	42750,6	Extracción Líquido-Líquido / SM 5520 B
Hidrocarburos Totales (mg/L)	15483,3	Extracción Líquido-Líquido / SM 5520 B y F

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/laci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2018/08/08 Página 2 de 5	



Informe de resultados No. I-18-193 Solicitud de servicio No. 18-158

2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	18-158-02	Tipo de muestra:	Compuesta
Identificación de la muestra:	FASE PESADA		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Bucaramanga / Empresa CARBOLSAS LTDA		
Fecha del muestreo:	Marzo 22 de 2018		

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
Demanda Bioquímica Oxígeno (mg O ₂ /L)	8917,5	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química Oxígeno (mg O ₂ /L)	13829	Titrimétrico-Reflujo Cerrado/SM 5220 C
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	50	Gravimétrico/ SM 2540 D
Sólidos Sedimentables (ml/L)	1,5	Cono Imhoff / SM 2540 F
Grasas y Aceites (mg/L)	81,14	Extracción Líquido-Líquido / SM 5520 B
Hidrocarburos Totales (mg/L)	35,68	Extracción Líquido-Líquido / SM 5520 B y F

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqi/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 3 de 5	



Informe de resultados No. I-18-193 Solicitud de servicio No. 18-158

3. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	18-158-03	Tipo de muestra:	Compuesta
Identificación de la muestra:	AGUA DIOXIDO TITANIO		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Guatiguará – CICAT / Empresa CARBOLSAS LTDA		
Fecha del muestreo:	Marzo 22 de 2018		

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
Demanda Bioquímica Oxígeno (mg O ₂ /L)	1850	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química Oxígeno (mg O ₂ /L)	2920,4	Titrimétrico-Reflujo Cerrado/SM 5220 C
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	24	Gravimétrico/ SM 2540 D
Sólidos Sedimentables (ml/L)	0,2	Cono Imhoff / SM 2540 F
Grasas y Aceites (mg/L)	69,25	Extracción Líquido-Líquido / SM 5520 B
Hidrocarburos Totales (mg/L)	9,25	Extracción Líquido-Líquido / SM 5520 B y F

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/laci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 08	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 4 de 5	



Informe de resultados No. I-18-193 Solicitud de servicio No. 18-158

4. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	18-158-04	Tipo de muestra:	Compuesta
Identificación de la muestra:	AGUA CARBON ACTIVADO		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Guatiguará – CICAT / Empresa CARBOLSAS LTDA		
Fecha del muestreo:	Marzo 22 de 2018		

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
Demanda Bioquímica Oxígeno (mg O ₂ /L)	1305	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química Oxígeno (mg O ₂ /L)	2316,26	Titrimétrico-Reflujo Cerrado/SM 5220 C
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	7	Gravimétrico/ SM 2540 D
Sólidos Sedimentables (ml/L)	<0,1	Cono Imhoff / SM 2540 F
Grasas y Aceites (mg/L)	3,39	Extracción Líquido-Líquido / SM 5520 B
Hidrocarburos Totales (mg/L)	<2,4	Extracción Líquido-Líquido / SM 5520 B y F

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465, Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/laci/>, E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 5 de 5	

Informe de resultados No. I-18-193 Solicitud de servicio No. 18-158

Observaciones: Ninguna

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:



Luz Yolanda Vargas Fiallo
Directora del Laboratorio
Química. M.Sc. Química UIS
MP PQ 1144

Elaboró: Amparo López G.

ANEXO G. Registro fotográfico del trabajo realizado en Carbolsas LTDA.

Figura 29. Registro fotográfico del trabajo realizado en Carbolsas LTDA.



Figura 30. Continuación registro fotográfico del trabajo realizado Carbolsas LTDA.

