



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE GRADO (Modalidad Trabajo de investigación):
DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
PROVENIENTES DE CURTIEMBRES CON CARBÓN ACTIVADO
MODIFICADO CON NANOPARTICULAS MAGNETIZADAS.

PRESENTADO POR:

NOMBRE: Juan Daniel Molina Suarez **CÓDIGO:** 506893

NOMBRE: Laura Daniela Angulo García **CÓDIGO:** 506305

DOCENTE ASESOR:

NOMBRE: PhD. Wilfredo Marimón Bolívar

BOGOTÁ, D. C.,

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
PROVENIENTES DE CURTIEMBRES CON CARBÓN ACTIVADO
MODIFICADO CON NANOPARTICULAS MAGNETIZADAS.

PRESENTADO POR:

NOMBRE: Juan Daniel Molina Suarez **CÓDIGO:** 506893

NOMBRE: Laura Daniela Angulo García **CÓDIGO:** 506305

DOCENTE ASESOR:

NOMBRE: PhD. Wilfredo Marimón Bolívar

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D. C.

2020

Contenido	
<u>INTRODUCCIÓN</u>	4
<u>PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROYECTO</u>	6
<u>FORMULACIÓN</u>	6
<u>PLANTEAMIENTO</u>	6
<u>JUSTIFICACIÓN</u>	9
<u>ANTECEDENTES</u>	11
<u>Implementación de carbón activado</u>	14
<u>Uso de Nanopartículas en el tratamiento de aguas</u>	15
<u>El cromo como agente contaminante</u>	18
<u>MARCO TEORICO</u>	20
<u>Industria textil</u>	20
<u>Proceso de curtiembres</u>	21
<u>Calidad del agua</u>	25
<u>Contaminación por cromo:</u>	27
<u>Adsorción</u>	29
<u>Nanotecnología</u>	30
<u>MARCO LEGAL</u>	32
<u>OBJETIVOS</u>	33
<u>METODOLOGIA</u>	34
<u>Caracterización del agua residual a tratar</u>	35
<u>Síntesis de nanomaterial</u>	36
<u>Procesos de pretratamiento y tratamiento del agua residual</u>	39
<u>ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	43
<u>Caracterización del agua residual:</u>	43
<u>Evaluación de pretratamiento y tratamiento en el software GPS-X 7.0</u>	43
<u>Pruebas de remoción de cromo con carbón activado</u>	64
<u>Diseño conceptual de la columna de adsorción</u>	67
<u>CONCLUSIONES:</u>	77
<u>REFERENCIAS</u>	78



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciente (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

INTRODUCCIÓN

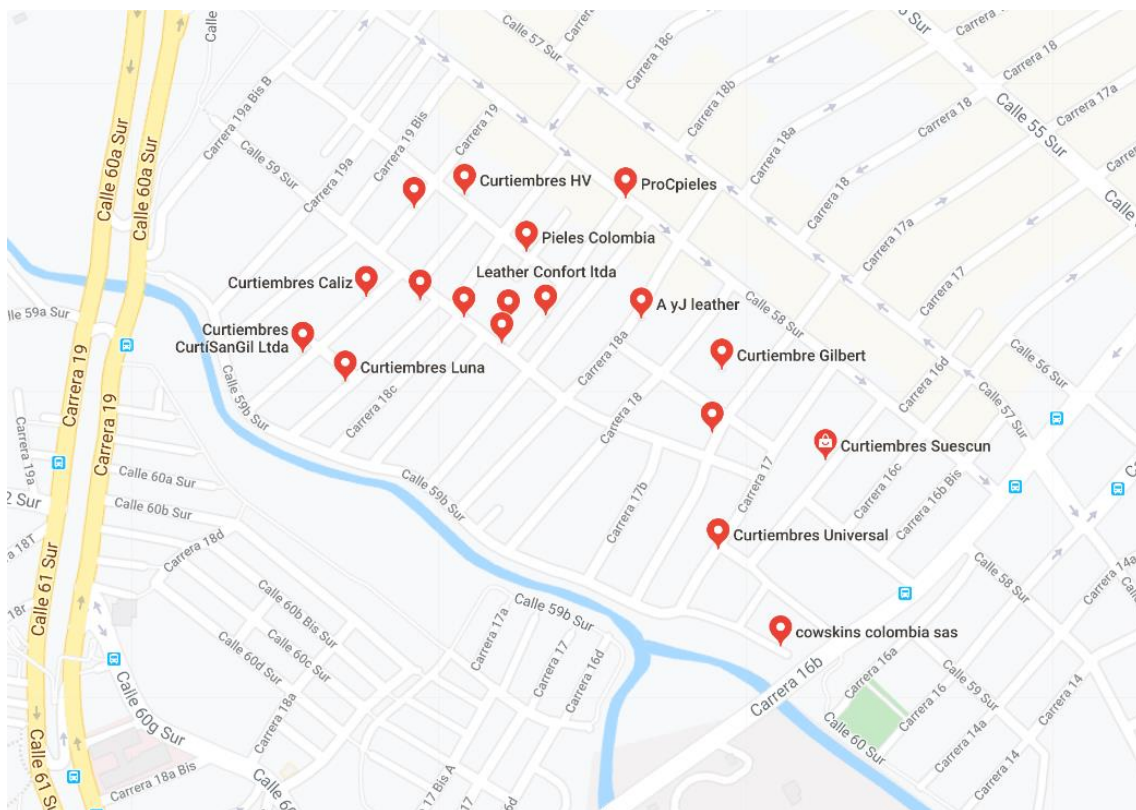
El agua es una fuente de vital importancia en la vida del ser humano, este recurso se considera la sustancia líquida más abundante del planeta y el solvente mundial, presente en casi todas las sustancias y en todos los seres vivos, según BBC News Mundo “Nuestro planeta contiene más de mil millones de billones de litros de H₂O, pero poca se puede tomar”. Pero las cifras de agua contaminada se incrementan día a día, a medida que la población crece el consumo de agua aumenta, las industrias tienen mayor demanda, lo que provoca mayor producción que es igual a mayor contaminación.

Este recurso de vital importancia debe ser utilizado con cierto grado de responsabilidad, haciendo conciencia en uno de los aspectos más influyentes la reutilización del agua. Reciclando las aguas residuales originadas en los procesos industriales, se estima que podría alcanzarse un ahorro de hasta el 90% en energía y del 70% en agua, de esta manera invirtiendo en su recuperación y reutilización.(«La importancia de reutilizar el agua, Sostenibilidad para todos» 2018).

El presente proyecto propone la reutilización del agua residual, enfocándose en el sector de las curtiembres, las cuales utilizan grandes cantidades de agua en su proceso industrial, y muchas veces estas aguas residuales no tienen un buen pretratamiento antes de ser vertidas a los afluentes. En este sentido, varios contaminantes como metales pesados, entre estos el cromo, llegan a los cuerpos de agua donde generan afectaciones ambientales y a la salud humana.(Medio et al. 2008).

El sector curtiembres de Bogotá se ubica en la localidad de Tunjuelito, en zonas aledañas al río Tunjuelo, y es por esto que el proyecto se desarrollara para cada una de las empresas aledañas, encargadas de esta industria, con el fin de evitar vertimientos directos de agua contaminada por la instalación de plantas piloto; la ilustración 1, presenta la ubicación de las principales curtiembres ubicadas cerca al río Tunjuelo.

Ilustración 1: Sector de estudio (Curtiembres aledañas al río Tunjuelo).



Fuente: Google maps

Para la ejecución de este proyecto, se realizaron recolecciones de muestras de agua procedentes de la industria de curtiembres, y se procedió a realizar su caracterización. Tras la determinación de los contaminantes presentes, se realizaron ensayos de laboratorio para eliminar los contaminantes más conflictivos que pudiesen evitar su reutilización en la misma industria de las curtiembres como lo es el cromo residual, y demás metales pesados presentes; además, se planteó el diseño de las plantas para este tratamiento con la utilización de un filtro de carbón activado tanto granular como en polvo modificado con nanopartículas como tratamiento terciario, con el fin de evaluar la eficiencia de cada medio.

Tras el planteamiento del diseño de la planta, se obtuvieron parámetros de calidad óptimos para la reutilización del agua, se evaluó la eficiencia del diseño del filtro, el cual se encargó de la remoción del cromo.

PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROYECTO

FORMULACIÓN

¿Es posible el tratamiento y reutilización de las aguas residuales del proceso de curtido de curtiembres, mediante el uso de nanopartículas magnéticas modificadas con carbón activo Fe_3O_4 ?

PLANTEAMIENTO

En la actualidad el mundo atraviesa una crisis ambiental, cruzando cambios críticos entre ellos la contaminación del agua, ocasionando que diversas actividades humanas generen un impacto importante en la calidad del agua del planeta.(Delgadillo, Camacho y Andrade 2010).

Según muchas organizaciones internacionales, la cantidad de agua potable disponible en el mundo predice futuras crisis de escasez. Según la ONU, un 3,1% de las personas que mueren anualmente en el planeta lo hacen por consumo de aguas contaminadas, lo que equivale a 2,2 millones de personas. Entre los principales contaminantes del agua se encuentra los desechos químicos de las fábricas e industrias.(«Agua | Naciones Unidas» 2017).

Las curtiembres son industrias poco conscientes del impacto que generan al no tratar el agua que utilizan durante el proceso del curtido del cuero. El proceso consiste en la evolución de la piel animal en cuero. Donde las pieles después de ser limpiadas de su grasa, carnaza, y pelo o lanas, son sometidas a la acción de diferentes agentes químicos que interaccionan con las fibras de colágeno para obtener un cuero estable y durable.

El proceso de transformación de las pieles en cuero se caracteriza por su excesivo consumo de agua; en los países en vías de desarrollo se llega a alcanzar un valor de 100 metros cúbicos por tonelada de piel bruta salada procesada. Por otra parte, se emplean 442 kg de productos químicos por cada tonelada de piel procesada, la sección de mayor consumo es la de curtido equivalente a un 42% del proceso. De la generación total de residuos, que es de 696 kg por tonelada, el 21% contiene cromo (piel partida, recortes, polvo de

lijado y virutas), el 7% es sal usada para la conservación de las pieles y el 72% corresponde a residuos libre de cromo (descarne, piel no usada, recortes y residuos de pelo) (Méndez Pampin, 2007). Así mismo, las etapas de ribera y curtido generan la mayor carga contaminante porque aportan un 90% del efluente final, referidas por altas concentraciones de materia orgánica (expresada como Demanda Química de Oxígeno – DQO y Demanda Biológica de Oxígeno – DBO), cromo, sulfuro, grasas y aceites y sólidos, que en la mayoría de los casos son vertidos al alcantarillado sin un tratamiento adecuado.(Windows et al. 2007).

En la industria de curtiembres, los procesos más importantes para convertir la piel en cuero se efectúan sobre medios acuosos, es así como el proceso productivo genera una alta contaminación del recurso hídrico utilizado, al ser descargados al sistema de alcantarillado del sector sin mayor tratamiento, ya que una parte de los insumos químicos manejados durante los procesos, así como los residuos sólidos que se generan, son vertidos al río Tunjuelito.(Sistema, Gestión y Hseq 2018).

La disminución drástica de los niveles de contaminación en los efluentes de las curtiembres del sector de San Benito, localidad de Usme, Bogotá, desde concentraciones promedio de 2.500 mg/L hasta concentraciones inferiores a 1 mg/L, podría producir un impacto positivo en las aguas del río Bogotá, y por lo tanto un efecto favorable en el escenario del tratamiento de las aguas residuales del mismo, teniendo en cuenta que en dicho sector se agrupa más del 50% de las curtiembres de todo el país.(SDA y AlcaldíadeBogotá 2012).

Otro de los ascendentes problemas ambientales que provocan las curtiembres es la contaminación producida por la emisión de sulfuros (S_2^-) y materia orgánica en la etapa del pelambre. El proceso de curtido, consiste en someter las pieles a un tratamiento con una solución de sulfuros en medio alcalino, con el objetivo de separar el pelo de la piel (en realidad, pelo, raíces de pelo y epidermis). En este proceso se utilizan como reactivos, sulfuro de sodio (Na_2S), sulfuro ácido de sodio ($NaHS$), y bases como cal o hidróxido de sodio y aminas, para mantener un $pH > 11$ y otros reactivos, como enzimas, que facilitan el

proceso (AdzetAdzet, J. M^a. 1985). Estas emisiones contaminan las aguas superficiales y aguas subterráneas. Los procedimientos que emplean las curtiembres son insuficientes para reducir el impacto ambiental ocasionado.(Sistema, Gestión y Hseq 2018).

Con el fin de contrarrestar este impacto ambiental, se pretende buscar alternativas por medio del uso de nanotecnología para el tratamiento de aguas, con el que se pretende disminuir y erradicar la contaminación presente en los afluentes de agua, para que esta sea reutilizada en los mismos procesos químicos.(Sistema, Gestión y Hseq 2018).

JUSTIFICACIÓN

Las curtiembres representan, uno de los problemas más grandes de contaminación en muchos países en desarrollo; gran parte de estos desechos son vertidos directamente a los afluentes sin previo tratamiento ya que muchas empresas dedicadas a esta industria, curten el cuero con cromo, lo que implica que este elemento químico tarde o temprano empezara a causar problemas para la fauna y el ecosistema en general que rodea el afluente.

Las elaboraciones del curtido con cuero, son consideradas actividades sucias y contaminantes, esto implica la utilización de inmensos volúmenes de agua por cada proceso, estaciones de conservación de las pieles con las dosis necesarias de productos químicos tales como sales, cal, sulfuros, cromo y azocompuestos que, aunque estos beneficien la calidad, a su vez proliferan la contaminación hídrica.

Se estima que de estas industrias más del 50% drenan sus aguas residuales a ríos o alcantarillas, sin pretratamiento, el otro porcentaje tiene rejillas, pero no operan correctamente por falta de mantenimiento ni interés del propietario.

En Colombia hay numerosos tratamientos de aguas industriales, que comprenden un extenso número de técnicas, a partir las rigurosas mecánicas utilizadas en plantas convencionales, hasta las de manejo de complejas reacciones bioquímicas manejadas en plantas industriales. La eliminación de sulfuro y cromo es la mayor necesidad que presentan los RILES (Residuos líquidos industriales) de curtiembre para su respectivo tratamiento.(«Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas residuales: Avances, Ventajas y Desventajas Nanotechnology an alter» 2018).

Una alternativa para solucionar tal problemática es la nanotecnología que ha sido eficiente al ser usada en el pasado para remediación de aguas subterráneas, en biorremediación, remoción de tintas y en procesos de filtración. Por lo tanto, la nanotecnología es efectiva en tratar problemas relacionados con agua, ya que el uso de nanomateriales favorece al desarrollo de tratamientos más eficientes y avanzados en agua. De ahí la importancia de

conocer los últimos desarrollos en nanotecnología y nanomateriales con foco en los potenciales y limitaciones para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales para mejorar la calidad del efluente y para la reutilización de agua.(«Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas residuales: Avances, Ventajas y Desventajas Nanotechnology an alter» 2018).

Para tal remoción de cromo y metales pesados, se busca la implementación de plantas de tratamiento pilotos, en cada una de las empresas asociadas a la industria de las curtiembres, con la finalidad de reutilizar un porcentaje de toda el agua utilizada en el proceso de curtido; con la debida aplicación de las fases que componen el tratamiento de un agua residual, y su respectivo diseño, hasta llegar a un filtro, que será el parámetro de evaluación final ya que poseerá carbón activado modificado con nanomateriales magnéticos para la remoción de los metales anteriormente mencionados.

ANTECEDENTES

La industria de las curtiembres, es un problema, que ha afectado globalmente a muchos países en desarrollo, los cuales encuentran con gran facilidad que la modalidad de deshacerse de los desechos que esta industria produce es arrojarlos directamente a sus ríos, sin previo tratamiento, y no prevén las consecuencias que tal vertimiento puede llegar a causar; a continuación, se presentará algunas investigaciones que han buscado analizar y buscar solución a tal contaminación.

Colombia, que está dividida en 34 departamentos y 1082 municipios, tiene abundantes recursos hídricos renovables con más de 1000 sistemas fluviales y 720,000 microcuencas. El nivel de lluvia supera los 2000 mm por año en más del 88% del país, con un promedio nacional de 3000 mm por año. El volumen total de lluvia es de 3425 km³ y el volumen de evaporación es de 1313 km³, lo que da una disponibilidad total de agua de poco más de 2000 km³ por año.

A pesar de una alta reserva de fuentes de agua, los cuerpos de agua están altamente contaminados debido a la descarga de las industrias. Por ejemplo, la contaminación del río Bogotá comienza muy cerca de su fuente, con descargas de la industria del curtido. Más abajo, un tramo de 150 km recibe aguas residuales y desechos de municipios, mataderos, empresas hortícolas, depósitos de carbón, fundiciones, plantas térmicas y otras industrias. Para cuando el río llega a Bogotá, ya está transportando el 35% de su contaminación. En Bogotá, el sistema de alcantarillado de la ciudad a través de tres afluentes desemboca en el río sin purificación. (Kathuria 2006)

A nivel Colombia, las principales formas de combatir la contaminación efectuada por la industria de las curtiembres es la creación de decretos y normas las cuales buscan reducir las cantidades máximas de contaminantes que pueden ser descargadas directamente al río.

En estas guías se hacen descripciones de los materiales que pueden aparecer en los desechos de curtiembre, incluyen, entre otros: pelo, pedazos de piel y

carne, sangre, estiércol, sales, sal común, sales de cromo y sulfuros. Así, los residuos pueden ser del tipo gaseoso, líquido o sólido.

Existen una serie de medidas para prevenir o disminuir la contaminación generada por dicha actividad.

En su mayoría son de fácil aplicación y más aún, producen reducciones en los costos y mejoras productivas. También existen soluciones a los problemas producidos por los desechos generados al final del proceso, los denominados end of pipe.

A su vez, estas guías buscan identificar las medidas de prevención de los potenciales impactos; los métodos de control de la contaminación (end of pipe) recomendados, los costos asociados; y los aspectos relacionados con la seguridad y salud ocupacional. Como marco legal, entrega la información referente a la normativa medioambiental vigente en Chile, y los procedimientos de obtención de permisos requeridos por la industria. (Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 1999)

Pero para casos severos ya analizados a nivel de estudio, se puede tomar de ejemplo el río Buriganga. El río Buriganga en Bangladesh está sujeto a una severa contaminación y es considerado como uno de los ríos más contaminados del mundo. Especialmente, por el desarrollo de la industria de la curtiduría en Hazaribagh que ha ayudado a la economía de Bangladesh, pero está causando contaminación e interrupción con los ecosistemas y en general con el medio ambiente de la cuenca. Como resultado, el medio ambiente poco a poco ha empeorado. De acuerdo con la Oficina de Promoción de Exportaciones (EPB) de Bangladesh, los ingresos de exportación del sector del cuero fueron US \$ 401,64 millones en 2009-2010, que fue un importante cambio de divisas e ingresos en la economía de Bangladesh. Pero la ciudad de curtiduría Hazaribagh, que posee más de 196 curtiembres en su territorio está descargando sus residuos peligrosos todos los días directamente al río Buriganga sin ningún tratamiento. Estos vertimientos son los responsables de la alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y bajo oxígeno disuelto (DO) en

el agua de Buriganga; junto con el aumento en la exportación de cuero, la calidad del agua de Buriganga disminuyó drásticamente lo cual ha causado que las comunidades aledañas, no puedan consumir del agua del río; pero ante la necesidad, muchas familias optan por consumir esta agua causando enfermedades y llegando a hacer letal en los más pequeños.(Kibria 2013).

Para tratar tales efectos, se realizó un estudio entre el año 2017 y 2018 de reubicación de las curtidoras aguas arriba del río; esto con el objetivo de aprovechar las caídas de la cabeza hidráulica para generar una autodepuración del río; y analizando también las posibles consecuencias que puede llegar a acarrear tal reubicación.(Islam 2018).

Otro de los lugares más afectados por la contaminación generada por la industria de las curtiembres es el mar mediterráneo, todos los países aledaños a este mar, vierten sus residuos industriales y domésticos sobre este inmenso cuerpo de agua; generando así la contaminación de su afluente que tarde o temprano ha de llegar a los océanos. En consecuencia a esto, se han hecho estudios y se han identificado las principales consecuencias que conllevan tales vertimientos.

Dentro del sector industrial del Mediterráneo, el sector de la curtiduría se considera un gran consumidor de agua y una industria altamente contaminante. El agua utilizada puede provenir de ríos, agua subterránea, suministro de fuentes colectivas o privadas y la mala gestión hace que los recursos hídricos se vuelvan un problema por la escasez de agua limpia en algunos lugares y el alto riesgo para las poblaciones locales y los ecosistemas del mediterráneo.

El consumo de agua en el sector de la curtiduría incluye las aguas de proceso y las aguas técnicas necesarias para la limpieza, el uso de energía hidroeléctrica, y tratamientos de residuos e higiene. El consumo de agua depende del proceso en gran medida de una curtiduría a otra, dependiendo de la tecnología utilizada, los procesos involucrados, las materias primas usadas y los productos fabricados, pero representa el 80% del consumo total de agua.

Es por estos vertimientos de aguas residuales que los afluentes se ven afectados ya que la composición de los desechos acuosos varía bastante de una curtiduría a otra. Sin embargo, todo el efluente acuoso no tratado de las curtiembres puede causar un impacto significativo en el medio ambiente.

Implementación de carbón activado

Un elemento muy utilizado en el tratamientos de aguas residuales, es el carbón activado, el cual ha sido usado para múltiples tratamientos de aguas residuales en otros estudios; como el de remoción de As(III); uno de los más tóxicos metales adicionados al agua el cual llega tras la fundición y combustión de aceites fósiles. («Determinación de As (III) y As (V) en aguas naturales por generación de hidruro con detección por espectrometría de absorción atómica» 2003).

En el presente estudio referenciado, se aplicó carbón activado, para la remoción de este metal, se realizó con la modificación de un carbón activado, el cual fue recubierto con óxido de circonio hidratado ($ZrO(OH)_2$) y dióxido de manganeso (MnO_2), preparados a través de precipitación hidrotermal. Los resultados del estudio, mostraron que el As (III) puede ser oxidado a As(V), por el dióxido de magnesio, y luego absorbido por el óxido de circonio hidratado. Los resultados mostraron muy buena eficiencia de este carbón modificado; removiendo hasta 132.28 mg/g de As(V), esto debilitando la aglomeración de este material en el agua; y llegando a ser los residuos de As (III) de $7\mu g/L$ cumpliendo con los estándares de agua potable.(Yin et al. 2019).

En otro estudio se evaluó la eficiencia del carbón activado para remover iones de clorito y dióxido de cloro por carbón activado en un medio acuoso. Los experimentos que se llevaron a cabo con dos carbonos activados comerciales (CECA 40 y A) tenían la intención de mostrar la influencia de ciertos parámetros, como la concentración inicial de ClO_2 , la dosis de carbón y la influencia de materia orgánica sobre la naturaleza de los productos de reacción. Los resultados obtenidos en ese estudio mostraron que los reactores estáticos y dinámicos tienen una buena acción entre el carbón activado sobre

el ion clorito y el dióxido de cloro lo que conduce a la formación de cloruro, oxígeno y clorato como productos finales. (Molina, Monteverdi y Bettahar 1999)

Con lo señalado anteriormente, los tratamientos de aguas residuales, siempre buscan eliminar un contaminante en específico, y en muchos casos son eficientes, económicos, pero se quedan relegados a la sola eliminación de tal contaminante. Por esta razón, se debe investigar e indagar sobre las modificaciones viables a los materiales ya existentes, y en el siguiente proyecto referenciado se plantea la creación de un sistema para el tratamiento de aguas residuales procedentes de curtiembre con carbón activado modificado con nanomateriales magnetizados.

Uso de Nanopartículas en el tratamiento de aguas

A nivel del estudio de las nanopartículas, se tienen antecedentes de la utilización de nanopartículas de hierro en el tratamiento heterogéneo de oxidación de Fenton de las aguas residuales de la curtiduría. En este estudio se realizó una comparación con el proceso de oxidación convencional, que implica la adición de Fe (II). La influencia de los parámetros operativos principales, como el pH, la temperatura y la cantidad de reactivos, en las especies fenólicas totales, se investigaron sobre los compuestos orgánicos totales, el contenido de Cr (VI) y la reducción de la demanda química de oxígeno.

La oxidación heterogénea de Fenton resultó más eficiente y rápida con respecto al proceso convencional, pero se requirió una mayor cantidad de hierro en el proceso. En este caso, las condiciones óptimas se evaluaron a $H_2O_2/COD(w/w)=0.5$, $nZVI/H_2O_2 (w/w)=0.75$ y $pH=3$, logrando así la eliminación total de Cr (VI) así como una notable eficiencia de degradación de COD y fenoles (hasta 73 y 88%, respectivamente). Se encontró que los mejores resultados se obtuvieron con la combinación de los dos procesos, fijando el funcionamiento óptimo convencional de Fenton con los parámetros ($H_2O_2/COD (w/w) = 0.75$, $Fe (II)/H_2O_2 (w/w) = 0.15$ y $pH = 2.5$), adoptando un $nZVI/H_2O_2(w/w)$ relación igual a 0.2. Para estas condiciones, se permitió reducir la cantidad de catalizador utilizado con respecto al proceso de Fenton

heterogéneo, consiguiendo una notable eficiencia de eliminación de COD y fenoles (87.44 y 94.04%, respectivamente). También se logró la producción de lodos de hierro de dicho proceso combinado estando cerca al obtenido en el por un tratamiento convencional. (Huber 2008).

Las investigaciones sobre nanopartículas se han evaluado y agrupado en la síntesis verde que es un enfoque simple, ecológico y emergente de la síntesis de nanopartículas y actualmente, atraer a la comunidad científica de todo el mundo. En un estudio, el objetivo fue sintetizar NP de dióxido de titanio verde (TiO_2) y evaluar su rendimiento para el tratamiento fotocatalítico de agua residual de curtiembres, después del proceso de tratamiento secundario. Las NP de TiO_2 se sintetizaron usando extracto de una planta, a temperatura ambiente para examinar su capacidad de tratamiento para aguas residuales de la curtiduría. Además, los NP de TiO_2 sintetizados en verde se caracterizaron además por un espectrofotómetro UV-Visible. Los resultados confirmaron la síntesis de las NP esféricas de TiO_2 y también desplegaron la presencia de fitoquímicos en el extracto de la hoja, permitiendo la estabilización de las NP. Además, se aplicaron los NP de TiO_2 sintetizados en verde para testificar su potencial para la eliminación simultánea de la demanda química de oxígeno (DQO) y el cromo (Cr) de estas aguas en un tratamiento secundario. Durante el tratamiento fotocatalítico de las aguas residuales en un Reactor cilindroparabólico (PTR) de diseño propio y fabricado, se eliminó el 82.26% de DQO y el 76.48% de Cr total. (Goutama et al. 2018).

Otra investigación realizada busca dar una solución sostenible y ambientalmente amigable para la producción de nanopartículas magnéticas funcionalizadas y eficientes en la remoción de metales pesados, específicamente mercurio en hidrosistemas contaminados. En ese estudio se realizó el comparativo del ciclo de vida de la obtención de nanopartículas de magnetita por metodología verde en comparación con la metodología convencional de co-precipitación. Así mismo, se evaluó la capacidad de remoción de iones de mercurio del material obtenido en aguas contaminadas, identificando condiciones favorables de adsorción tales como pH, capacidad

máxima de adsorción, tiempo, competitividad con otros metales e iones. Por otra parte, se buscó estudiar la estabilidad de las nanopartículas e interacción con otras sustancias en aguas sintéticas y reales, así como identificar el potencial de implementación en aguas de producción a partir de la remoción de otros contaminantes como carga orgánica y compuestos de azufre.

Como resultados del proyecto se muestran las ventajas de utilizar glutatión como agente reductor/estabilizante en la obtención del material magnético con un valor de magnetización de saturación de 85.4 emu/g, similar al valor teórico y al reportado por el método convencional de síntesis por co-precipitación. El impacto ambiental de esta metodología verde tiene una disminución del 99.42, 76.17 y 27.14% en formación de material particulado, consumo de combustibles fósiles y toxicidad humana respectivamente. Adicionalmente, el nanomaterial obtenido presenta una afinidad para remover iones de mercurio en medio acuoso con capacidad de adsorción de 34.88 mg/g para concentraciones iniciales cercanas a las reales de 1 ppm en aguas sintéticas y una reducción promedio de 85% en aguas superficiales reales. Concluyendo finalmente que estas partículas no generan toxicidad, y serán las nanopartículas que se utilizarán para el desarrollo del presente proyecto. (Wilfredo Marimón Bolívar 2018).

Pero, las nanopartículas no solo se encuentran en formas esféricas, las cuales permiten una uniformidad viable en el tratamiento de aguas, se tienen antecedentes del uso de nanofibras para el tratamiento residual de aguas de curtiembres. En el presente ejemplo, se trató de demostrarla eficiencia del uso de nanofibras de polímeros modificados con cisteína para la eliminación rápida y eficiente de Cr (III) de muestras reales de aguas residuales de la curtiduría. Se evaluaron varios parámetros como el pH, la carga de nanofibras y el tiempo de exposición. Se optimizaron para lograr la máxima eliminación. Como resultados se encontró que los parámetros óptimos para la utilización de nanofibras es de 0.1 mg de nanofibras por ml de agua residual de la curtiduría con un pH de 5.5 y un tiempo de exposición de 45 min. Casi el 99% de Cr (III) se eliminó en estas condiciones ideales, lo que demuestra la eficacia de este material.

Como conclusión se pudo definir que los materiales poliméricos muestran un gran potencial para la eliminación de cationes de metales pesados de las aguas residuales.(El-Sherif et al. 2013).

El cromo como agente contaminante

La presencia del cromo en las aguas residuales, se ha evaluado y se han realizado estudios que intentan determinar la resistencia del *Paecilomyces lilacinus* al Cromo [aislado mediante una técnica de cultivo de enriquecimiento a 25 000 mg/l de Cr (III)] para crecer y eliminar Cr [Cr (VI) y Cr (III)] de dos efluentes de la industria de la curtiduría no diluidos físicoquímicamente diferentes en presencia de azúcar de caña como fuente de carbono. Tales estudios se realizaron teniendo en cuenta la posible integración de los procesos biológicos en los procesos generales de eliminación y recuperación de Cr para mejorar su eficiencia y sostenibilidad ambiental. El hongo tiene un amplio rango de tolerancia al pH y puede reducir el Cr (VI) tanto en condiciones ácidas (pH 5.5) como alcalinas (pH 8.0). El hongo mostró la capacidad de eliminar Cr (VI) (1.24 mg/l) y Cr total (7.91 mg/l) del efluente de la curtiduría por debajo del nivel de detección dentro de las 18 horas y las 36 horas de incubación, respectivamente, y la capacidad de acumularse 189.13 mg Cr g de biomasa seca dentro de las 600 horas de incubación del efluente de cromo usado [que contiene 3731.4 mg/l de la concentración inicial de Cr (III)].

El ese estudio se reveló la fase logarítmica del crecimiento para la reducción específica máxima de Cr (VI) y la fase estacionaria del crecimiento para su acumulación específica máxima de ambas formas de Cr [Cr (III) y Cr (VI)] en su biomasa. En medios de crecimiento a 50 mg/l y 200 mg/l de Cr (VI), *P. lilacinus* mostró una reducción del 100% dentro de las 36 horas y las 120 horas de incubación, respectivamente. El alto grado de correlación positiva y el grado estadísticamente alto de relación ($r_2 = 0.941$) entre el crecimiento fúngico y la reducción del% Cr (VI) por el hongo apoyan el papel del crecimiento celular metabólicamente activo en la reducción del Cr (VI) por el hongo. Los resultados indican que se pueden recomendar tiempos de retención de sólidos (lodos)

expandidos (SRT) para la eliminación de Cr (III) mediante acumulación. En el caso de Cr (VI), la reducción necesita una prioridad; por lo tanto, se recomienda un SRT no expandido para diseñar un biorreactor completamente agitado de flujo continuo para que se pueda mantener una fase logarítmica de crecimiento celular durante el proceso de reducción. Ese estudio revela el gran potencial de los hongos *P. lilacinus* para la eliminación de Cr del efluente de la curtiduría y el efluente de cromo gastado. (Sharma y Adholeya 2011).

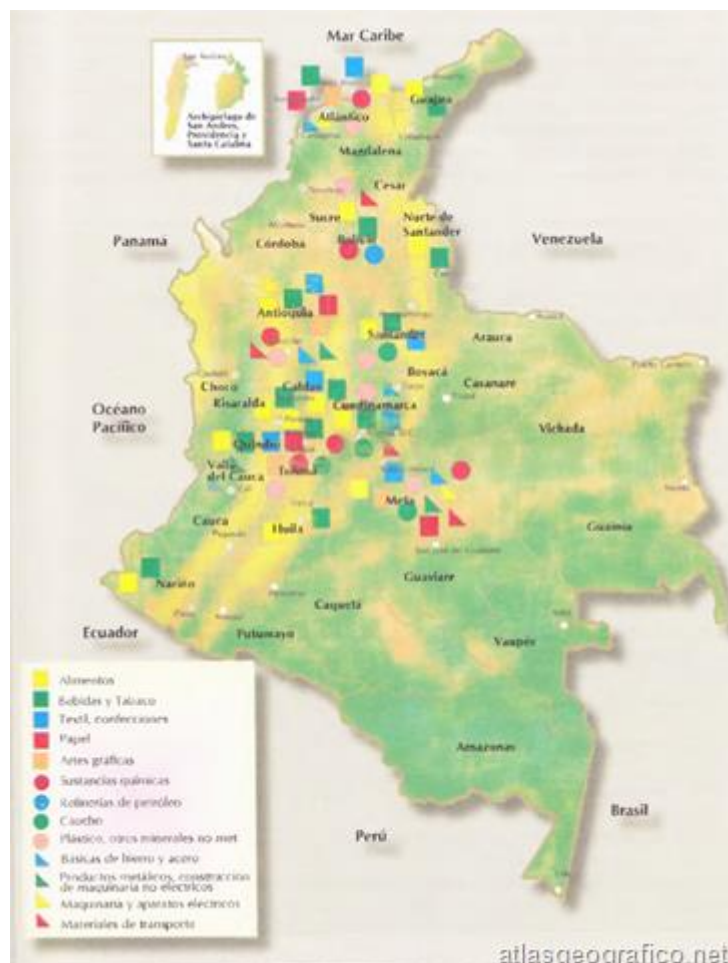
En base a lo expuesto anteriormente, como investigaciones, ensayos y resultados obtenidos, las aguas procedentes de la industria de curtiembres, han sido tratadas de diferentes formas con el fin de reducir algún contaminante, y cada metodología utilizada ha mostrado eficiencia para remover el contaminante evaluado. Pero en cada uno de estos, lo que se busca es el vertimiento al afluente y no la reutilización del agua residual tras su tratamiento en la misma industria de las curtiembres.

MARCO TEORICO

Industria textil

La industria textil y de confección es uno de los sectores industriales con mayor tradición y dinamismo en la historia económica colombiana. Desde el comienzo de este siglo, empresas textiles aportaron al país fuentes de generación de empleo y creación y utilización de nuevas tecnologías. La industria textilera empezó produciendo con hilazas importadas, luego emprendió el proceso de integración vertical que dio paso a la autosuficiencia en los años 50. Desde entonces empezó el crecimiento de la industria algodonera y posteriormente el comienzo de las fábricas productoras de fibras sintéticas y artificiales (Málaga Tello 1991).

Ilustración 2: Mapa industrial de Colombia.



Fuente: Industria Colombiana (<https://atlasgeografico.net/industria-colombiana.html>) 2013

Según la Corporación Autónoma Regional (CAR, 2006), en Colombia se localizan 737 curtiembres de las cuales 4 se clasifican como gran empresa; estas últimas procesan el 25% del total, equivalente a 3,5 millones de pieles por año. Dentro de la mediana industria se incluyen 8 curtiembres que procesan el 17% de la producción total, mientras el 58% restante es procesado por las otras 725 curtiembres, distribuidas así: 121 en el municipio de Villapinzón, 50 en el municipio de Chocontá, 9 en el municipio de Cogua y 350 en el sector de San Benito en Bogotá.

La industria curtiembre orienta su actividad productiva hacia el marketing de productos de marroquinería, talabartería y calzado. En Colombia, la principal fuente de extracción de materia prima se localiza en el ganado bovino, del cual se obtiene la piel y el cuero utilizado en el proceso productivo de las industrias curtiembres. El objetivo de las industrias curtiembres es desarrollar un procedimiento adecuado sobre estas pieles mediante el uso de sustancias como el ácido fórmico y el cromo, que modifican su aspecto químico y físico para finalmente transformarlas en productos aptos para la comercialización¹.

Es durante este proceso de transformación que emergen residuos contaminantes de las industrias curtiembres que desembocan directamente en el río Bogotá, deteriorando la calidad de vida de las personas que laboran o residen allí e impactando nocivamente el medio ambiente y el entorno.

Según el Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA, 1997), en 2005 se cerraron 35 industrias del sector con el objetivo de mejorar la descarga de los residuos al alcantarillado. Por otra parte la entidad solicita a las curtiembres implementar trampas para controlar grasas y residuos sólidos, ya que la producción de estos últimos alcanza las 50 toneladas diarias.(Artuz, Martínez y Morales 2011).

Proceso de curtiembres

Las curtiembres son industrias poco conscientes del impacto que generan al no tratar el agua que utilizan durante el proceso del curtido del cuero. El proceso consiste en la evolución de la piel animal en cuero. Donde las pieles después

de ser limpiadas de su grasa, carnaza, y pelo o lanas, son sometidas a la acción de diferentes agentes químicos que interaccionan con las fibras de colágeno para obtener un cuero estable y durable. La oficina de industria y ambiente del PNUMA (1990) presenta una descripción detallada del proceso industrial y de sus residuos.

Las operaciones y procesos para la producción de cuero se agrupan en tres etapas: Etapa de ribera, Etapa de curtido y Etapa de acabado.

Etapa de ribera:

Esta etapa comprende los procesos que permiten la eliminación del pelo o lana de la piel, en ella se presenta el mayor consumo de agua y su efluente genera un elevado pH. Devuelve el estado húmedo inicial a aquellas pieles que se encontraban en un lugar donde se conservan antes de ser llevadas a las curtiembres, así mismo permitiendo la desinfección y limpieza antes del proceso de pelambre. Se emplea sulfuro de sodio y cal para eliminar la epidermis. Antes de empezar con la etapa de curtido se procede al descarne, donde se separan las grasas y carnazas aun existentes en la parte interna de la piel.

Etapa de curtido

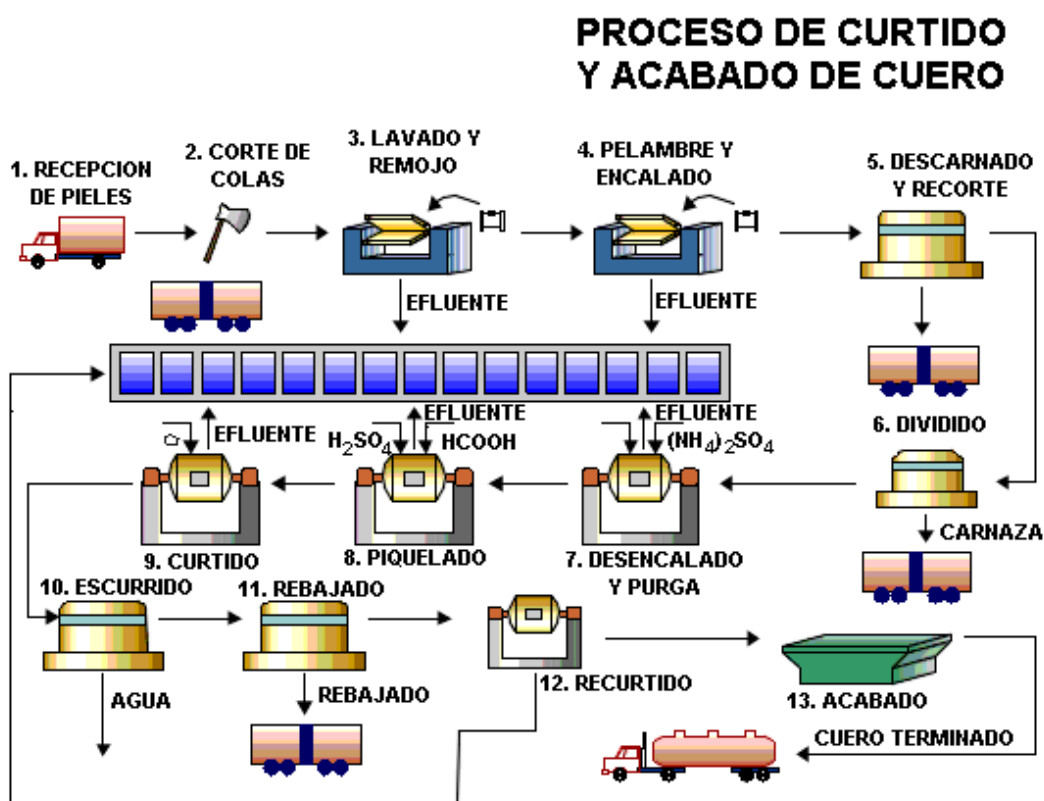
Comprende las operaciones y procesos que preparan la piel para ser curtidas y transformada en cuero; genera un efluente con pH bajo al final de la etapa. Los procesos de desencalado, desengrase, y purga eliminan la cal, sulfuro de sodio y las grasas contenidas en la piel y limpiando los poros de la misma. El consumo de agua que se presenta en esta etapa no es tan alto como en la etapa de ribera. Al final de esta etapa se tiene el conocido "wet blue" (proceso de aplicación y secado en cromo), que es clasificado según su grosor y calidad para su proceso de acabado.

Etapa de acabado

Esta etapa de acabado tiene las operaciones y procesos que le dan al cuero las características finales que requiere para la confección de diferentes artículos realizando el recurtido, teñido, suavizado y pintado final del producto. («CEPIS/OPS-Informe técnico sobre minimización de residuos en una curtiembre» [sin fecha])

El siguiente esquema trabaja todos los procesos aplicados a la hora de curtir el cuero:

Ilustración 3: Proceso de curtido y acabado del cuero.



Fuente: wernerapazaUNT; Proceso de acabado y curtido del cuero

La descarga de aguas residuales en los ríos o canales vecinos que llegan desemboca al final en el mar, provocando el deterioro físico, químico y biológico de las corrientes receptoras. Las aguas residuales no tratadas

contienen tres tipos principales de materiales y químicos que causan daños importantes:

- Sólidos suspendidos
- Materiales orgánicos
- Productos químicos y residuos tóxicos.

Primero, los sólidos suspendidos son generados principalmente en los efluentes por el encalado. Los sólidos suspendidos tales como la cal y las sales insolubles producen en el agua problemas por sedimentación en el fondo de los ríos receptores, destrucción de hábitats, creación de microorganismos y otros elementos vivos.

En segundo lugar, la materia orgánica se descomponerse muy rápidamente en el agua, agotando el oxígeno disuelto necesario para este proceso y también causando malos olores dado que el oxígeno es vital para la vida acuática, y el bajo contenido de oxígeno disuelto afecta seriamente la biodiversidad del agua.

En tercer lugar, los productos químicos y los residuos tóxicos pueden variar dependiendo del producto terminado y los procesos elegidos, pero los productos químicos como el sulfuro, sodio, hidróxido de calcio, ácidos, carbonatos, sulfitos, sulfatos, cromo, amoniaco, solventes, etc. son normalmente generados por procesos de bronceado. El derrame de estos productos químicos hace que el uso del agua para fines o actividades domésticas o de ocio sea peligroso.

Con el fin de mejorar esta problemática se plantea la gestión del medio ambiente sobre la industria de curtiembres en el año 2015 con el fin de reducir los impactos en la salud humana y el medio ambiente por lo cual se recomienda implantar en todas las curtiembres las medidas mínimas de gestión en un entorno no tecnológico.

- Productos químicos y residuos peligrosos. Todos los productos químicos, residuos combustibles peligrosos y fósiles debe almacenarse

en un área cubierta y pavimentado con un sistema de restricción secundaria de capacidad en al menos un área equivalente a la cantidad almacenada para prevenir la contaminación del suelo y agua subterráneas.

- Aguas residuales. Antes de la descarga de las aguas residuales en el sistema de alcantarillado municipal o cualquier otro lugar, se han de determinar las características del flujo de las aguas residuales y se debe establecer un monitoreo con el fin de indagar si es necesario el previo tratamiento por la cantidad de contaminantes presentes; esto con el fin de respetar la legislación local del medio ambiente.
- Otras aguas. Las aguas residuales no tratadas no deben estar altamente contaminadas si se libera en ríos, canales, aguas subterráneas y terreno circundante, para evitar cualquier impacto ambiental, o de importancia económica y social.
- Subproductos y desechos. Todo desperdicio potencialmente peligroso debe ser analizado en cuanto a sus características para saber si se pueden clasificar como peligroso o no peligroso y para poder configurar un sistema gestión y reciclaje adaptados a cada tipo de residuos.(UNEP 2015).

Pero, para entornos un poco más desarrollados, se han de implementar mecanismos de tratamiento de aguas los cuales busquen reducir al máximo la concentración de los contaminantes industriales que se han de verter a los afluentes, y es aquí donde se plantea la implementación de tecnologías alternas para el tratamiento de aguas, partiendo de mecanismos ya existentes como filtros, los cuales serán modificados por la adición de agentes magnetizados.

Calidad del agua

Los ríos y mares colombianos reciben y transportan cargas contaminantes de agua utilizadas en los diferentes procesos socioeconómicos y vertidas mayoritariamente sin tratamiento previo; además, son los receptores de altos volúmenes de sedimentos originados por procesos de erosión, bien sea de origen natural o por acción del hombre.

Estas acciones se incrementan diariamente, debido al crecimiento de la población y de las actividades económicas, siendo necesario un monitoreo y control constante que permita tomar las acciones necesarias para abordar esta problemática con el fin de disminuir su impacto en los procesos naturales y sociales, especialmente en la salud humana.

El análisis de la calidad del agua, está soportado en las mediciones que se realizan por el IDEAM y en la información de sectores económicos que recolectan datos de calidad del agua de manera sistemática, representados y especializados en indicadores de calidad del agua y de amenaza potencial por contaminación.

La carga orgánica biodegradable (DBO_5) vertida a los sistemas hídricos después de tratamiento en Colombia durante el año 2012 alcanzó 756.945t t/año, que equivalen a 2.102 t/día. De este total, la industria aporta el 28%, el sector doméstico el 69% y el sector cafetero el 3%. El 80% de la carga de DBO_5 fue aportada por 55 municipios principalmente por las áreas metropolitanas y ciudades grandes del país: Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena, Bucaramanga, Cúcuta, Villavicencio y Manizales.

La carga total nacional vertida a los cuerpos de agua de demanda química de oxígeno (DQO), después de tratamiento, es de 1.675.616 t/año, equivalentes a 4.654 t/día de los cuales la industria aporta el 37%, el sector doméstico el 61 % y el cafetero el 2%.

En cuanto a Sólidos Suspendidos Totales se vierten 1.135.726 t/año, equivalente a 3.154 t/día. La industrial aporta el 7%, el sector doméstico el 91% y el subsector cafetero el 1%.

En 179 municipios ubicados en 15 departamentos se estimó una carga vertida en 2012 de 205 toneladas de mercurio al suelo y agua, de las cuales 27.5% corresponden al uso para beneficio de la plata y 72.5% al beneficio de oro.

Las subzonas con mayor afectación por vertimientos de mercurio asociados al beneficio de oro son las correspondientes a: directos al Magdalena (Brazo Morales), Bajo Nechí, Sucio, directos al Bajo Nechí, ríos Taraza, Man, Quito, Cajón, Tamaná y otros directos al San Juan. («Calidad del agua - IDEAM» 2012)

Contaminación por cromo:

El proceso de la industria de la curtiduría involucra sales de cromo (Cr) como componente principal del proceso. La recuperación de Cr es una parte del proceso en el que se usan otras sales para lograr la separación y recuperación para usar Cr nuevamente en el proceso. Los pasos del proceso pueden contener ambas formas de Cr [Cr (VI): hexavalente y Cr (III): trivalente]. La recuperación de Cr del efluente de la industria de la curtiduría a través de sistemas biológicos es muy necesaria. Las diversas características fisicoquímicas de estos efluentes pueden limitar el crecimiento de microorganismos y, por lo tanto, limitar la posible aplicación práctica de microorganismos en condiciones reales de efluentes industriales. (Sharma y Adholeya 2011).

El cromo trivalente Cr^{+3} es utilizado en el proceso de curtido de pieles para evitar que la piel se descomponga por acción de los microorganismos. Las industrias curtidoras del sector de San Benito en Bogotá descargan aproximadamente 200 kg de cromo Cr^{+3} al río Tunjuelito diariamente.

Las aguas del proceso de curtido tienen pH ácido, entre 2 y 4; en este rango de pH el cromo trivalente es muy soluble y los floculantes prácticamente no alcanzan a precipitarlo y la cantidad que puede ser retenida por material adsorbente como carbón activado genera lodos residuales sin reutilización del cromo por quedar contaminado con otras sustancias retenidas por el carbón,

además de la rápida saturación de este último por la elevada concentración del cromo. Otras industrias utilizan como agente precipitante la cal, que, si bien disminuye la concentración de cromo en las aguas residuales, incrementa la producción de lodos. Estos sistemas de tratamiento no producen los resultados ambientales que se requieren, pues el índice de remoción está muy por debajo de lo requerido, y como no ofrecen la posibilidad de recuperar el cromo para su reutilización, se convierten en un sobrecosto para las industrias.(PENAGOS 2013).

Como tratamiento al cromo se tiene de referencia el uso de una bacteria resistente al cromo que se aisló autóctona del efluente de la curtiduría y se identificó como *Staphylococcus sciuri*. Su crecimiento es óptimo y se observó a 37 °C y pH 7. El *S. sciuri* pudo resistir Cr^{+6} y otros metales pesados como As_2^+ , Pb_2^+ , Zn_2^+ , Cu_2^+ , Cd_2^+ y Ni_2^+ . La caracterización bioquímica de la bacteria reveló su que su pH óptimo es 8.0 y la temperatura es 40 °C. la bacteria fue estimulada solo con Mg_2^+ . *S. sciuri* mostró dominio de la biosorción de cromo después de 2, 4, 6 y 8 días.(Elahi y Rehman 2018).

La contaminación debida al uso de cromo y otros productos químicos en la industria del cuero se analiza críticamente para detectar los efectos nocivos. Se han realizado muchos estudios para optimizar la cantidad de productos químicos utilizados en el procesamiento del cuero. La contaminación debida al cromo es una de las principales limitaciones en la operación de procesamiento del cuero. Los métodos de recuperación y reutilización de cromo se han convertido en los métodos de recuperación obligatorios en la industria del cuero para recuperar y reutilizar el cromo presente en el efluente. Están surgiendo varios métodos de precipitación, pero aún no son factibles. Se ha intentado recuperar el cromo presente en el licor de bronceado usado usando extracto de zarzo neutralizado. El extracto de zarzo a diferentes condiciones de pH (pH 7, 8 y 9) se usó para la recuperación de cromo. Se ha hecho reaccionar el extracto de zarzo neutralizado con cromo en el licor usado y se dejó sedimentar durante un período de 6 h. Una gran cantidad de cromo se deposita en el fondo dejando una cantidad mínima en el sobrenadante. El cromo fue recuperado y

reutilizado para curtir la piel. El extracto de zarzo que quedó en el baño de bronceado se reutilizó para el proceso posterior al bronceado como agente de recurtición. Se ha observado que se puede obtener un mayor nivel de agotamiento de cromo del 85% y 87% (precipitado y sobrenadante) en cuero experimental en comparación con el agotamiento del 74% en la muestra de control. (Kanagaraj, Chandra Babu y Mandal 2008).

Adsorción

La adsorción es un fenómeno de transferencia de materia entre fases, el cual se utiliza ampliamente en los tratamientos para eliminar sustancias de las fases fluidas. Este se puede definir como: "el enriquecimiento de especies químicas de una fase fluida en la superficie de un sólido". Este enriquecimiento crea una fase intermedia llamada interface, donde tiene lugar la adsorción entre la fase líquida que tiene el componente que deseamos eliminar y el otro componente que es el adsorbente. En la fase fluida debe estar el componente a adsorber disuelto en el líquido. En resumen, estos procesos de adsorción necesitan 2 fases: la fase sólida o adsorbente y la fase líquida que es donde se encuentra el adsorbato.

La eficacia del proceso de adsorción está influenciada por una gran variedad de parámetros, entre ellos la interacción entre el contaminante y el adsorbente, la superficie específica de éste, el tamaño de la molécula de los actuantes, la temperatura, el pH y el tiempo de contacto. Así pues, es fundamental el tipo de adsorbente elegido. Un adsorbente muy utilizado es el carbón activo, aunque también se emplean otros adsorbentes inorgánicos como las zeolitas, la vermiculita o el vidrio volcánico.

La principal característica de la adsorción es la capacidad que tiene de retener al adsorbato en sus paredes, es decir, en la superficie. Por ello, los adsorbentes deben presentar una alta superficie por unidad de masa. El carbón activo presenta una alta superficie por unidad, es decir, tiene una alta capacidad de adsorción por lo cual cumpliría los requisitos que necesitamos para nuestro trabajo. Además, si seleccionamos el carbón activo como adsorbente, tendremos acceso a una amplia variedad de selección. Esto se

debe al hecho de que el carbón activo puede ser producido a partir de diferentes materiales que contengan mayoritariamente carbono en su estructura molecular. Los materiales más comunes son: la madera, el carbón de leña, el lignito, la turba, el serrín, residuos plásticos, etc. (Castelló Torre y Castelló Torre 2017)

Nanotecnología

La nanotecnología envuelve la manipulación de material en una escala cercana a lo atómico para producir nuevas estructuras, artefactos, y materiales. Las nanopartículas son partículas con una dimensión en el rango de 1-100 nm. Por lo tanto, las nanopartículas pueden ser transportadas efectivamente por el flujo de agua subterránea. («Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas residuales: Avances, Ventajas y Desventajas Nanotechnology an alter» 2018).

El uso de la nanotecnología trae consigo ventajas sobre los tratamientos convencionales, por ejemplo, la reducción de costos; se estima que esta reducción podría ser entre un 20% a 40%, otra de las ventajas sería el ahorro de los tiempos de ejecución se puede alcanzar a creer en un ahorro de tiempo de incluso de un 70% en relación al manejo de métodos tradicionales, otro beneficio innegable es respeto al medio ambiente. («Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas residuales: Avances, Ventajas y Desventajas Nanotechnology an alter» 2018). El proyecto pretende por medio de la utilización de nanotecnología en procesos de descontaminación de aguas residuales, mitigar los índices de contaminación en los afluentes de agua por vertimientos de cromo y metales pesados procedentes de la industria de curtiembres.

La síntesis verde es una metodología ecoamigable, las nanopartículas de plata (PAGNP) es la producción mediante bio-reducción de nitrato de plata usando extracto acuoso de hojas de *Parkiaspeciosa*. La formación de PAGNPs se ha confirmado mediante espectroscopia UV-Vis. Las nanopartículas de plata sintetizadas en solución han mostrado una absorción máxima a 410,5 nm,

espectrofotométricamente. Los diferentes parámetros como temperatura, pH, tiempo, concentración de nitrato de plata y volumen de extracto de hoja se optimizaron espectrofotométricamente. Los análisis SEM, TEM y DLS se usaron para confirmar el tamaño medio de partícula de PAgNP que se encontró que eran 31nm, 35nm y 155.3 d.nm, respectivamente. Los análisis XRD y EDX confirman la naturaleza y la presencia de plata. Los PAgNP sintetizados presentan actividades fotocatalíticas (azul de metileno bajo irradiación solar), antimicrobianas (*Escherichiacoli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonasaeruginosa* y *Bacillus subtilis*) y antioxidantes (método de eliminación de radicales DPPH). El método desarrollado para la síntesis de nanopartículas de plata con extracto de hoja de *Parkiaspeciosa* es un método ecológico y conveniente. (Ravichandran et al. 2019).

MARCO LEGAL

Resolución 0631 de 2015

Por la cual se reglamenta los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. (Ambiente 2015).

Decreto 1207 de 2014

Por el cual se estipulan los parámetros para la reutilización de agua residual tratada y no aplicada para su empleo como fertilizante o acondicionador de suelo y se dictan otras disposiciones.(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2010)

Resolución 0330 de 2017

Por la cual se reglamenta las etapas de planeación, diseño, construcción y puesta en marcha de la infraestructura a disposición del tratamiento de aguas y otras consideraciones. (Ministerio de Vivienda 2017)

Agencia de protección ambiental (EPA)

Por la cual han sido desarrolladas las primeras Guías sobre la reutilización de aguas residuales tratadas en el 1980. Estas guías se han actualizado en el 1992, 2009 y 2012. Estipulando que cada territorio tiene la potestad de desarrollar guías o reglamentos para la reutilización de aguas residuales tratadas. (US Environmental Protection Agency 2012)

Organización mundial de la salud (OMS)

La cual estipula directrices principalmente para la reutilización de agua con el fin de obtener calidad y salubridad de esta siendo apta para el consumo humano. (World Health Organisation 2017)

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

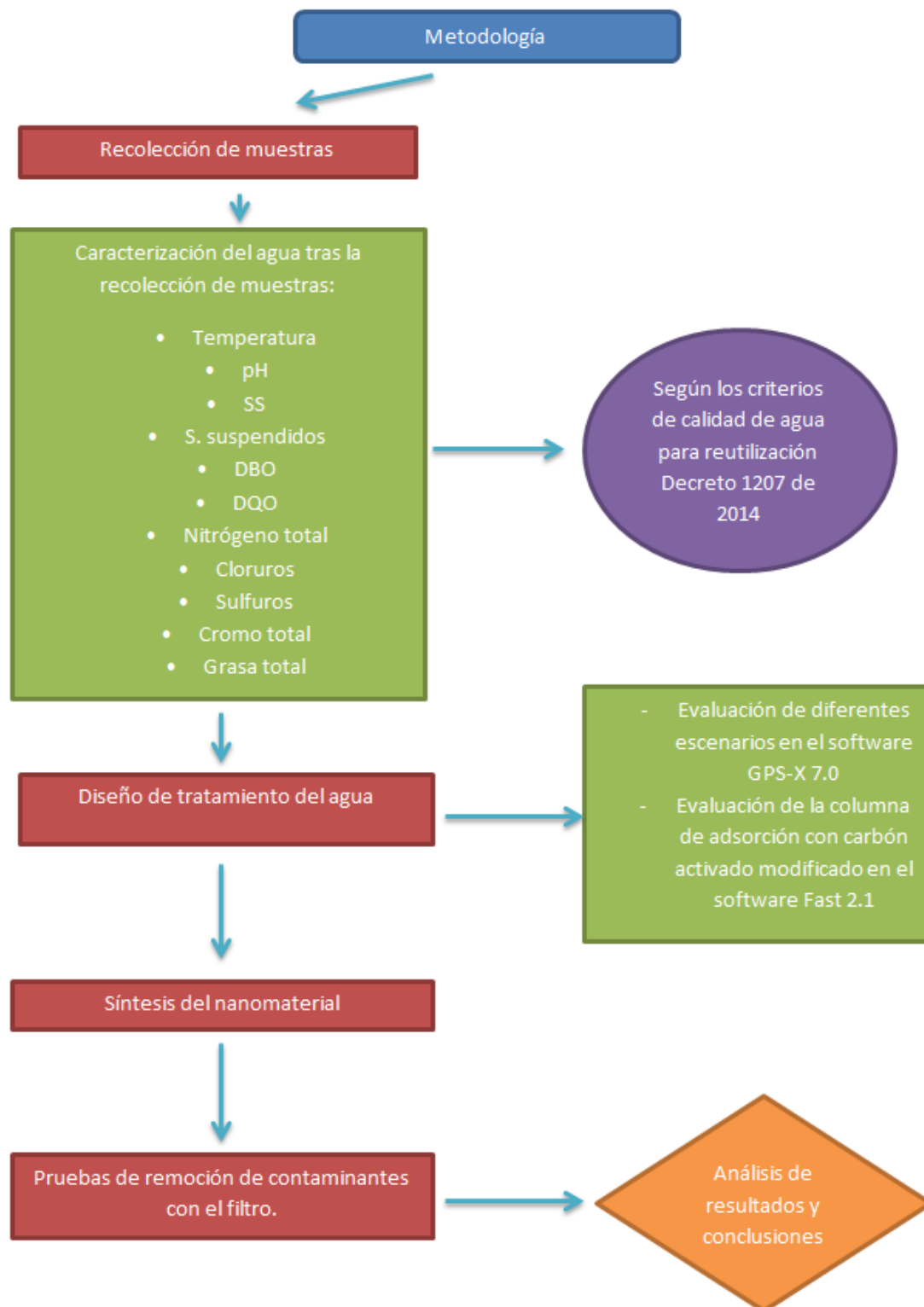
Diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales para el tratamiento de aguas contaminadas procedentes de la industria de las curtiembres para su reutilización.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los parámetros fisicoquímicos y biológicos de las aguas residuales provenientes de la industria de curtiembres.
- Sintetizar el carbón activado magnéticamente modificado.
- Evaluar la efectividad del carbón activado modificado como tratamiento terciario para remover contaminantes del agua residual.
- Diseñar conceptualmente la columna de adsorción para reducir el contaminante objetivo (cromo).

METODOLOGIA

Ilustración 4: Esquema metodológico.



Fuente: Propia

Caracterización del agua residual a tratar.

Previo a la caracterización del agua, se realizó el muestreo; se recolectaron entre 10 y 15 muestras de empresas dedicadas a la curtiduría de cuero, que realizan sus vertimientos al cuerpo de agua de la zona (Río Tunjuelo).

Las aguas residuales recolectadas de las curtiembres, se analizaron con el fin de determinar los parámetros de calidad del agua; estos parámetros fueron medidos siguiendo los métodos estándar. La Tabla 1 presenta los parámetros que fueron analizados con sus respectivas unidades de estudio y los respectivos valores a los que se desean llevar para su reutilización.

Tabla 1: Parámetros de calidad de agua estudiados.

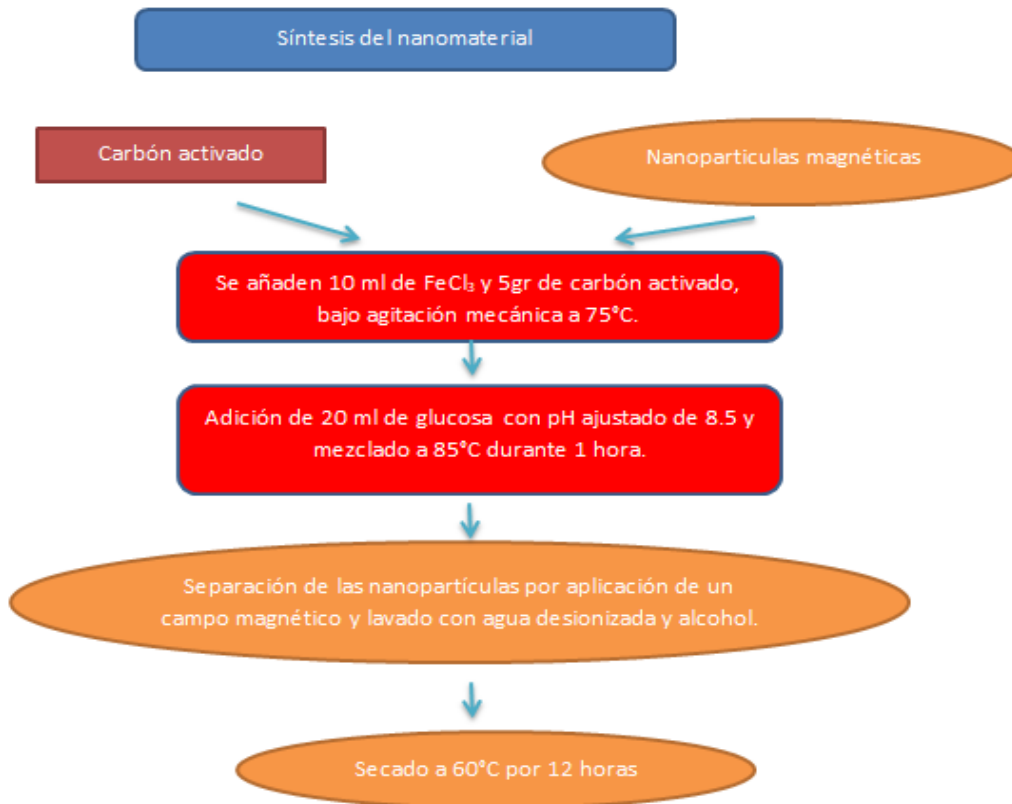
	Unidad	Norma
Temperatura	°C	AyR
pH		7
Conductividad	uS/cm	1500
DBO5	mg/L	10
DQO	mg/L	30
Nitrógeno total	mg/L	5
S.sedimentables	mg/L	5
S.Suspendidos	mg/L	10
Cromo total	mg/L	1
Grasas totales	mg/L	0

AyR: Análisis y reporte. Fuente: Realización propia

Los parámetros críticos más relevantes encontrados son la DBO₅ y DQO, además de la presencia de los sólidos. En el siguiente numeral se realiza el planteamiento del proceso a realizar a esta agua con el fin de obtener parámetros óptimos de reutilización de esta agua, consiguiendo reducirlos a los máximos admisibles, y si son posibles más bajos para generar así una mejor calidad a la hora de reutilizar el agua y aún más en un ámbito de curtidoras.

Síntesis de nanomaterial

Ilustración 5: Síntesis del nanomaterial.



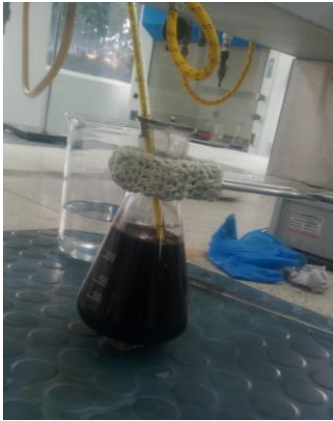
Fuente: Propia

El principal componente utilizado, fue el carbón activado granular y polvo. La impregnación de este carbón activado con nanopartículas magnéticas que se basa en la modificación de una técnica utilizada en investigaciones publicadas previamente por coprecipitación por metodología verde.(Marimón-Bolívar y González 2018).De manera general, se añadieron 10 ml de una solución de FeCl_3 (0,1 mol/L) y 5 gramos de carbón activado a un vaso de precipitados de 100 ml bajo agitación mecánica a 75°C durante media hora. Al alcanzar esta temperatura, se adicionan gota a gota 20 ml de una solución acuosa de glucosa de concentración 0,214 mol/L en el vaso de precipitados con el valor de pH de la solución mezclada ajustado a $\text{pH} > 8.5$. La mezcla se lleva a una temperatura de $85 \pm 5^\circ\text{C}$ y se mantiene la reacción durante una hora. Al final de este período, las nanopartículas se separan por aplicación de campo

magnético y después se lavan varias veces con agua desionizada y alcohol, para posterior secado a 60°C durante 12 horas.(Irawan, Nata y Lee 2019).

- Registro fotográfico de la síntesis:





Tras el secado de las nanopartículas son almacenadas y guardadas herméticamente con el fin de evitar la oxidación de las mismas.

Procesos de pretratamiento y tratamiento del agua residual.

Preliminarmente se planteó el diseño de cada uno de los componentes de la planta con el fin de analizar su rendimiento de manera práctica, pero el alcance del proyecto se ha reducido a la implementación de un Software que facilite el análisis de los datos, con el fin de obtener parámetros de calidad óptimos para posteriormente analizar el filtro modificado con el carbón activado.

El primer parámetro a analizar fue el pH, el cual llega como afluente con un valor de 12.3, y el rango de objetivo es de 6 a 9, un valor óptimo que garantiza el buen funcionamiento de la planta es un pH de 7, por lo cual tras la entrada se instaló un nivelador de pH, el cual proporciona un caudal de HCl que garantiza la disminución del pH a 7 antes de entrar a los aireadores, este proceso de mezclado del ácido con el afluente se realizó en un tanque de nivelación, por medio de un repartidos que divide el caudal al 50% para entrar a cada uno de los aireadores.

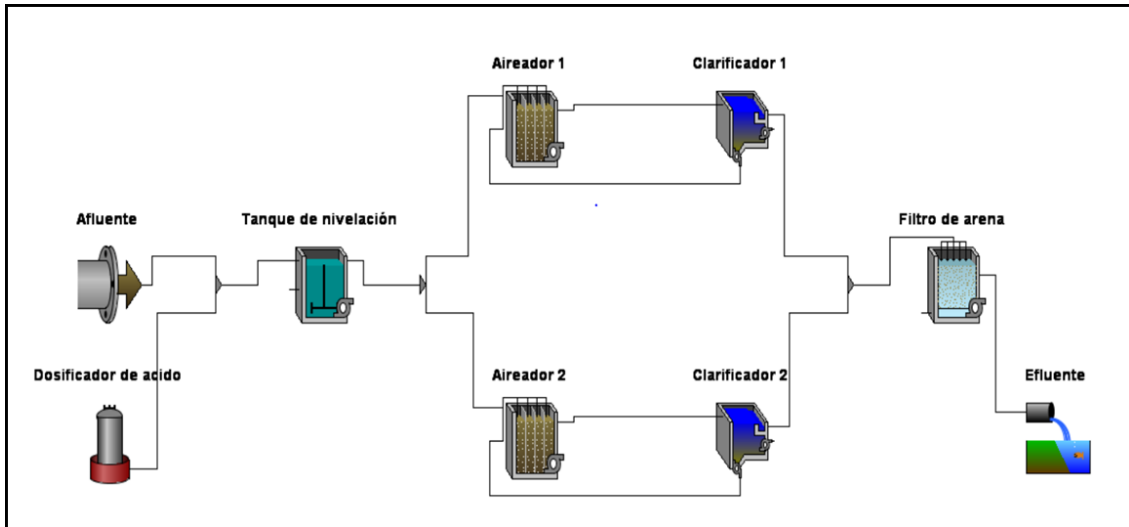
Para garantizar que los valores de salida del agua residual sean los esperados, se empezó a jugar con componentes o variables de diseño de los aireadores y de los clarificadores, ya que son estos los que se encargaran de reducir los valores mayoritariamente de DQO, DBO₅ y solidos presentes respectivamente, para el aireador se manejaron variaciones en los valores de la profundidad, el volumen máximo del tanque, cantidad de reactores y operacionalmente si la inyección de aire se realizara de manera mecánica o por medio de difusión de aire.

En los clarificadores rectangulares, las variables de diseño fueron la profundidad, el punto de alimentación desde el fondo, y la superficie del mismo, para los clarificadores circulares, las variables de diseño, fueron los mismos tres de los clarificadores rectangulares más la adición de la forma del mismo, siendo cónico, fondo plano o inclinado entre otros; y variando estos parámetros, se recolectaron todos los datos en tablas resumen y se eligió el diseño óptimo para el análisis del filtro.

A nivel general se anexan las siguientes ilustraciones.

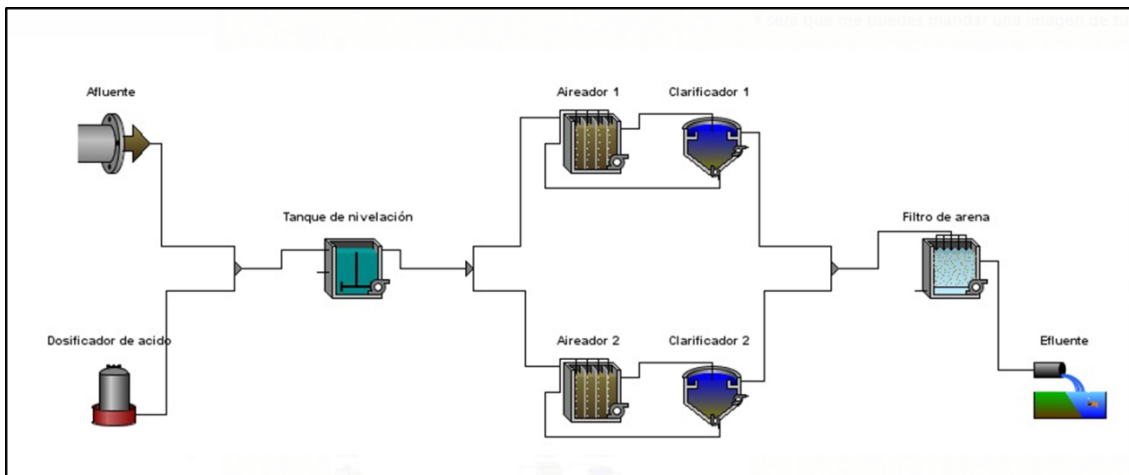
Cada una representa el esquema principal o base que se ha tenido en cuenta para el desarrollo del proyecto, variando principalmente el clarificador utilizado en cada división de las proyecciones (rectangulares y circulares).

Ilustración 6: Esquema con clarificadores rectangulares.



Fuente: Propia.

Ilustración 7: Esquema con clarificadores circulares.



Fuente: Propia

Los esquemas representan de manera gráfica las unificaciones y conexiones desarrolladas en la planta, cabe resaltar que el objetivo de este proyecto es lograr la reutilización del agua residual en la misma industria de la curtiduría de cueros, por lo cual el esquema teóricamente muestra una salida o vertimiento a

un río o cauce, pero el fin de este es obtener los parámetros finales tras el tratamiento.

Finalmente, los resultados obtenidos por la mejor proyección evaluada, son introducidos en el software Fast 2.1, este programa permite determinar la remoción y parámetros de calidad del agua, en un filtro diseñado bajo parámetros específicos para diferentes presentaciones del carbón activado.

En este sistema, se introducen los parámetros para cuatro tipos de carbón activado, siendo estos: Carbón activado granular (CAG), carbón activado en polvo (CAP), Carbón activado granular modificado con nanopartículas (CAGM) y carbón activado en polvo modificado con nanopartículas (CAPM); este programa exige unos parámetros de estabilidad y cinética, los cuales fueron consultados en investigaciones alusivas al uso de carbón activado en columnas de absorción. Además de estos datos fueron consultados densidad para cada tipo de material y diámetros comerciales para la aplicación de este software, resumidos en la Tabla 2:

Tabla 2: Parámetros de entrada Fast 2.1

	CAG	CAP	CAGM	CAPM	Unidad
rho_b	0,48	0,39	0,55	0,44	g/cm ³
rho_p	0,55	0,44	0,6	0,5	g/cm ³
dp	2,1	0,25	2,3	0,3	mm
C0	1374	1374	1374	1374	mg/L
Q	411,8	411,8	411,8	411,8	m ³ /d
n	0,7	0,5	1,38	0,7	
KF	1,88	0,99	1,78	1,78	
kL	0,0033	0,0039	0,00046	0,0032	m/s
Ds	1,282E-14	1,282E-14	1,282E-14	1,282E-14	m ² /s

Dónde:

rho_b = Densidad de la cama de material.

rho_p= Densidad de la partícula.

d_p = Diámetro de la partícula.(Karelys Sánchez, Gilberto Colina, María Pire, Altamira Díaz 2013)

C_0 = Concentración inicial me cromo.

Q = Caudal a tratar.

n = Exponente de Freundlinch.(Carriazo, Saavedra y Molina 2010)

K_F = Constante de Freundlinch.(Passé-Coutrin, Altenor y Gaspard 2009)

k_L = Coeficiente de difusión de la película.(Carvajal-Bernal et al. 2020)

D_s = Coeficiente de difusión superficial.(Kathuria 2006)

Con la determinación de estos parámetros, se ingresaran en el programa diferentes cantidades de material (Carbón activado sin modificar y modificado), con el fin de determinar la curva evolutiva de la concentración en el filtro o curvas de ruptura, comparando los carbones granulares y los carbones en polvo por separado para evidenciar la efectividad de cada uno en un tiempo no mayor a 2 segundos.

Tras la determinación de eficiencia de los carbones activados, se procederá a realizar el modelo de la columna de adsorción, que garantice un año de funcionamiento constante, basada en modelos matemáticos.

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del agua residual:

Con la recolección de las muestras, se procedió a realizar su caracterización según la Tabla 1. Los valores obtenidos son presentados en la Tabla 3, comparándolos a los valores que se desean obtener al finalizar el proyecto con el fin de verificar si el proceso de tratamiento empleado es óptimo o deficiente para garantizar la reutilización del agua.

Tabla 3: Caracterización del agua residual de curtiembre.

	Unidad	A. Residual	Norma
Temperatura	°C	16	AyR
pH		12,3	7
Conductividad	uS/cm	1152	1500
DBO5	mg/L	4024	10
DQO	mg/L	6700	30
Nitrógeno total	mg/L	350	5
S. sedimentables	mg/L	3555	5
S.Suspendidos	mg/L	4740	10
Cromo total	mg/L	1354	1
Grasas totales	mg/L	502	0

AyR: Análisis y reporte.

Evaluación de pretratamiento y tratamiento en el software GPS-X 7.0

En la implementación de este software, se plantearon diferentes proyecciones divididas en 2 grades grupos de acuerdo a la forma del clarificador usado en el análisis de calidad del agua; siendo estos clarificadores rectangulares y clarificadores circulares. A continuación se presentan los análisis de cada proyección y los parámetros de entrada al software.

Análisis del diseño con clarificadores rectangulares.

Para este escenario, los análisis se realizaron con respecto a un día de prueba, definiendo parámetros de entrada importantes con respecto a la calidad del agua, y que son los valores que se desean reducir. Estos valores se encuentran en la tabla 4:

Tabla 4: Parámetros de entrada.

Afluente	
Entrada	
Q (m³/d)	500
pH	12,3
SST (mg/L)	4740
VSS (mg/L)	3555
BOD5 (mg/L)	4024
DQO (mg/L)	6700
NT (mg/L)	350
Fosfatos (mg/L)	8

Para este flujo, se adiciono un caudal del 10% de HCl, con el fin de que en el tanque de nivelación se diera un ajuste de pH de 12.3 a 7.0; con respecto al tanque de nivelación, se ajustó un volumen máximo de 200 m³ y una profundidad de 5 m, además de que la agitación se realiza de forma mecánica con el fin de reducir tiempos y que el caudal pase directamente a los aireadores, es en estos donde se empezaran a realizar las variaciones del diseño.

Al salir finalmente del proceso de tratamiento se midieron los parámetros relevantes de calidad del agua, se unificaron con el fin de evaluar el diseño más óptimo para el desarrollo del proyecto.

El caudal tras salir del tanque de nivelación pasa por un repartidos que lo distribuye en razón del 50% a 2 aireadores, los cuales fueron analizador variando sus parámetros, pero manteniéndolos iguales en cada sistema evaluado, y se asumieron unas condiciones iniciales del clarificador rectangular constante, estas condiciones constantes fueron punto de alimentación desde el fondo de 1 m, una superficie de 100 m² y una profundidad de 3m, los datos obtenidos para esta primera proyección se presentan a continuación.

Proyección 1:

Aireacion				Salida	
V.max(m3)	Prof(m)	N°reactores	Tipo	Flujo (m ³ /día)	
200	4	3	Difusion	411,8	
				pH	7
				SST (mg/L)	2,588
				VSS (mg/L)	1,971
				BOD ₅ (mg/L)	2,611
				DQO (mg/L)	4,622
				NT (mg/L)	1,482
				Fosfatos (mg/L)	289

Para esta proyección los valores se han reducido más que los mínimos recomendables para reutilización, esta primera proyección será modificada en el segundo análisis a nivel del tipo de aireación realizada, el cual cambia de difusión de aire a aireación mecánica; los resultados de esta segunda proyección son los siguientes.

Proyección 2:

Aireacion				Salida:	
V.max(m3)	Prof(m)	N°reactores	Tipo	Flujo (m ³ /día)	
200	4	3	Mecanica	411,8	
				pH	7
				SST (mg/L)	2,588
				VSS (mg/L)	1,971
				BOD ₅ (mg/L)	2,61
				DQO (mg/L)	4,62
				NT (mg/L)	1,481
				Fosfatos (mg/L)	289

Tras tener estas 2 proyecciones, se puede observar que las variaciones con respecto al tipo de aireación son muy bajas, y en este punto lo más preciso es hacer un análisis de costos, para determinar cuál de los 2 métodos es más rentable; para las siguientes proyecciones se mantendrá la difusión de aire para el análisis ya que es más económica que la mecánica dato que se analizara más adelante. Para la tercera proyección se variara la profundidad.

Proyección 3:

Aireacion				Salida	
V.max(m3)	Prof(m)	Nºreactores	Tipo	Flujo (m ³ /día)	
200	5	3	Difusión	411,8	pH 7
					SST (mg/L) 2,588
					VSS (mg/L) 1,971
					BOD ₅ (mg/L) 2,611
					DQO (mg/L) 4,621
					NT (mg/L) 1,482
					Fosfatos (mg/L) 289

Para este caso, el aumento en la profundidad, no influye relativamente nada, y contemplando un lugar de diseño lo suficientemente amplio, el más viable es la proyección 1.

A continuación en la proyección 4, se mantuvo la profundidad de 4 m, el volumen de 200 m³, pero se adicionaron 3 reactores más; los datos obtenidos fueron:

Proyección 4:

Aireacion				Salida	
V.max(m3)	Prof(m)	Nºreactores	Tipo	Flujo (m ³ /día)	
200	4	6	Difusion	411,8	pH 7
					SST (mg/L) 2,588
					VSS (mg/L) 196,8
					BOD ₅ (mg/L) 2,503
					DQO (mg/L) 4,471
					NT (mg/L) 1,412
					Fosfatos (mg/L) 289,3

En este caso, se observa que los valores se reducen un poco con respecto a la proyección 1, pero a nivel de costos, la adición de 3 reactores más elevaría el precio de la obra, y no se justificaría por la poca disminución que representan. En base a este resultado, se mantiene la proyección 1, con tres reactores y se procede a variar el volumen máximo de los aireadores, como es el caso de la proyección 5 presentada a continuación:

Proyección 5:

Aireacion				Salida	
V.max(m3)	Prof(m)	Nºreactores	Tipo	Flujo (m ³ /día)	
160	4	3	Difusion	411,8	
				pH	7
				SST (mg/L)	27,49
				VSS (mg/L)	21,38
				BOD ₅ (mg/L)	17,32
				DQO (mg/L)	34,02
				NT (mg/L)	3,643
				Fosfatos (mg/L)	287,3

Al reducir el volumen de los aireadores a 160m³, se evidencia que los parámetros finales de calidad del agua no son óptimos la presencia de la DQO mayor a 30, sobrepasa la prevista por norma, por lo cual en la sexta proyección se aumenta el volumen máximo a 180 m³, obteniendo los siguientes resultados.

Proyección 6:

Aireacion				Salida	
V.max(m3)	Prof(m)	Nºreactores	Tipo	Flujo (m ³ /día)	
180	4	3	Difusion	411,8	
				pH	7
				SST (mg/L)	2,673
				VSS (mg/L)	2,055
				BOD ₅ (mg/L)	2,791
				DQO (mg/L)	4,884
				NT (mg/L)	1,58
				Fosfatos (mg/L)	288,6

Con este aumento del volumen de los aireadores, se vuelve a recuperar los parámetros de calidad de proyecciones anteriores, desde luego con el aumento de algunos valores como la DQO y la BOD₅, pero aun estos se mantienen dentro del rango de operatividad de la planta, y la reducción de 20 m³, en un análisis detallado de costos va a ser significativa.

Ahora evaluando un caso contrario a disminuir el volumen, este se aumenta a 220m³ obteniendo la proyección 7 mostrada a continuación.

Proyección 7:

Aireacion				Salida	
V.max(m3)	Prof(m)	N°reactores	Tipo	Flujo (m ³ /día)	
220	4	3	Difusion	411,8	
				pH	7
				SST (mg/L)	2,512
				VSS (mg/L)	1,895
				BOD ₅ (mg/L)	2,463
				DQO (mg/L)	4,405
				NT (mg/L)	1,404
				Fosfatos (mg/L)	289,3

Como se evidencio al aumentar el volumen de 160m³ a 180m³, los valores se ven reducidos, solo que, en este caso, el aumento de 20m³ no representa una disminucion de los parámetros significativa, por lo cual aún, la proyección más viable es la número 6.

Finalmente para terminar de analizar la influencia de los aireadores, se evalúa la eficiencia de acuerdo al tipo de aireación, variándola en la proyección 8 a mecánica obteniendo los siguientes resultados.

Proyección 8:

Aireacion				Salida	
V.max(m3)	Prof(m)	N°reactores	Tipo	Flujo (m ³ /día)	
180	4	3	Mecanica	411,8	
				pH	7
				SST (mg/L)	2,673
				VSS (mg/L)	2,055
				BOD ₅ (mg/L)	2,79
				DQO (mg/L)	4,883
				NT (mg/L)	1,58
				Fosfatos (mg/L)	288,6

Como se mencionó en proyecciones anteriores, la influencia del tipo de inyección de aire es poco relevante en estos análisis, y por temas de costos, el más viable es el de difusión de aire, determinando así la utilización de la proyección 6, y es con esta con la cual se procede a realizar el análisis de los clarificadores rectangulares.

Se recuerda que para la proyección elegida (6), los datos del clarificador son punto de alimentación desde el fondo 1m, superficie de 100 m² y profundidad

de 3m, y se mantiene la división del caudal en un 50% al pasar por los clarificadores, pero para la proyección 9, se cambió la profundidad de alimentación desde el fondo a 1.5m, con el fin de evidenciar su influencia, obteniendo los siguientes datos.

Proyección 9:

Clarificador rectangular secundario			Salida:	
P.A.F (m)	Superficie (m2)	Profundidad (m)	Flujo (m ³ /día)	
1,5	100	3	411,8	
			pH	7
			SST (mg/L)	2,685
			VSS (mg/L)	2,064
			BOD ₅ (mg/L)	2,798
			DQO (mg/L)	4,897
			NT (mg/L)	1,581
			Fosfatos (mg/L)	288,6

Para este caso, en comparación a la proyección 6, se evidencia una leve disminución en la mayoría de los parámetros siendo la principal excepción la cantidad de fosfatos, aumentando el tiempo de retención del clarificador, por lo cual tal aumento no es significativo y se mantiene el diseño de la proyección 6. Para la proyección 10, el parámetro a varias es la profundidad del clarificador llevándola a un valor de 5m obteniendo los siguientes resultados.

Proyección 10:

Clarificador rectangular secundario			Salida	
P.A.F (m)	Superficie (m2)	Profundidad (m)	Flujo (m ³ /día)	
1	100	5	411,8	
			pH	7
			SST (mg/L)	16,37
			VSS (mg/L)	12,6
			BOD ₅ (mg/L)	10,49
			DQO (mg/L)	20,66
			NT (mg/L)	2,637
			Fosfatos (mg/L)	288,2

El aumento en la profundidad del clarificador, genera una sedimentación más lenta lo que conlleva a que en la salida de este aumenten la cantidad de solidos presentes, y con esto aumenta también la cantidad de DBO y BOD₅, este

diseño en conclusión no es óptimo. A continuación en la proyección 11, se redujo la superficie de 100m² a 80m² obteniendo los siguientes resultados.

Proyección 11:

Clarificador rectangular secundario			Salida	
P.A.F (m)	Superficie (m2)	Profundidad (m)	Flujo (m ³ /dia)	
1	80	3	411,8	
			pH	7
			SST (mg/L)	32,75
			VSS (mg/L)	25,25
			BOD ₅ (mg/L)	19,79
			DQO (mg/L)	39,6
			NT (mg/L)	3,906
			Fosfatos (mg/L)	287,7

Con la disminución de la superficie, se produjo un aumento significativo de los parámetros de calidad, incumpliendo los parámetros máximos establecidos por norma, descartando así esta proyección, y finalmente se evaluó el caso contrario, aumentando la superficie de 100m² a 120m², obteniendo la proyección 12 mostrada a continuación.

Proyección 12:

Clarificador rectangular secundario			Salida	
P.A.F (m)	Superficie (m2)	Profundidad (m)	Flujo (m ³ /dia)	
1	120	3	411,8	
			pH	7
			SST (mg/L)	2,672
			VSS (mg/L)	2,054
			BOD ₅ (mg/L)	2,788
			DQO (mg/L)	4,879
			NT (mg/L)	1,579
			Fosfatos (mg/L)	286,6

Al evaluar esta condición con la proyección 6, se observa una mínima disminución, y aumentar 20m² la superficie del clarificador por tan pequeño mejoramiento resultaría muy costoso y poco viable para la aplicación en el proyecto.

En base a estas proyecciones, se determina que la óptima es la proyección 6 y se procede a realizar los análisis de clarificadores circulares con el fin de determinar una proyección en este ámbito, y serán estas 2 las que se evalúen

gráficamente para finalmente fijar los parámetros de ingreso al filtro modificado con carbón activado y nanopartículas.

Análisis del diseño con clarificadores circulares.

Para estos análisis se realizaron respecto a un día de prueba teniendo en cuenta 4 escenarios donde en el escenario 1 se tenía constante el volumen máximo del aireador de 160 (m³), escenario 2 se tenía constante el volumen máximo del aireador de 180 (m³), escenario 3 se tenía constante el volumen máximo del aireador de 200 (m³), escenario 4 se tenía constante el volumen máximo del aireador de 220 (m³) y cada uno se evaluó 2 veces por el mismo clarificador cambiando las dimensiones tanto del aireador como del clarificador los 4 tipos de clarificador que fueron evaluados son el de fondo plano, fondo inclinado, cónico y circular concéntrico que se evaluaron y de todos los casos que se hicieron se tomaron los mejores para así mismo analizar y para evaluar, teniendo en cuenta que los clarificadores cónicos y circular concéntrico arrojaban valores muy altos de BOD₅ y DQO no se tuvieron en cuenta, definiendo los mismos parámetros de la tabla 4.

Al igual que en el clarificador rectangular para este flujo, se adiciono un caudal del 10% de HCl, con el fin de que en el tanque de nivelación se diera un ajuste de pH de 12.3 a 7.0; con respecto al tanque de nivelación, se ajustó un volumen máximo de 200 m³ y una profundidad de 5 m, además de que la agitación se realiza de forma mecánica con el fin de reducir tiempos y que el caudal pase directamente a los aireadores tras reducir su pH a 7.

El caudal tras salir del tanque de nivelación pasa por un repartidor que lo distribuye en razón del 50% a 2 aireadores, los cuales fueron analizados variando sus parámetros al igual los clarificador inicialmente las condiciones de aireador fueron volumen de 160 (m³), profundidad 6 (m), N° de reactores 5 realizado por medio de difusión de aire y del clarificador para este caso de fondo inclinado se tenía punto de alimentación desde el fondo de 1.5 (m), superficie de 120 (m²), profundidad del agua al costado de la pared 4 (m),

profundidad del agua al centro 4.5 (m), los valores obtenidos para esta proyección siguiendo la línea respectiva fueron los siguientes.

Proyección 13:

Aireacion				Clarificador circular secundario				Salida		
V.max(m3)	Prof(m)	N°reactores	Tipo	P.A.F (m)	Superficie (m2)	Profundidad Cos.P (m)	Profundidad Cen. (m)	Tipo	Q (m3/d)	411,8
160	6	5	Difusion	1,5	120	4	4,5	Fondo inclinado	pH	7
									SST	3,002
									VSS	2,314
									BOD ₅	3,015
									DQO	5,31
									NKT	1,667
									Fosfatos	288,3

Para esta proyección los valores se han reducido lo suficiente para la reutilización, se realizó una segunda proyección con las siguientes condiciones de aireador fueron volumen de 180 (m3), profundidad 5 (m), N° de reactores 4 realizado por medio de aireación mecánica y del clarificador para este caso de fondo plano se tenía punto de alimentación desde el fondo de 1.5 (m), Superficie 100 (m2), profundidad de 4 (m), los datos obtenidos en esta proyección fueron:

Proyección 14:

Aireacion				Clarificador circular secundario				Salida	
V.max(m3)	Prof(m)	N°reactores	Tipo	P.A.F (m)	Superficie (m2)	Profundidad (m)	Tipo	Q (m3/d)	411,8
180	5	4	Mecanico	1,5	100	4	Fondo plano	pH	7
								SST	2,672
								VSS	2,054
								BOD ₅	2,724
								DQO	4,791
								NKT	1,546
								Fosfatos	288,8

Al observar los datos de esta proyección se visualiza que los valores disminuyeron un poco con respecto a la proyección anterior, además de que el proceso constructivo para este clarificador es un poco más sencillo por su forma plana de fondo; siendo este el modelo a evaluar de momento. Se realizara una siguiente proyección con las siguientes condiciones del aireador las cuales fueron volumen de 180 (m3), profundidad 6 (m), N° de reactores 5 realizado por medio de difusión de aire y del clarificador para este caso de fondo inclinado se tenía punto de alimentación desde el fondo de 1.5 (m), superficie de 100 (m2), profundidad del agua al costado de la pared 3 (m),

profundidad del agua al centro 3.5 (m), los datos obtenidos para esta proyección son los siguientes:

Proyección 15:

Aireacion				Clarificador circular secundario				Salida		
V.max(m3)	Prof(m)	N°reactores	Tipo	P.A.F (m)	Superficie (m2)	Profundidad Cos.P (m)	Profundidad Cen. (m)	Tipo	Q (m3/d)	
180	6	5	Difusion	1,5	100	3	3,5	Fondo inclinado	411,8	
									pH	7
									SST	2,682
									VSS	2,061
									BOD ₅	2,702
									DQO	4,764
									NKT	1,525
									Fosfatos	288,9

Los valores obtenidos en este clarificador son idóneos para el diseño, pero por la complejidad del diseño con respecto a un diseño de clarificador de fondo plano, y ese aumento en la profundidad en el aireador manteniendo el volumen del tanque del aireador, no es relevante su aporte por lo cual se mantiene la proyección 14; a continuación en la siguiente proyección, las condiciones de aireador fueron volumen de 200 (m3), profundidad 5 (m), N° de reactores 4 realizado por medio de aireación mecánica y del clarificador para este caso de fondo plano se tenía punto de alimentación desde el fondo de 1.5 (m), superficie 100 (m2), profundidad de 4 (m), los datos obtenidos en proyección fueron:

Proyección 16:

Aireacion				Clarificador circular secundario				Salida	
V.max(m3)	Prof(m)	N°reactores	Tipo	P.A.F (m)	Superficie (m2)	Profundidad (m)	Tipo	Q (m3/d)	
200	5	4	Mecanico	1,5	100	4	Fondo plano	411,8	
								pH	7
								SST	2,587
								VSS	1,969
								BOD ₅	2,548
								DQO	4,534
								TN	1,447
								Fosfatos	289,2

Esta proyección, tiene valores ideales para el diseño, pero al comparar con la proyección 14, la reducción de los valores es baja considerando un aumento de 20m³ en el volumen por lo cual los costos se incrementarían considerablemente. La siguiente proyección evaluada cuenta con las siguientes condiciones para el aireador el volumen fue de 200 (m3), profundidad 6 (m), N° de reactores 5 realizado por medio de difusión de aire y del clarificador para este caso de fondo inclinado se tenía punto de alimentación desde el fondo de

1.5 (m), superficie de 100 (m²), profundidad del agua al costado de la pared 3 (m), profundidad del agua al centro 3.5 (m), los datos obtenidos fueron:

Proyección 17:

Aireacion				Clarificador circular secundario				Salida		
V.max(m3)	Prof(m)	N°reactores	Tipo	P.A.F (m)	Superficie (m2)	Profundidad Cos.P (m)	Profundidad Cen. (m)	Tipo	Q (m3/d)	
200	6	5	Difusion	1,5	100	3	3,5	Fondo inclinado	411,8	
									pH	7
									SST	2,598
									VSS	1,978
									BOD ₅	2,527
									DQO	4,509
									TN	1,427
									Fosfatos	289,3

En este aireador lo relevante es el aumento de profundidad y de reactores en el aireador, estos aumentos elevan los costos para la realización del proyecto, y la reducción que representan no es significativa, por lo cual se mantiene la proyección 14. Se realizará una dieciochoava proyección con las siguientes condiciones de aireador: volumen de 220 (m³), profundidad 4 (m), N° de reactores 3 realizado por medio de difusión de aire y del clarificador para este caso de fondo plano se tenía punto de alimentación desde el fondo de 0.5 (m), Superficie 80 (m²), profundidad de 3 (m), los datos obtenidos son:

Proyección 18:

Aireacion				Clarificador circular secundario				Salida	
V.max(m3)	Prof(m)	N°reactores	Tipo	P.A.F (m)	Superficie (m2)	Profundidad (m)	Tipo	Q (m3/d)	
220	4	3	Difusion	0,5	80	3	Fondo plano	411,8	
								pH	7
								SST	2,509
								VSS	1,893
								BOD ₅	2,462
								DQO	4,401
								TN	1,404
								Fosfatos	289,3

Esta proyección, aumenta en 40m³ el volumen máximo del aireador, pero disminuye en 20m² la superficie del clarificador, esta es la razón principal por la cual los costos con respecto a la proyección 14 serían un problema aunque las reducciones de los parámetros de calidad son razonablemente buenos. De igual forma se mantiene la proyección 14. Las siguientes condiciones para la siguiente proyección son del aireador un volumen de 220 (m³), profundidad 5 (m), N° de reactores 4 realizado por medio de aireación mecánica y del clarificador para este caso de fondo plano se tenía punto de alimentación

desde el fondo de 1.5 (m), superficie 100 (m²), profundidad de 4 (m), los datos obtenidos en esta proyección fueron:

Proyección 19:

Aireacion				Clarificador circular secundario				Salida	
V.max(m3)	Prof(m)	N°reactores	Tipo	P.A.F (m)	Superficie (m2)	Profundidad (m)	Tipo	Q (m3/d)	
220	5	4	Mecanico	1,5	100	4	Fondo plano	411,8	
								pH	7
								SST	2,511
								VSS	1,894
								BOD ₅	2,401
								DQO	4,319
								TN	1,37
								Fosfatos	289,4

Al igual que la proyección anterior, no se justifica el aumento en el volumen de 40m³ del aireador, y el aumento de 20m² en el clarificador. Para la proyección numero 20 las condiciones de aireador fueron volumen de 200 (m³), profundidad 6 (m), N° de reactores 5 realizado por medio de difusión de aire y del clarificador para este caso de fondo inclinado se tenía punto de alimentación desde el fondo de 1.5 (m), superficie de 100 (m²), profundidad del agua al costado de la pared 3 (m), profundidad del agua al centro 3.5 (m), los datos obtenidos son:

Proyección 20:

Aireacion				Clarificador circular secundario				Salida		
V.max(m3)	Prof(m)	N°reactores	Tipo	P.A.F (m)	Superficie (m2)	Profundidad Cos.P (m)	Profundidad Cen. (m)	Tipo	Q (m3/d)	
220	6	5	Difusion	1,5	100	3	3,5	Fondo inclinado	411,8	
									pH	7
									SST	2,523
									VSS	1,902
									BOD ₅	2,382
									DQO	4,296
									TN	1,35
									Fosfatos	289,5

Esta proyección, mantiene un alto volumen por lo cual no es válida para el diseño, y las disminuciones de los parámetros son bajos y de igual forma esta proyección al ser de fondo inclinado, posee una complejidad un tanto mayor a un diseño efectuado para un clarificador de fondo plano, por esta razón también es descartado para el diseño. Se realiza el planteamiento de otra proyección con las siguientes condiciones de aireador fueron volumen de 200 (m³), profundidad 4 (m), N° de reactores 3 realizado por medio de aireación mecánica y del clarificador para este caso de fondo inclinado se tenía punto de alimentación desde el fondo de 0.5 (m), superficie de 100 (m²), profundidad del

agua al costado de la pared 4 (m), profundidad del agua al centro 4.5 (m), los datos se presenta a continuación.

Proyección 21:

Aireacion				Clarificador circular secundario				Salida		
V.max(m3)	Prof(m)	N°reactores	Tipo	P.A.F (m)	Superficie (m2)	Profundidad Cos.P (m)	Profundidad Cen. (m)	Tipo	Q (m3/d)	
220	4	3	Mecánico	1,5	100	4	4,5	Fondo inclinado	411,8	
									pH	7
									SST	6,485
									VSS	4,893
									BOD ₅	4,581
									DQO	8,887
									TN	1,705
									Fosfatos	286,2

Al igual que la proyección 20, posee su misma complejidad, pero ya teniendo la variación e información de todas estas proyecciones se evalúan las siguientes condiciones; volumen de aireador 180 m³, profundidad de 4m, N° de reactores de 3 por difusión de aire complementada con un clarificador de fondo plano con un punto de alimentación desde el fondo de 1 m con una superficie de 80m y profundidad de 4m obteniendo los siguientes resultados.

Proyección 22:

Aireacion				Clarificador circular secundario				Salida	
V.max(m3)	Prof(m)	N°reactores	Tipo	P.A.F (m)	Superficie (m2)	Profundidad (m)	Tipo	Q (m3/d)	
180	4	3	Difusion	1	80	4	Fondo plano	411,8	
								pH	7
								SST	36,76
								VSS	28,34
								BOD ₅	22,08
								DQO	44,23
								NKT	4,216
								Fosfatos	287,5

Esta última alternativa planteada buscaba reunir datos de cada uno de los puntos anteriores con el fin de formar un nuevo diseño, pero tras los resultados obtenidos, se evidencia que no es óptimo como diseño y finalmente se procede a analizar la proyección 14 con difusión de aire, obteniendo los siguientes datos.

Proyección 23:

Aireacion				Clarificador circular secundario				Salida	
V.max(m3)	Prof(m)	N°reactores	Tipo	P.A.F (m)	Superficie (m2)	Profundidad (m)	Tipo	Q (m3/d)	
180	5	4	Difusión	1,5	100	4	Fondo plano	411,8	
								pH	7
								SST	2,671
								VSS	2,053
								BOD ₅	2,724
								DQO	4,79
								NKT	1,545
								Fosfatos	288,8

Se observa que no existe variación alguna entre los datos al cambiar el tipo de aireación y se procede a analizar gráficamente los comportamientos de todas las proyecciones realizadas con el fin de confirmar las elecciones estimadas de la proyección 6 para los clarificadores rectangulares y la proyección 23 para los clarificadores circulares.

Como base final del análisis del diseño de tratamiento se recopilaron los datos y se resumieron todos los valores encontrados en 5 graficas, cada una representando los parámetros más relevantes (SST, VSS, BOD₅, DQO y NT).

Tabla 5: Resumen de clarificadores rectangulares.

	Clarificador rectangular											
Proyección	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SST	2,588	2,588	2,588	2,588	27,49	2,673	2,512	2,673	2,685	16,37	32,75	2,672
VSS	1,971	1,971	1,971	1,971	21,38	2,055	1,895	2,055	2,064	12,6	25,25	2,054
BOD ₅	2,611	2,61	2,611	2,611	17,32	2,791	2,463	2,79	2,798	10,49	19,79	2,788
DQO	4,622	4,62	4,621	4,621	34,02	4,884	4,405	4,883	4,897	20,66	39,6	4,879
NT	1,482	1,481	1,482	1,482	3,643	1,58	1,404	1,58	1,581	2,637	3,906	1,579

Tabla 6: Resumen de clarificadores circulares.

	Clarificadores circulares										
Proyección	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
SST	3,002	2,671	2,682	2,587	2,598	2,509	2,511	2,523	6,485	36,76	2,671
VSS	2,314	2,053	2,061	1,969	1,978	1,893	1,894	1,902	4,893	28,34	2,053
BOD ₅	3,015	2,724	2,702	2,548	2,527	2,462	2,401	2,382	4,581	22,08	2,724
DQO	5,31	4,79	4,764	4,534	4,509	4,401	4,319	4,296	8,887	44,23	4,79
NT	1,667	1,545	1,525	1,447	1,427	1,404	1,37	1,35	1,705	4,216	1,545

Tras los datos obtenidos y los comentarios anexados durante el análisis, se observa que el clarificador 6 y 23 aunque no son los clarificadores con mejores parámetros de calidad, son lo suficientemente bajos como para poder permitir que el agua sea reutilizada, además de que por los parámetros de los mismos, pueden garantizar economía en el proyecto comparado con proyecciones de parámetros más bajos, y gráficamente se observarían las variaciones de cada uno de las proyecciones como se presenta a continuación.

Gráfico 1: Variación de SST

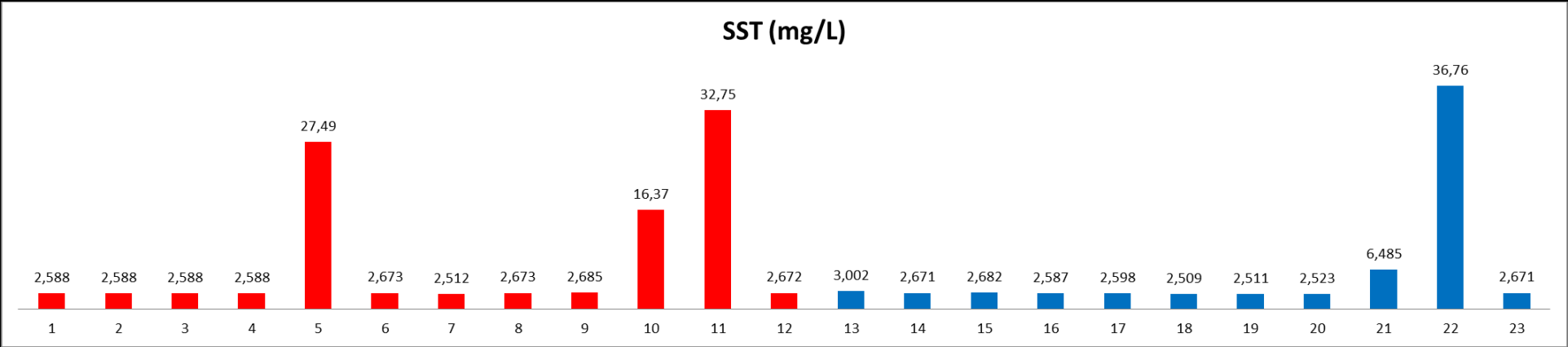


Gráfico 2: Variación de VSS

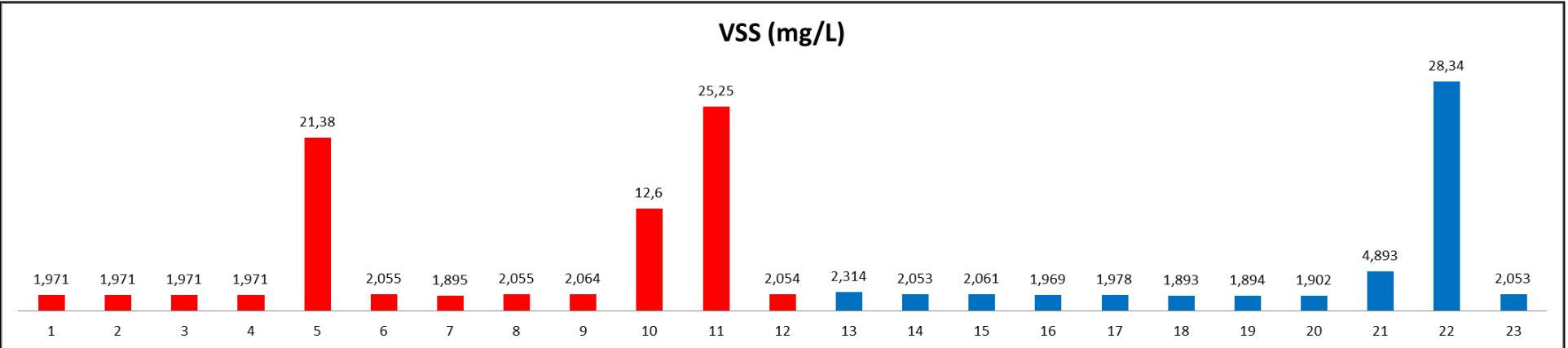


Gráfico 3: Variación de BOD₅

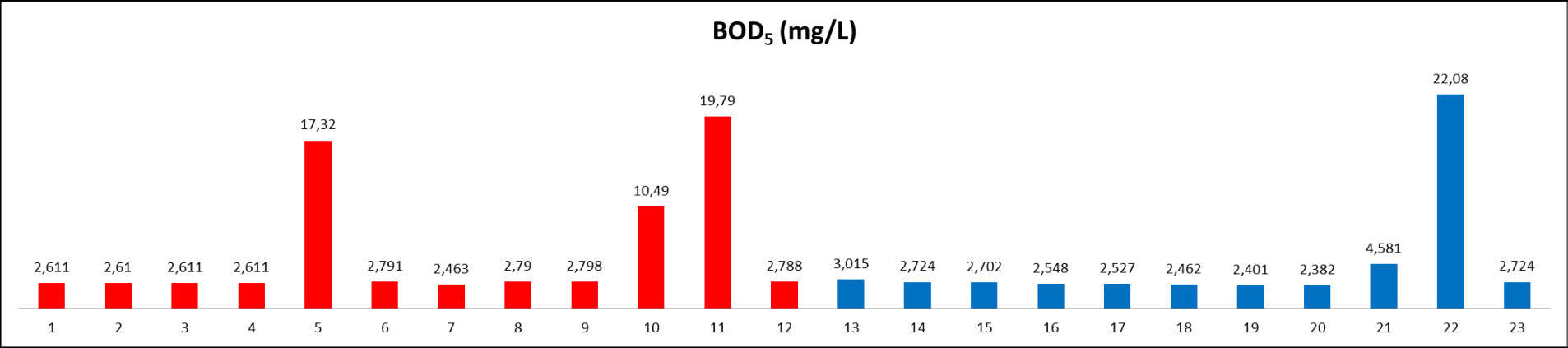


Gráfico 4: Variación de la DQO

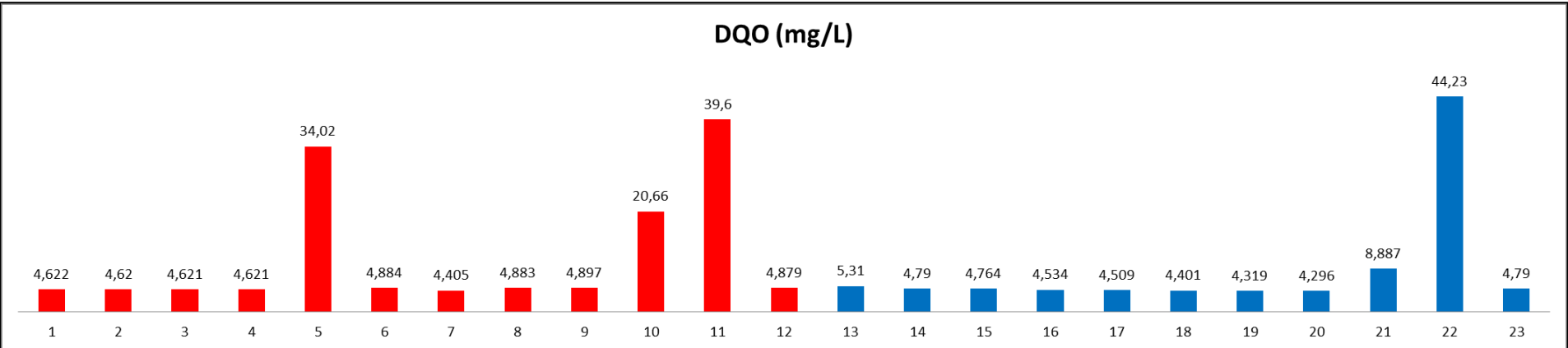
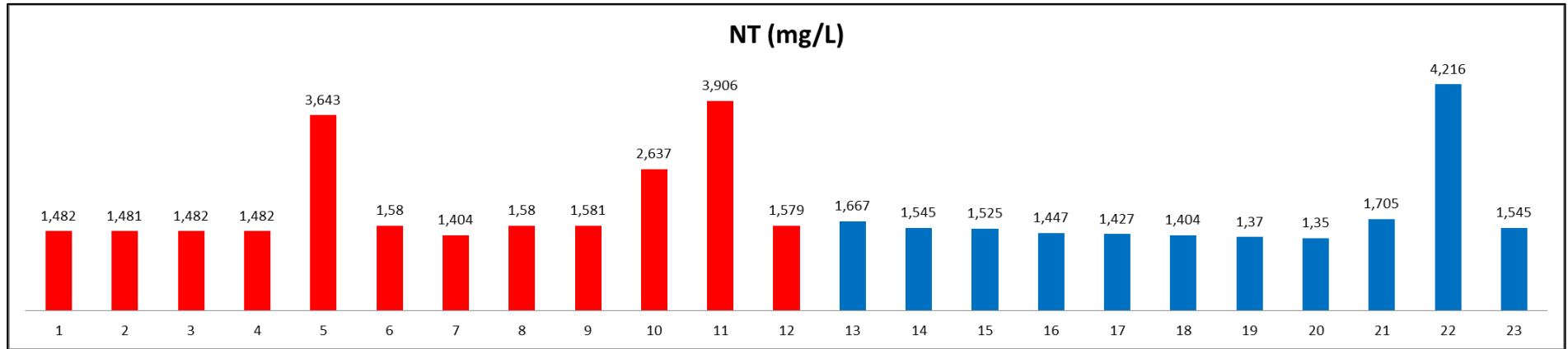
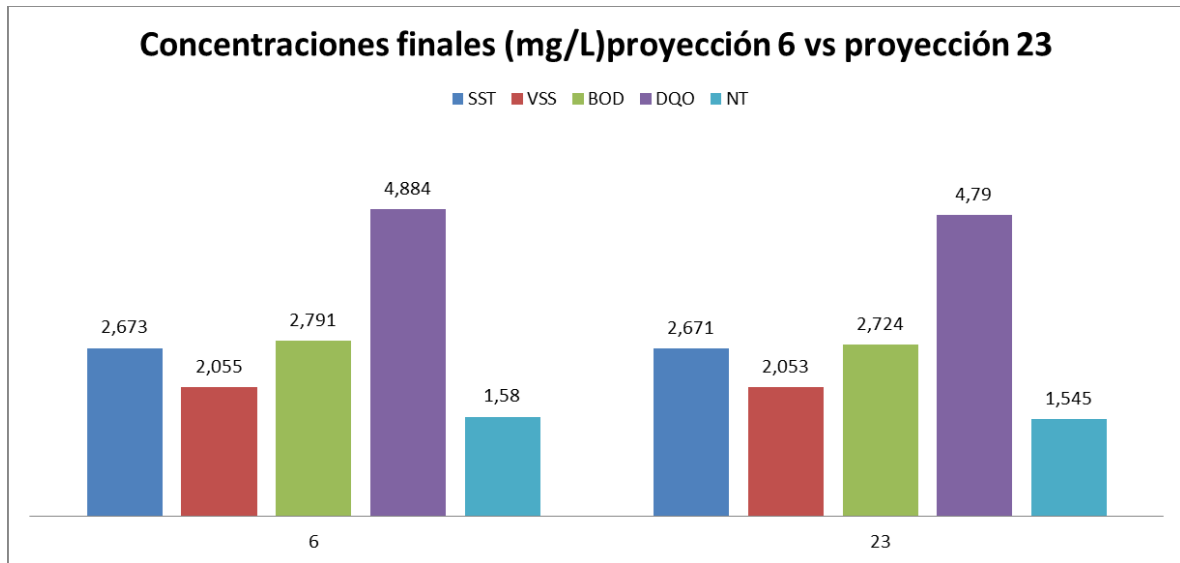


Gráfico 5: Variación del NT



Para finalizar el análisis de la proyecciones evaluadas, se procede a realizar la comparación grafica de la proyección 6 y la proyección 23, para evaluar que tan diferentes son los resultados obtenidos, y además se adicionaran criterios a nivel de costos que permitan determinar cuál de las dos es más viable para realizar el proyecto y ser con esta la que al final se utilice como parámetros de entrada al filtro modificado con carbón activado. Todo lo anterior se presenta en el Grafico 6

Grafico 6: Comparación de valores finales entre la proyección 6 y la 23.



Del Grafico 6, se puede observar las pequeñas diferencias entre los valores de salida del tratamiento, siendo más bajos los de la proyección 23 que consiste en un tanque de nivelación de un volumen de 200 m^3 y profundidad de 5 m, 2 aireadores con un volumen máximo de 180 m^3 , profundidad de 5m, 4 reactores y difusión de aire, unido a un clarificador circular de fondo plano con un punto de alimentación desde el fondo de 1.5 m, una superficie de 100 m^2 y una profundidad de 4m.

A nivel económico, el tanque de nivelación es igual para los 2 casos, pero el aireador de la proyección 6, consta de un reactor y un metro de profundidad menos, y en el clarificador también consta con un metro menos de profundidad, es decir 2 reactores y 4 metros verticales menos ya que son 2 aireadores y 2 clarificadores por proyección.

Con respecto al tipo de mezcla entre mecánica o difusión de aire, el mantenimiento que se debe realizar a un difusor de aire, es considerablemente más económico a una entrada de aire mecánica, el difusor de aire, electrónicamente funciona de acuerdo a una programación y bombas impulsoras de aire las cuales tienen la función de suministrar aire en cantidades estipuladas sin mayores costos de funcionamiento, ni altos consumos de energía. (Trox Technik 2002)

A nivel constructivo, por las dimensiones de la estructura del clarificador, es más conveniente la construcción de un clarificador rectangular netamente y no uno circular por la complejidad de su forma y es por esto que traducido en costos la proyección 23 es considerable más costosa y la diferencia existente entre las 2 proyecciones es mínima por lo cual la selección final es la información suministrada por la proyección 6.

Pruebas de remoción de cromo con carbón activado.

Para las pruebas de remoción de cromo con carbón activado, se partió de una concentración base de 1374 mg/L, dada por la Tabla 1, de caracterización del agua residual, se evaluaron 4 tipos de carbón activado, dividido en carbón activado granular y carbón activado en polvo cada uno modificado y sin modificar utilizando las variables de densidades, diámetros de partículas, isothermas constantes de los materiales según Freundlich y demás variables establecidas en la Tabla 2, también, cada carbón fue evaluado en cuatro cantidades de masa diferentes, siendo estas 5000g, 7000g 8742g y 10000g. Estos valores fueron evaluados para comprobar su tiempo de saturación en cuestión de 2 segundos.

Para la realización de las curvas de ruptura, se presenta la teoría con respecto a las isothermas de Freundlich, las cuales fueron las utilizadas en este proyecto.

La isoterma de Freundlich se utiliza ampliamente para describir la adsorción de soluciones acuosas, en concreto sobre carbón activo. Ésta no puede definir el intervalo lineal en concentraciones muy bajas o el efecto de saturación a concentraciones muy altas, por ello se debe emplear en concentraciones intermedias. La ecuación de esta isoterma es:

$$q_{eq} = K * C_{eq}^n$$

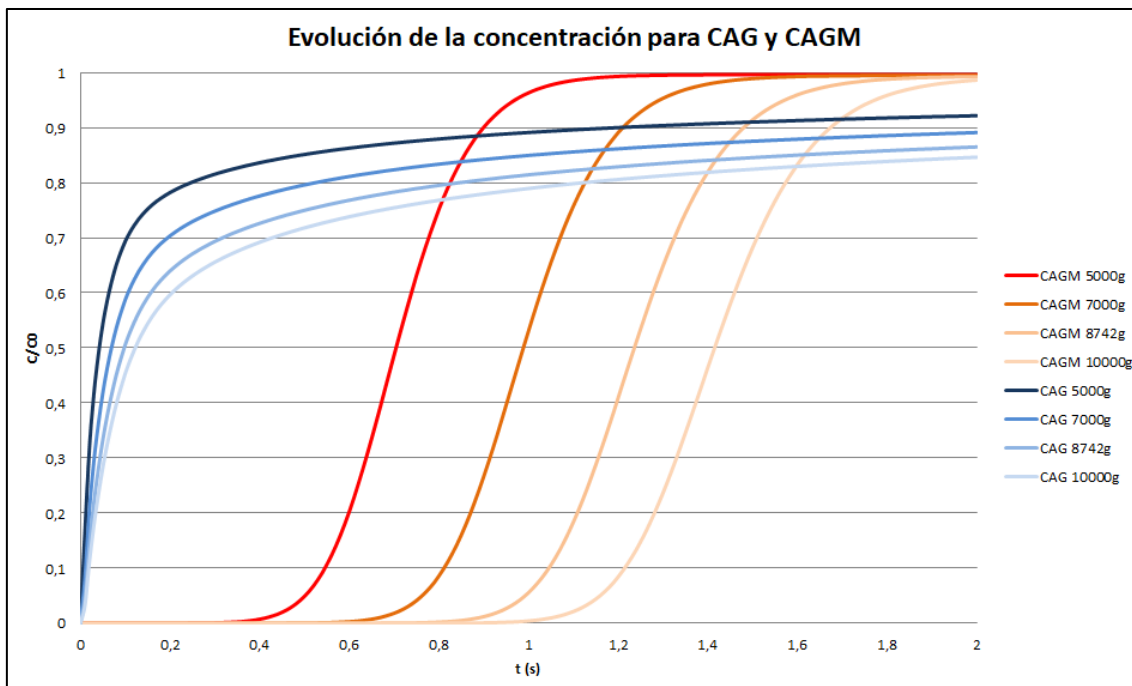
Dónde:

K = El coeficiente de adsorción. Caracteriza la fuerza de adsorción, cuanto mayor es el valor de K , mayor es la carga adsorbente que se puede lograr.

n = Se encuentra relacionado con la heterogeneidad energética de la superficie adsorbente y determina la curvatura de la isoterma. Cuanto menor sea el valor de n , más cóncava es la forma isotérmica y si la $n=1$, la gráfica se vuelve lineal. Las isothermas con un $n<1$ se consideran favorables, ya que muestran las altas cargas adsorbentes en concentraciones bajas. Si $n>1$ se considera desfavorable.

A continuación se presenta la gráfica evolutiva para los carbones activados granulares.

Gráfico 7: Evolución de la concentración para CAG y CAGM.

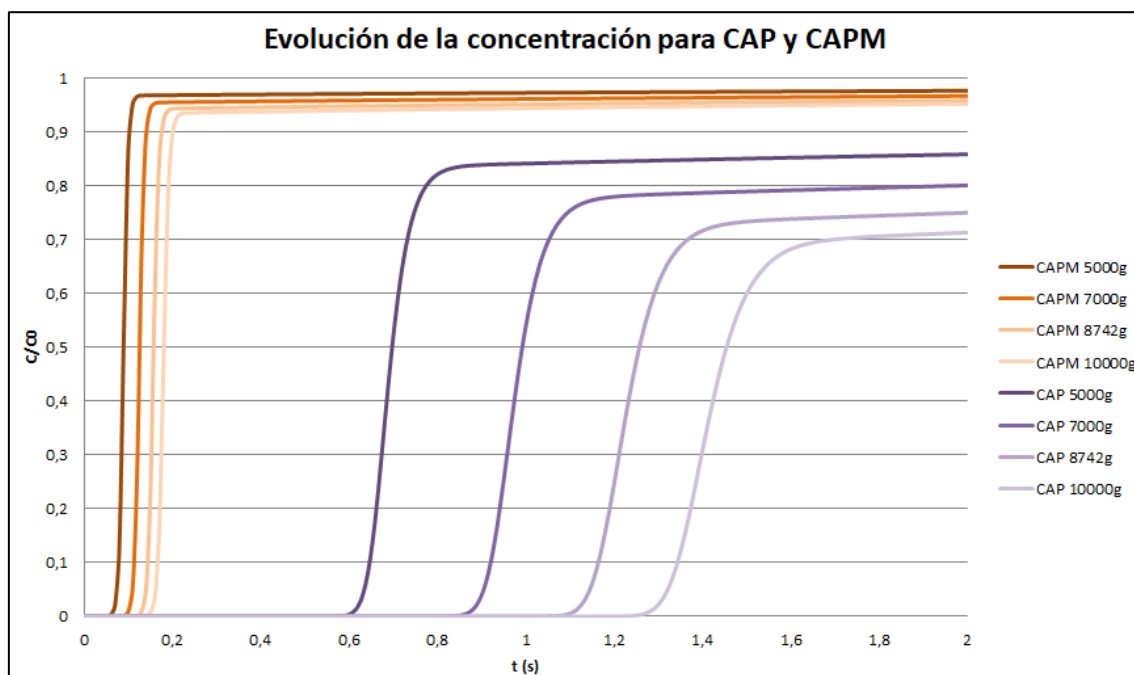


En este gráfico, queda evidenciado, el resultado de la modificación del carbón, para el CAGM, se llega a un grado de saturación casi del 100%, lo que indica una mayor cantidad de contaminante removido con respecto a un CAG ordinario, el cual tiende a saturarse en un inicio y mantiene su evolución constante, perdiendo capacidad de absorción a medida que pasa el tiempo.

Desde luego, también se evidencia que a mayor cantidad de material para los CAG, el porcentaje de saturación aumenta muy lentamente lo que indica que le cuesta llegar a saturarse completamente a medida que pasa el tiempo, mientras que para los CAGM, la saturación siempre es cercana al 100%, solo que su curva de saturación se prolonga en llegar a este punto, mientras que se llenan todos los poros del carbón como tal y se saturan las nanopartículas de contaminante (cromo).

Para el análisis de los carbones activados en polvo, se tiene el Gráfico 8, en este se encuentran los comportamientos evolutivos del CAP y CAPM, con respecto al grado de saturación.

Gráfico 8: Evolución de la concentración para CAP y CAPM.



El CAP al igual que el CAG, tiene dificultad para lograr la saturación, y a mayor cantidad de material, a este le va a costar aún más tiempo lograr la remoción de los contaminantes de manera eficiente. Para los CAPM, se evidencia una saturación mucho más rápida, mas no tan eficiente como la de los CAGM, las nanopartículas, se adhieren a las partículas de carbón, maximizando su eficiencia, pero la saturación de esta es considerablemente más rápida, lo cual genera una necesidad de mayores cantidades de este material para prolongar la vida útil de la columna de adsorción.

En base a estos resultados, y considerando la cantidad de material necesario tanto para síntesis de nanopartículas y cantidad de carbón a emplear, se plantea el diseño de una columna de adsorción con vida útil de tres años.

Diseño conceptual de la columna de adsorción.

Con los resultados obtenidos en el título anterior, se realizará los escalamientos del diseño conceptual para la columna de adsorción de las aguas residuales de curtiembres y su posterior reutilización en esta misma industria, todo a partir de la reglamentación actual vigente el Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico. (Ministerio de Vivienda 2017).

El diseño de la columna de adsorción se realiza mediante un análisis de relación de balance de masas (Qasim y Zhu 2017), partiendo de un tiempo de diseño o vida útil de 3 años (1080 días, asumiendo años de 360 días). Así mismo, se diseñaron 2 columnas de adsorción idénticas, con la finalidad de dividir el caudal a un 50% para cada columna y permitir una velocidad de filtración relativamente alta.

Para la determinación del volumen de ruptura por ciclo (V_r), se tiene la ecuación 1:

$$V_r = Q * t_u \quad (1)$$

Dónde:

V_r = Volumen de ruptura por ciclo en m^3

Q = Caudal de ingreso en $m^3/día$

t_u = Tiempo de vida útil de la columna en días

Para el cálculo de la masa de contaminante adsorbido por unidad de masa de adsorbente (q_e en g de adsorbato / kg) de carbón activado, se tiene la ecuación 2:

$$q_e = KF * (C_0)^{\frac{1}{n}} \quad \text{para } C_0 \gg C_f \quad (2)$$

Dónde:

q_e = Masa de contaminante adsorbido por unidad de masa de adsorbente en g de cromo / kg de CAGM.

KF = Constante de Freundlich.

C_0 = Concentración inicial del contaminante (cromo) en g/m^3

n = Exponente de Freundlinch

C_f = Concentración final por norma (1mg/L de cromo).

Para el cálculo de la masa de adsorbente CAGM, se tiene la ecuación 3, esta es la masa necesaria como lecho filtrante para el óptimo funcionamiento de la columna.

$$M = \frac{Vr * C_0}{q_e} \text{ para } C_0 \gg C_f \quad (3)$$

Dónde:

M = Masa de adsorbente (kg)

Para el cálculo del volumen del lecho ocupado por el CAGM (V_{CAGM}), se tiene la ecuación 4, que relaciona la masa necesaria con respecto a la densidad de una partícula individual.

$$V_{CAGM} = \frac{M}{\rho_{CAGM}} \quad (4)$$

Dónde:

V_{CAGM} = Volumen del lecho de CAGM en m^3

ρ_{CAGM} = Densidad de una partícula en kg/m^3

A partir de este volumen, se determina el diámetro de la columna de adsorción, asumiendo una velocidad de aprovechamiento consultada de las tablas de Wastewatertreatment and reuse theory and design examples: Volume 2, (Qasim y Zhu 2017) que se basa en datos experimentales página 85 del capítulo 15, tratamiento de aguas residuales avanzado y mejoras secundarias, este diámetro está dado por la ecuación 5.

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * v}} \quad (5)$$

Dónde:

D = Diámetro de la columna en m

Q = Caudal en m^3/h

v = Velocidad de filtración m/h

Tras el cálculo de este diámetro, se procede a calcular la profundidad de la columna con la ecuación 6.

$$Prof = \frac{V_{CAGM}}{A} \quad (6)$$

Dónde:

$Prof$ = Profundidad del lecho en m

A = Área de la columna de adsorción

En base a las ecuaciones determinadas se procede a realizar el diseño de la columna de absorción.

Para la determinación del volumen de ruptura por ciclo se tiene según la ecuación 1. Cabe recordar el hecho de que el caudal se divide en 2 antes de la entrada a las columnas.

$$Q = \frac{411.8 \, m^3/dia}{2} = 205.9 \, m^3/dia$$

$$Vr = 205.9 \, m^3/dia * 1080 \, dias = 222372 \, m^3$$

El cálculo de la masa de contaminante adsorbido por unidad de masa de adsorbente (q_e en g de adsorbato / kg) de carbón activado, se realiza con la ecuación 2:

$$C_0 = 1374 \, mg/L = 1374 \, g/m^3$$

$$q_e = 1.88 \, mg/g * \left(1374 \, g/m^3\right)^{0.7} = 57147.3 \, \frac{g \, de \, cromo}{kg \, de \, CAGM}$$

Para el cálculo de la masa de adsorbente (CAGM), se procede a la utilización de la ecuación 3.

$$M = \frac{222372 \text{ m}^3 * 1374 \text{ g de Cr} / \text{m}^3}{57147.3 \frac{\text{g de Cr}}{\text{kg de CAGM}}} = 5346.52 \text{ kg de CAGM}$$

Con la masa anteriormente calculada se procede a realizar el cálculo del volumen del lecho de adsorbente estipulado en la ecuación 4:

$$\rho_{CAGM} = 0.44 \text{ g} / \text{cm}^3 = 440 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$V_{CAGM} = \frac{5346.52 \text{ kg de CAGM}}{440 \text{ kg} / \text{m}^3} = 12.15 \text{ m}^3 \text{ de CAGM}$$

Tras el cálculo de este volumen, se determina el diámetro de la columna de adsorción, asumiendo una velocidad de aprovechamiento de 3.6 m/h (Qasim y Zhu 2017) basada en datos experimentales, de acuerdo a la ecuación 5.

$$Q = 205.9 \text{ m}^3 / \text{dia} = 8.58 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 8.58 \text{ m}^3 / \text{h}}{\pi * 3.6 \text{ m} / \text{h}}} = 1.74 \text{ m aproximada por razón constructiva a } 1.75 \text{ m}$$

Para finalizar los cálculos se procede a calcular el área del filtro y la profundidad del lecho de CAGM con la ecuación 6.

$$A = \frac{\pi * (1.75 \text{ m})^2}{4} = 2.405 \text{ m}^2$$

$$Prof = \frac{12.15 \text{ m}^3 \text{ de CAGM}}{2.405 \text{ m}^2 \text{ de CAGM}} = 5.05 \text{ m}$$

Con el diseño de la columna se plantea la ilustración 8 la cual presenta el modelo de instalación a emplear para la columna de adsorción. También se

presenta los criterios básicos para determinar las pérdidas por la tubería y por accesorios presentes establecidos en la Tabla 7.

Ilustración 8: Diseño de la instalación y acople de la columna de adsorción, medidas en metros.

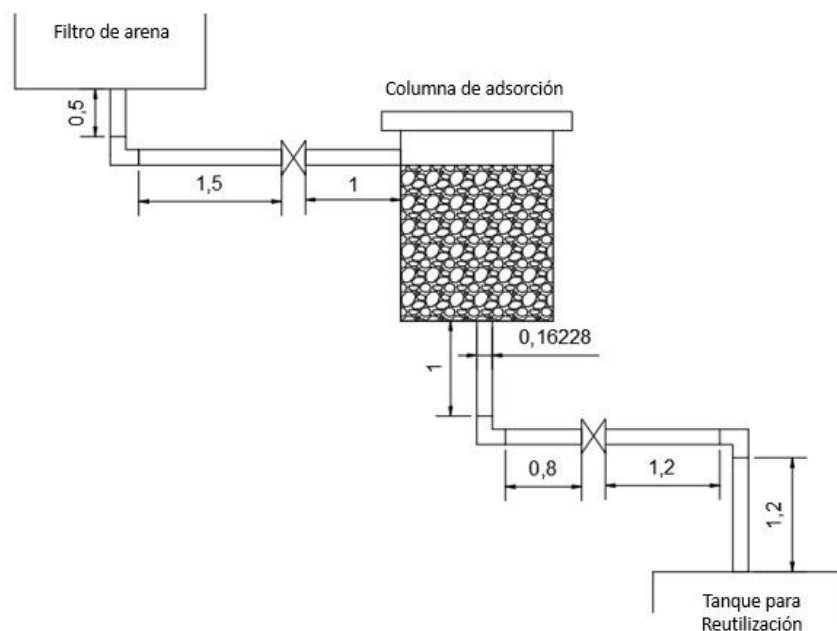


Tabla 7: Características de la instalación.

Diámetro comercial (in)	6
Diámetro interno (mm)	168,28
Longitud de la tubería (m)	7,2
Coefficiente de pérdida K por codos	0,9
Coefficiente de pérdida K por Válvulas	2,5
Coefficiente de pérdida K por salida	1
Coefficiente de pérdida K por entrada	0,25

Donde el diámetro se determinó por el catalogo PAVCO de tuberías hidrosanitarias (PAVCO 2020), y los coeficientes de pérdida se determinaron por medio de la literatura y tablas experimentales (Castelló Torre y Castelló Torre 2017).

Con el fin de determinar las pérdidas por fricción y accesorios desde la tubería saliente del filtro de arena hasta el tanque de reutilización de aguas, se plantea la utilización de las ecuaciones 7 y 8, la ecuación 7 permite calcular el número

de Reynolds, el cual es un término importante ante la determinación del coeficiente de fricción de la tubería representada por Colebrook-White en la ecuación 8.

$$Re = \frac{4 * Q}{\pi * D * \vartheta} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7 * D} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right] \quad (8)$$

Dónde:

Q = Caudal en m³/s

D = Diámetro de la tubería en m

ϑ = Viscosidad cinemática del agua en m²/s (para 16°C $\vartheta = 1,139 * 10^{-6}$ m²/s)

f = Coeficiente de fricción de la tubería

ε = Rugosidad de la tubería PVC (0.0015mm)

Con la determinación de estos parámetros se realiza el cálculo de las pérdidas de fricción de acuerdo a la ecuación modificada de Darcy Weisbach (ecuación 9):

$$hf = \frac{8 * f * L * Q^2}{\pi^2 * g * D^5} \quad (9)$$

Dónde:

hf = Perdidas por fricción en m

L = Longitud de la tubería en m

g = Gravedad (9.81 m/s²)

Para el cálculo de las perdidas por accesorios, se procede a utilizar la ecuación 10, que relaciona los coeficientes de los accesorios en un solo coeficiente global.

$$h_a = \frac{8 * K_g * Q^2}{\pi^2 * g * D^4} \quad (10)$$

Dónde:

h_a = Pérdidas por accesorios en m

K_g = Coeficiente global de pérdidas por accesorios

Con la determinación de estas pérdidas, se determina las pérdidas totales en la instalación. Procediendo con dichos cálculos se tiene:

$$Q = 205.9 \text{ m}^3/\text{dia} = 2.383 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Re = \frac{4 * 2.383 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi * 0.16828 \text{ m} * 1,139 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 15830.57$$

Aplicando la ecuación de Colebrook-White, se tiene:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left[\frac{0.0015 \text{ mm}}{3.7 * 168.28 \text{ mm}} + \frac{2.51}{15830.57 * \sqrt{f}} \right] = 0.0274356$$

Con estos parámetros se realiza el cálculo de las pérdidas de fricción de acuerdo a la ecuación modificada de Darcy Weisbach (ecuación 9):

$$h_f = \frac{8 * 0.0274356 * 7.2 \text{ m} * (2.383 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}})^2}{\pi^2 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (0.16828 \text{ m})^5} = 0.0006869 \text{ m}$$

Para el cálculo de las pérdidas por accesorios, se procede a utilizar la ecuación 10. El K_g , está dado por 3 codos, 2 válvulas de seguridad, una entrada y una salida.

$$K_g = 3 * 0.9 + 2 * 2.5 + 1 + 0.25 = 8.95$$

$$h_a = \frac{8 * 8.95 * (2.383 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}})^2}{\pi^2 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (0.16828 \text{ m})^4} = 0.005237 \text{ m}$$

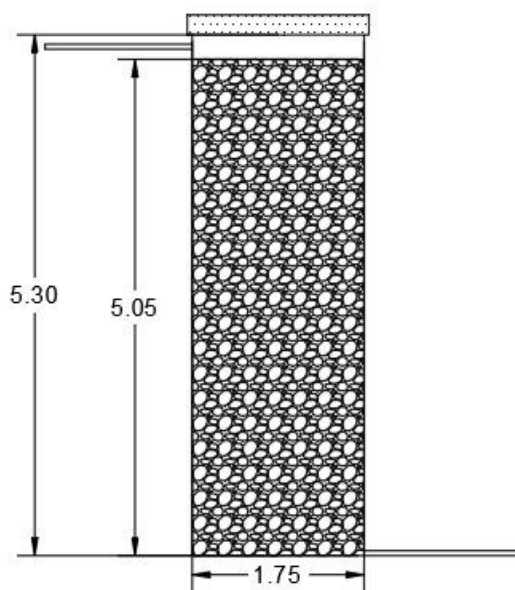
Finalmente se calcula las pérdidas de la instalación de la columna con la ecuación 11:

$$h_t = h_f + h_a \quad (11)$$

$$h_t = 0.0006869m + 0.005237 m = 0.005924m$$

Tras la determinación de estos parámetros de la columna de adsorción, se presenta la ilustración 9, con las dimensiones finales establecidas para la columna de adsorción, el diámetro final de la columna de 1.75m y una profundidad del lecho de CAGM de 5.05m, finalmente se dio una altura total a la columna de 5.3m por facilidad constructiva y tener un volumen que pueda ocupar el caudal al llegar a la columna.

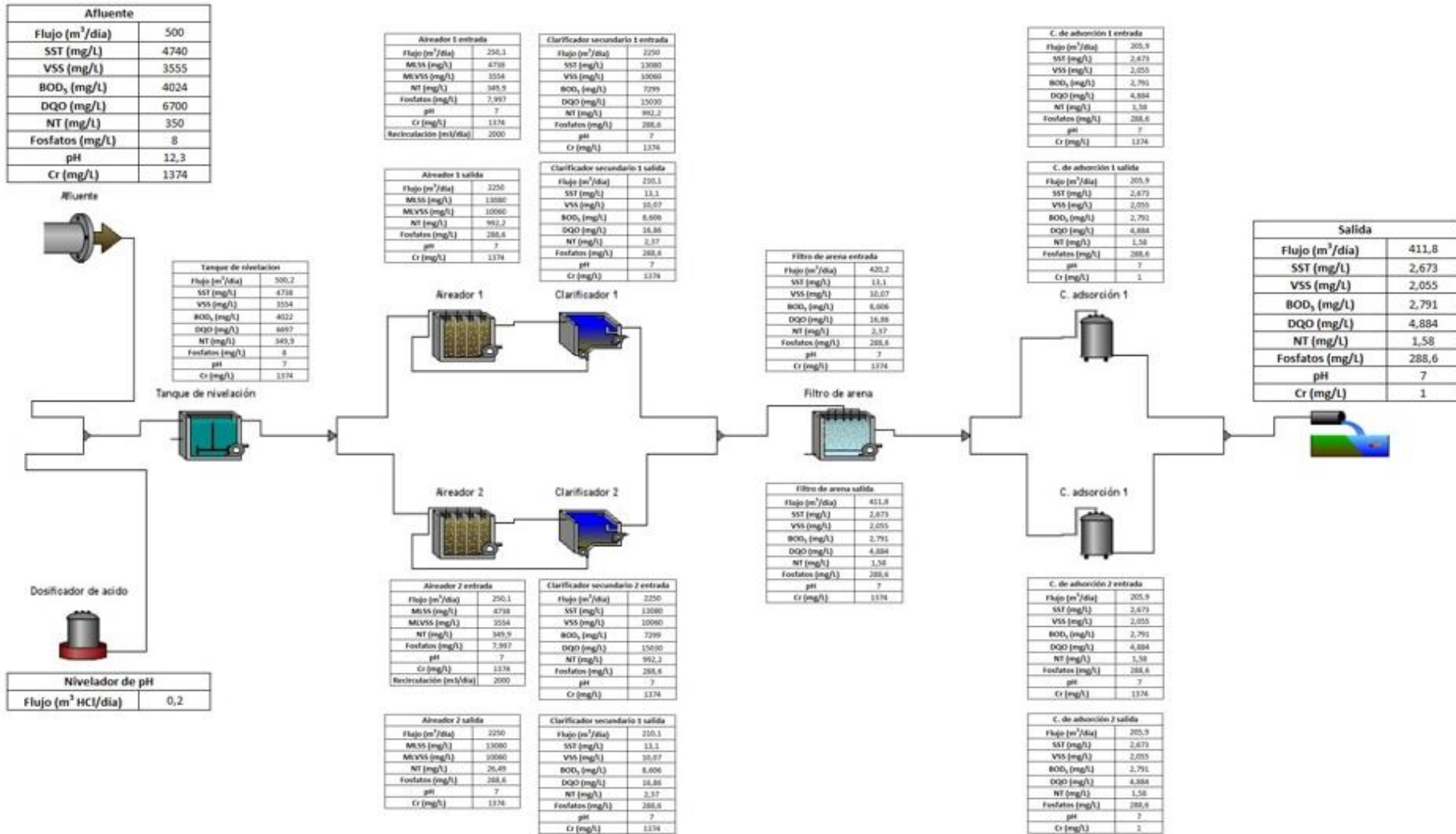
Ilustración 9: Dimensiones finales de la columna de adsorción



Fuente: Propia

Adicional a esta ilustración, se realiza el esquema de tratamiento final de la planta con las tablas resumen de reducción de los parámetros contaminantes, y los valores obtenidos al final del tratamiento.

Ilustración 10: Esquema final de planta de tratamiento con valores finales.



La ilustración 10, trata de recrear los cambios sufridos física y químicamente en el agua residual de curtiembre, a través que pasa por cada una de las etapas de tratamiento de agua, siendo relevantes principalmente las concentraciones de sólidos, el fosfato presente y la reducción de cantidades de DQO y BOD₅, a continuación en la Tabla 8, se presenta los datos de entrada, finales y los estipulados por norma.

Tabla 8: Comparación de las características obtenidas.

	Unidad	A. Residual inicial	A. Residual final	Norma
Temperatura	°C	16	16	AyR
pH		12,3	7	7
Conductividad	uS/cm	1152	-----	1500
DBO5	mg/L	4024	2.791	10
DQO	mg/L	6700	4.884	30
Nitrógeno total	mg/L	350	1.58	5
S. sedimentables	mg/L	3555	2.673	5
S.Suspendidos	mg/L	4740	2.055	10
Cromo total	mg/L	1354	1	1
Grasas totales	mg/L	502	0	0

Tras la visualización de los resultados obtenidos con respecto a los estipulados por norma, se puede concluir que todos se han logrado reducir lo suficiente como para garantizar de forma óptima la reutilización de esta agua residual en la misma industria, contribuyendo así a reducir la cantidad de caudales en los vertimientos y contaminantes que llegan al río Tunjuelo.

CONCLUSIONES:

- Tras la determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual de curtiembre, y los valores máximos aceptados por norma, con forme a los valores obtenidos en la Tabla 5, la reutilización de esta agua, es aceptable y cumple con los parámetros para su reusó en la misma industria de las curtiembres.
- Se observa tras los análisis realizados que la modificación del carbón activado tanto en su presentación granular como en polvo, que las nanopartículas empleadas, mejoran la remoción de metales pesados, en este caso en concreto el cromo, reduciendo sus altas concentraciones a parámetros máximos aceptados para el reusó del agua.
- Con la realización de la modificación de los carbones activados tanto en polvo como granular, se puede observar en las gráficas 7 y 8, el cómo estas se saturan de contaminante con una mayor velocidad, este fenómeno garantiza mayores remociones del contaminante aunque repercute en que para el diseño del filtro, las cantidades de material sean elevadas, con el fin de garantizar los 3 años de vida útil.
- Conceptualmente, al no tener datos de laboratorio, para el diseño de la columna a partir de datos experimentales, el método de la relación y balance de masas, da una aproximación y diseño eficiente y optimo, cumpliendo con todas las condiciones establecidas y garantizando la remoción del contaminante a los valores esperados por norma.
- Con la búsqueda de reutilizar un porcentaje del caudal total consumido por una curtidora de cueros, se genera la disminución de caudales contaminados vertidos a los cuerpos de agua, reduciendo así un poco la contaminación de los mismos, dando beneficios tanto ambientales como económicos a las curtidoras, tras la disminución de los consumos generales de agua potable utilizada.

REFERENCIAS

- Agua | Naciones Unidas. , 2017.
- AMBIENTE, M. de, 2015. *Resolucion_631_de_2015_vertimientos_minambiente.pdf*. 2015. S.l.: s.n.
- ARTUZ, L.A., MARTÍNEZ, M.S. y MORALES, C.J., 2011. Las industrias curtiembres y su incidencia en la contaminación del río Bogotá. *Isocuanta*, vol. 1, no. 1, pp. 43-53. ISSN 2145-1419.
- Calidad del agua - IDEAM. , 2012.
- CARRIAZO, J.G., SAAVEDRA, M.J. y MOLINA, M.F., 2010. Adsorption properties of an activated carbon and determination of Langmuir's equation using low cost materials. *Educacion Quimica* [en línea], vol. 21, no. 3, pp. 224-229. ISSN 18708404. DOI 10.1016/S0187-893X(18)30087-9. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30087-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30087-9).
- CARVAJAL-BERNAL, A.M., GÓMEZ-GRANADOS, F., GIRALDO, L., MORENO-PIRAJÁN, J.C., BALSAMO, M. y EROTO, A., 2020. Kinetic and thermodynamic study of n-pentane adsorption on activated carbons modified by either carbonization or impregnation with ammonium hydroxide. *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 302, no. March. ISSN 13871811. DOI 10.1016/j.micromeso.2020.110196.
- CASTELLÓ TORRE, L. y CASTELLÓ TORRE, L., 2017. Diseño de una columna de adsorción. [en línea], Disponible en: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/93468/CASTELLÓ - Diseño de un sistema de adsorción para la eliminación de colorantes presentes en disol....pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/93468/CASTELLÓ_Diseño_de_un_sistema_de_adsorción_para_la_eliminación_de_colorantes_presentes_en_disol....pdf?sequence=1).
- CEPIS/OPS-Informe técnico sobre minimización de residuos en una curtiembre. , [sin fecha].
- COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE (CONAMA), 1999. Guía para el control y la prevención de la contaminación industrial : curtiembre. ,
- DELGADILLO, O., CAMACHO, A. y ANDRADE, M., 2010. 1. A cleaner causes a mob to undergo two displacements on a floor. If the resultant displacement has a magnitude of 120 cm and is directed at an angle of 55. S.l.: s.n. ISBN 9789995476625.
- Determinación de As (III) y As (V) en aguas naturales por generación de hidruro con detección por espectrometría de absorción atómica. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 2003. vol. 34, no. 3, pp. 133-147. ISSN 1015-8553.
- EL-SHERIF, I.Y., TOLANI, S., OFOSU, K., MOHAMED, O.A. y WANAKAYA, A.K., 2013. *Polymeric nanofibers for the removal of Cr(III) from tannery waste water*. 2013. S.l.: s.n.
- ELAHI, A. y REHMAN, A., 2018. Multiple metal resistance and Cr6+ reduction by bacterium, *Staphylococcus sciuri* A-HS1, isolated from untreated tannery effluent. *Journal of King Saud University - Science* [en línea], ISSN 10183647. DOI 10.1016/j.jksus.2018.07.016. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.07.016>.
- GOUTAMA, S.P., SAXENAB, G., SINGHC, V., YADAVA, A.K., BHARAGAVAB, R.N. y KHEM B. THAPAA, 2018. *Green synthesis of TiO2 nanoparticles using leaf extract of Jatropha curcas L. for photocatalytic degradation of tannery wastewater*. 2018. S.l.: s.n.
- HUBER, D., 2008. *Iron Nanoparticles*. 2008. S.l.: s.n.
- IRAWAN, C., NATA, I.F. y LEE, C.K., 2019. Removal of Pb(II) and As(V) using magnetic nanoparticles coated montmorillonite via one-pot solvothermal reaction as adsorbent. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 7, no. 2. ISSN 22133437. DOI 10.1016/j.jece.2019.103000.
- ISLAM, M.R., 2018. EFFECTS OF RELOCATION OF TANNERY INDUSTRIES FROM HAZARIBAGH ON

- WATER QUALITY OF BURIGANGA RIVER. , vol. 10, no. 2, pp. 1-15.
- KANAGARAJ, J., CHANDRA BABU, N.K. y MANDAL, A.B., 2008. Recovery and reuse of chromium from chrome tanning waste water aiming towards zero discharge of pollution. *Journal of Cleaner Production*, vol. 16, no. 16, pp. 1807-1813. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2007.12.005.
- KARELYS SÁNCHEZ, GILBERTO COLINA, MARÍA PIRE, ALTAMIRA DÍAZ, S.C., 2013. Capacidad de adsorción del carbón activado sobre cromo total proveniente de los desechos de tenerías. [en línea]. [Consulta: 9 mayo 2020]. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702013000100007.
- KATHURIA, V., 2006. Controlling water pollution in developing and transition countries - Lessons from three successful cases. *Journal of Environmental Management*, vol. 78, no. 4, pp. 405-426. ISSN 03014797. DOI 10.1016/j.jenvman.2005.05.007.
- KIBRIA, G., 2013. Relation between Hazaribagh Tannery Industry Development and Buriganga River Pollution in Bangladesh Banani Biswas and Takeshi Hamada. *International Journal of Environment*, vol. 2, no. 2, pp. 117-127.
- La importancia de reutilizar el agua | Sostenibilidad para todos. , 2018.
- MÁLAGA TELLO, P., 1991. El sector textil en Colombia. *Boletín económico de ICE, Información Comercial Española*, no. 2295, pp. 3039-3046. ISSN 0214-8307.
- MARIMÓN-BOLÍVAR, W. y GONZÁLEZ, E.E., 2018. Green synthesis with enhanced magnetization and life cycle assessment of Fe₃O₄ nanoparticles. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, vol. 9, pp. 58-66. ISSN 22151532. DOI 10.1016/j.enmm.2017.12.003.
- MEDIO, E.L., DIRECTORES, A., CAPÍTULO, D., SPIEGEL, J. y MAYSTRE, L.Y., 2008. CONTROL DE LA CONTAMINACION AMBIENTAL. . S.I.:
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2010. Resolución 1207 de 2014. *Diario Oficial*, vol. 49242, pp. 1-18.
- MINISTERIO DE VIVIENDA, C. y T.C., 2017. *0330 - 2017.Pdf*. 2017. S.I.: s.n.
- MOLINA, S., MONTEVERDI, S. y BETTAHAR, M., 1999. Adsorption du trichlorure d'azote gazeux sur charbon actif. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIC - Chemistry*, vol. 2, no. 14, pp. 693-696. ISSN 13871609. DOI 10.1016/s1387-1609(00)88462-5.
- Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas residuales: Avances, Ventajas y Desventajas Nanotechnology an alter. , 2018.
- PASSÉ-COUTRIN, N., ALTENOR, S. y GASPARD, S., 2009. Assessment of the surface area occupied by molecules on activated carbon from liquid phase adsorption data from a combination of the BET and the Freundlich theories. *Journal of Colloid and Interface Science* [en línea], vol. 332, no. 2, pp. 515-519. ISSN 00219797. DOI 10.1016/j.jcis.2008.12.079. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2008.12.079>.
- PAVCO, 2020. Manual tecnico de tuberías hidrosanitarias. , pp. 368.
- PENAGOS, N.E.O., 2013. RECUPERACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE CROMO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE CURTIDO DE CURTIEMBRES DE SAN BENITO (BOGOTÁ), MEDIANTE UN PROCESO SOSTENIBLE Y VIABLE TECNOLÓGICAMENTE. , vol. 84, pp. 487-492.
- QASIM, S.R. y ZHU, G., 2017. *Wastewater treatment and reuse theory and design examples: Volume 2: Post-treatment, reuse, and disposal*. S.I.: s.n. ISBN 9781351402743.

- RAVICHANDRAN, V., VASANTHI, S., SHALINI, S., SHAH, S.A.A., TRIPATHY, M. y PALIWAL, N., 2019. Green synthesis, characterization, antibacterial, antioxidant and photocatalytic activity of *Parkia speciosa* leaves extract mediated silver nanoparticles. *Results in Physics* [en línea], vol. 15, no. December 2018, pp. 102565. ISSN 22113797. DOI 10.1016/j.rinp.2019.102565. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102565>.
- SDA y ALCALDIADEBOGOTÁ, 2012. *El sector curtiembres de Bogotá Enfoque en vertimientos y residuos*. S.l.: s.n. ISBN 9789589387979.
- SHARMA, S. y ADHOLEYA, A., 2011. Detoxification and accumulation of chromium from tannery effluent and spent chrome effluent by *Paecilomyces lilacinus* fungi. *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. 65, no. 2, pp. 309-317. ISSN 09648305. DOI 10.1016/j.ibiod.2010.12.003.
- SISTEMA, D., GESTIÓN, I. De y HSEQ, C., 2018. Criterios de implementación ISO 14000 : 2015 Caso Estudio Sector Porcícola Contexto General del Sector Contexto del Sector Porcícola Descripción de la Problemática Problemática del Sector Porcícola Aspectos e Impactos Diagrama de Flujo. ,
- TROX TECHNIK, 2002. Principios difusión de aire. ,
- UNEP, 2015. *Vers un Secteur de Tannerie plus Durable en Méditerranée*. S.l.: s.n. ISBN 9789280735383.
- US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2012. Guidelines for Water Reuse. *Development* [en línea], vol. 26, no. September, pp. 252. DOI EPA16251R-921004. Disponible en: <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r04108/625r04108.pdf>.
- WILFREDO MARIMÓN BOLIVAR, 2018. INGENIERÍA DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS. , vol. 10, no. 2, pp. 1-15.
- WINDOWS, M., CORPORATION, M., HORI, K. y SAKAJIRI, A., 2007. Producción limpia en la industria de curtiembre. ,
- WORLD HEALTH ORGANISATION, 2017. *Guidance for Producing Safe Drinking-Water* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 9789241512770. Disponible en: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/potable-reuse-guidelines/en/.
- YIN, Y., ZHOU, T., LUO, H., GENG, J., YU, W. y JIANG, Z., 2019. Adsorption of arsenic by activated charcoal coated zirconium-manganese nanocomposite: Performance and mechanism. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 575, pp. 318-328. ISSN 18734359. DOI 10.1016/j.colsurfa.2019.04.093.