

**DISEÑO DE OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO Y MANEJO DE
VERTIMIENTOS DE LA PLANTA DE BENEFICIO AURÍFERO EN LA EMPRESA
TROMPETERO, VETAS- SANTANDER**

Realizado por.

Jhonny Omar Ayala Díaz

DIRECTOR

**María Fernanda Domínguez Amorocho
MsC. (c), Esp., Ing. Ambiental**

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA – UNAD

**ESCUELA DE CIENCIAS AGRICOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE -
ECAPMA**

INGENIERÍA AMBIENTA

BUCARAMANAGA

2018

**DISEÑO DE OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO Y MANEJO DE
VERTIMIENTOS DE LA PLANTA DE BENEFICIO AURÍFERO EN LA EMPRESA
TROMPETERO, VETAS- SANTANDER**

Realizado por.

Jhonny Omar Ayala Díaz

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA – UNAD

**ESCUELA DE CIENCIAS AGRICOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE -
ECAPMA**

INGENIERÍA AMBIENTA

BUCARAMANAGA

2018

1. Contenido

| | | |
|---------|--|----|
| 2. | GLOSARIO..... | 7 |
| 3. | INTRODUCCIÓN..... | 9 |
| 4. | RESUMEN..... | 11 |
| 5. | CONTENIDO..... | 11 |
| 6. | SUMMARY..... | 12 |
| 7. | FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 13 |
| 8. | JUSTIFICACIÓN..... | 14 |
| 9. | OBJETIVO GENERAL..... | 15 |
| 10. | OBJETIVOS ESPECIFICOS..... | 15 |
| 11. | MARCO TEORICO..... | 16 |
| 11.1. | EL AGUA..... | 16 |
| 11.1.1. | Factores contaminantes del agua..... | 16 |
| 11.2. | AGUA RESIDUAL..... | 17 |
| 11.2.1. | Parámetros relevantes en aguas residuales..... | 17 |
| 12. | CONTAMINACION DE AGUAS EN LA INDUSTRIA MINERA AURIFERA..... | 18 |
| 12.1.1. | Cianuro..... | 18 |
| 12.1.2. | Metales..... | 19 |
| 12.1.3. | Solidos sedimentables y suspendidos totales..... | 20 |
| 12.1.4. | PH..... | 21 |
| 13. | MARCO AMBIENTAL PARA VERTIMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES EN COLOMBIA..... | 21 |
| 13.1. | Resolución 0631 de 2015..... | 22 |
| 13.1.1. | Resolución 0631 de 2015 para los vertimientos de aguas residuales de la actividad minera aurífera..... | 23 |
| 13.2. | TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES..... | 24 |
| 13.2.1. | Tratamiento para la eliminación de la materia en suspensión..... | 25 |
| 13.2.2. | Cribado..... | 25 |
| 13.2.3. | Sedimentación o decantación..... | 26 |
| 13.2.4. | Filtración..... | 27 |
| 13.2.5. | Flotación..... | 27 |
| 13.3. | Coagulación-Floculación..... | 28 |

| | | |
|---------|---|----|
| 13.4. | Pruebas de Jarras | 31 |
| 13.5. | Tratamiento para la eliminación de la materia disuelta | 31 |
| 13.5.1. | Precipitación | 31 |
| 13.5.2. | Procesos electroquímicos | 31 |
| 13.5.3. | Intercambio iónico..... | 31 |
| 13.5.4. | Tratamientos biológicos..... | 32 |
| 14. | METODOS Y MATERIALES | 32 |
| 14.1. | DESCRIPCIÓN DEL PROCESO | 33 |
| 15..... | | 34 |
| 16. | CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS (STARnD) DE LA EMPRESA TROMPETERO LTDA..... | 34 |
| 16.1. | Descripción del muestreo | 34 |
| 16.2. | SELECCIÓN Y DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE LOS REACTIVOS QUÍMICOS PARA EL MEJORAMIENTO DEL STARnD | 35 |
| 16.2.1. | Materiales para el control del sistema STARnD de la empresa Trompetero LTDA..... | 36 |
| 17. | RESULTADOS..... | 36 |
| 17.1. | ESTADO INICIAL DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS DE LA EMPRESA TROMPETERO LTDA | 36 |
| 17.1.1. | Resultados obtenidos in situ..... | 37 |
| 17.1.2. | Resultados obtenidos por el laboratorio..... | 38 |
| 18. | PROPUESTA DE DISEÑO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL STARnD DE LA EMPRESA TROMPETERO LTDA..... | 40 |
| 18.1. | Modificación estructural de las unidades de tratamiento STARnD..... | 41 |
| 18.2. | Implementación del tratamiento químico en el STARnD | 43 |
| 18.2.1. | Selección de los reactivos químicos | 44 |
| 18.2.2. | Dosificación óptima de coagulante y floculante en el STARnD | 45 |
| 19. | EVALUACIÓN EN CAMPO DEL DISEÑO PROPUESTO | 47 |
| 19.1. | Cálculos para la aplicación en campo del nuevo STARnD de la empresa Trompetero LTDA..... | 47 |
| 19.1.1. | Ubicación de los puntos de adición de los respectivos reactivos químicos | 48 |
| 19.2. | Caracterización de las aguas residuales no Domésticas luego de la implementación de mejoras en el STARnD de la empresa Trompetero LTDA | 50 |
| 20. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 54 |
| 21. | RECOMENDACIONES..... | 55 |

| | |
|-----------------------|----|
| 22. BILIOGRAFÍA | 56 |
|-----------------------|----|

LISTADO DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|-----------|
| Ilustración 1. Etapas de Desarrollo del Proyecto | 33 |
| Ilustración 2. DIAGRAMA DEL PROCESO DE LA EMPRESA TROMPETERO LTDA | 34 |
| Ilustración 3. Primer tanque sedimentador al inicio de STARnD | 41 |
| Ilustración 4. Segundo tanque sedimentador al inicio del STARnD | 42 |
| Ilustración 5. Primer tanque sedimentador del STARnD, modificado | 42 |
| Ilustración 6. Segundo tanque sedimentador del STARnD modificado | 43 |
| Ilustración 7. Diagrama del nuevo STARnD de la empresa Trompetero LTDA | 49 |
| Ilustración 8. Ubicación de la cal y el policloruro de Aluminio a la salida del primer tanque sedimentador | 49 |
| Ilustración 9. Ubicación de Poliacrilamida iónica a la entrada del segundo tanque sedimentador | 50 |
| Ilustración 10. Comparación cualitativa entre el STARnD al inicio del proyecto y ya finalizado Salida de aguas residuales no domésticas del óptimo STARnD | 53 |
| Ilustración 11. Salida de agua al final del proceso. CUMPLIMIENTO DE LA RESOLUCIÓN 0631 DEL 2015, Y CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS | 53 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|---|-----------|
| Tabla 1. Parámetros y límites máximos permisibles para el vertimiento de aguas residuales en la actividad minera aurífera (Resolución 0631, 2015) | 23 |
| Tabla 2. Comparación entre los tipos de coagulante | 29 |
| Tabla 3. Diferencias entre polímeros sintéticos según su ionidad | 30 |
| Tabla 4. Datos in situ de la entrada del STARnD | 37 |
| Tabla 5. Datos in situ de la salida del Sistema del STARnD | 37 |
| Tabla 6. Datos in situ de aguas arriba y abajo del punto de vertimiento quebrada Jaimes | 38 |
| Tabla 7. Resultados del laboratorio del STARnD | 38 |
| Tabla 8. Resultados del laboratorio del STARnD | 39 |
| Tabla 9. Comparativo entre la caracterización de las aguas de vertimiento no domésticas de la empresa Trompetero LTDA y resolución 0631 de 2015 | 39 |
| Tabla 10. Prueba de Jarras con Policloruro de Aluminio | 45 |
| Tabla 11. Prueba de Jarras con Poliacrilamida iónica | 46 |
| Tabla 12. Prueba de Jarras con Policloruro de Aluminio y Poliacramida iónica | 46 |
| Tabla 13. Dosificación en campo para el tratamiento químico en 24 horas de proceso | 48 |
| Tabla 14. Resultados del laboratorio del nuevo STARnD de la empresa trompetero LTDA | 51 |
| Tabla 15. Comparativo entre las caracterizaciones inicial y final de las aguas de vertimiento no domésticas de la empresa Trompetero LTDA y la resolución 0631 de 2015 | 51 |

2. GLOSARIO

Metales Preciosos: Aquellos metales que se encuentran en estado libre en la naturaleza, es decir, que no se encuentran combinados con otros elementos formando compuestos, suelen ser Oro (Au), la plata (Ag), el Platino (Pt), el rodio (Rh) y el paladio (Pd).

Reactivo: Sustancia que, por su capacidad de provocar determinadas reacciones, sirve en los ensayos y análisis químicos para revelar la presencia o medir la cantidad de otra sustancia.

Mercurio: Elemento químico de número atómico 80, masa atómica 200.59 y símbolo Hg; es un metal líquido a temperatura ordinaria, de color blanco plateado, brillante y denso, que se encuentra en la naturaleza en estado puro o combinado con plata, o en forma de sulfuro en el cinabrio; se usa principalmente en termómetros y barómetros, y también en aleaciones llamadas amalgamas.

Cianuro: Sal de ácido cianhídrico, que es potente veneno.

Metales: Son los elementos químicos capaces de conducir la electricidad y el calor, que exhiben un brillo característico y que, con la excepción del mercurio, resultan sólidos a temperatura normal. El concepto se utiliza para nombrar a elementos puros o a aleaciones con características metálicas.

Valores Límites permisibles: Concentración de sustancias que se encuentran en suspensión en el aire. Representan condiciones por debajo de las cuales se cree que todos los trabajadores pueden exponerse.

Tanques Sedimentadores: Son diseñados para remover la materia orgánica soluble y coloidal que permanece normalmente después de los tratamientos primarios.

Decantación: Es un método físico para la separación de mezclas heterogéneas, se separa un sólido a líquido o más denso de otro fluido o menos denso y por lo tanto ocupa la parte superior de la mezcla.

Coagulante químico: Como sales de hierro, sales de aluminio o polímeros, se agregan al agua fuente para volver fácil la adherencia entre las partículas. Los coagulantes funcionan creando una reacción química y eliminando las cargas negativas que causan que las partículas se repelan entre sí.

Floculante: Sustancia química comúnmente orgánica que aglutina sólidos en suspensión una vez efectuada su coagulación, provocando su precipitación. Por ejemplo el polímero de acrilamida, es el polímero más empleado para la floculación.

Planta de Beneficio de mineral Aurífero: Lugar establecido por máquinas y equipos que realizan un proceso de conminución principalmente entre molienda y concentración de metales como el Oro y la Plata.

Procesos Físicos: En los que no cambia la composición química de ninguna sustancia; son también aquellos que son reversibles, ya que no ocurren cambios de energía y se detectan por observación o por medición.

Procesos Químicos: Es un conjunto de operaciones químicas y/o físicas encaminadas a la transformación de unas sustancias iniciales en productos finales diferentes. Un producto es diferente de otro cuando tenga distinta composición, esté en un estado distinto o hayan cambiado sus condiciones.

Lixiviación: Extracción de la materia soluble de una mezcla mediante la acción de un disolvente líquido.

Agua residual no doméstica: ARnD, Se ven afectadas negativamente por influencia antropogénica. Estas incluyen residuos líquidos industriales o mineros eliminados, las cuales requieren un sistema de tratamiento.

Prueba de Jarras: Es un proceso unitario y la principal prueba de laboratorio para determinar el dosaje de coagulantes en las plantas de tratamiento de agua potable, son simulaciones en el laboratorio de las operaciones de coagulación floculación-decantación que se realizan en las plantas de tratamiento y purificación de aguas.

Procesos Electroquímicos: Reacciones químicas que se dan en la interfaz de un conductor eléctrico (llamado electrodo, que puede ser un metal o un semiconductor) y un conductor iónico (el electrolito) pudiendo ser una disolución y en algunos casos especiales, un sólido.

3. INTRODUCCIÓN

La extracción de minerales preciosos en minas auríferas se ha ido tecnificando a través de los tiempos por causa del impacto ambiental que generan sus procesos. Anteriormente existía un sistema rudimentario legalizado que consistía en la extracción de oro y plata haciendo uso del mercurio como reactivo principal para encapsular el material de interés y así extraerlo. En el transcurso del tiempo se realizaron estudios sobre los efectos del uso del mercurio y se identificó como una sustancia toxica ambiental que generaba un impacto en la salud humana, principalmente en el sistema nervioso central, produciendo efectos respiratorios, renales, cardiovasculares y neuronales (Gaioli, et al., 2012). A raíz de esta información se prohibió el uso del mercurio para la extracción de metales preciosos. Esto demuestra la importancia de la tecnificación de la industria minera en pro ambiental y humano.

La pequeña minería aurífera del territorio nacional colombiano ha estado en continuo crecimiento, tecnificándose, modificando los procesos rudimentarios por procesos más elaborados, utilizando equipos e información tecnológica en la extracción del material aurífero, estos cambios se han basado en la conciencia ambiental de sus propietarios y en el actual código minero (Ley 685 de 2001) que elimina la estratificación de explotación minera por escalas, los requisitos que se le exigen a una gran concesión minera para obtener sus permisos ambientales y mineros, son exigidos también a los pequeños mineros que desarrollan esta actividad como medio de subsistencia (Guiza, 2013).

La empresa sociedad minera Trompetero Ltda, es una empresa a pequeña escala en el procesamiento de mineral aurífero, ubicada en la región de vetas municipio del departamento de Santander. Su actividad de desarrollo es la extracción de mineral aurífero para su procesamiento. Luego de que el mineral es procesado las aguas residuales generadas por la planta de beneficio son tratadas por un sistema de tratamiento rudimentario utilizando sólo cal para el control del pH y sedimentación de sólidos suspendidos, posteriormente son vertidas a la quebrada Jaimes.

Debido a la legalidad de la empresa Trompetero y a sus permisos ambientales, la entidad ambiental del estado "CDMB" (Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga) vigila el cumplimiento de las normas ambientales que rigen los vertimientos puntuales de aguas residuales generados por la planta de producción de dicha empresa. Los vertimientos generados por la actividad minera están regulados por la norma presentada el 17 de marzo del 2015, Resolución 0631 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible donde se establecen los parámetros y los valores Límites Máximos Permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas residuales cumpliendo con la calidad del agua, sin considerar el volumen de la descarga ni la capacidad de asimilación del cuerpo receptor (Resolución 0631, 2015).

En el año 2016 la empresa sociedad minera Trompetero presentó dificultades ambientales por dichos vertimientos. Según los resultados de la caracterización realizada en Diciembre de 2016 para el cumplimiento del artículo 4 numeral 3 de la resolución 001314 del 22 de Diciembre de 2015 por el cual se otorga el permiso de vertimiento en el sistema de tratamiento de aguas residuales y cuerpo receptor la empresa sociedad minera Trompetero no cumplió con los límites permisibles en los parámetros de concentración de sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables y concentración de metales, descritos en la resolución 0631 del 17 de Marzo de 2015. Por causa del incumplimiento a la normatividad ambiental el presente proyecto se enfocará en la implementación de un proceso físico-químico para la optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales no domésticas de la planta aurífera, mejorando así la calidad del vertimiento. La optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales no domésticas de la empresa sociedad minera Trompetero LTDA abarcará 4 etapas, como primera etapa, se caracterizará las aguas de vertimiento para identificar la concentración de todos los contaminantes que posea, luego se realizará el mejoramiento estructural de los tanques sedimentadores, seguidamente se determinará que reactivos químicos implementar en el sistema según la caracterización de las aguas residuales vertientes, encontrando a su vez la correcta dosificación a nivel de laboratorio de dichos reactivos, luego se aplicará en campo a escala industrial la totalidad del sistema fisicoquímico, seguidamente se caracterizará las aguas vertientes en comparación con la norma ambiental vigente y por último a la salida del sistema de tratamiento se implementará un control constante de los parámetros que se puedan medir in situ: caudal, pH y sólidos sedimentables.

Con los resultados obtenidos en el análisis de aguas cumpliendo los límites permisibles estipulados en la norma ambiental en el momento donde finalizó la optimización del sistema de tratamiento, se espera recuperar la quebrada Jaimes, permitiendo devolver a la misma su ecosistema acuático, recuperar el recurso suelo, reutilizar el agua por la población para los diversos usos y minimizar enfermedades en la población ocasionadas por agentes químicos. Esta mejora logrará preservar el medio ambiente y mostrar a la región de Santander una minería limpia, trabajando de la mano con las entidades competentes como lo son Corporaciones autónomas ambientales delegadas por el ministerio del medio Ambiente, y la Agencia Nacional de Minería delegada por el Ministerio de Minas; se fortalecerán los vínculos minero ambientales en pro de la conservación del medio ambiente en todo el territorio y al mismo tiempo dejar abierta el semillero para nuevas investigaciones con el fin de mejoras continuas.

4. RESUMEN

TITULO: OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE VERTIMIENTO DE LA PLANTA DE BENEFICIO AURÍFERO EN LA EMPRESA TROMPETERO LTDA.

AUTOR

Jhonny Omar Ayala Díaz

PALABRAS CLAVES

Optimización, Sistema de tratamiento, Vertimiento, Normatividad, Mitigación.

5. CONTENIDO

La empresa sociedad minera Trompeteros LTDA ubicada en el Municipio de Vetas del Departamento de Santander, tiene como operación extraer mineral para su respectivo procesamiento aurífero. Luego de que el mineral es procesado las aguas residuales generadas son tratadas por un sistema de tratamiento y posteriormente son vertidas a la quebrada el Jaimes. Inicialmente la empresa Trompetero LTDA presentó dificultades relevantes en el ámbito ambiental por dichos vertimientos. Según los resultados arrojados en la caracterización realizada en Diciembre de 2016 para el cumplimiento del artículo 4 numeral 3 de la resolución 001314 del 22 de Diciembre de 2015 por el cual se otorga el permiso de vertimiento en el sistema de tratamiento de aguas residuales y cuerpo receptor, la empresa sociedad minera Trompetero LTDA no cumplió con los límites permisibles en los parámetros de concentración de sólidos suspendidos totales (SST), sólidos sedimentables (SSED) y concentración de hierro, descritos en la resolución 0631 del 17 de Marzo de 2015. Teniendo en cuenta que el problema inmediato a solucionar es mitigar el impacto ocasionado al cuerpo receptor y al mismo tiempo cumplir dicha resolución, el presente proyecto de grado implementará un proceso físico-químico en la optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales no domésticas de la planta de producción aurífera. La optimización se enfocará en el mejoramiento estructural de los tanques sedimentadores, y en la dosificación de reactivos químicos no contaminantes para dar el cumplimiento con la normatividad vigente. Ya optimizado el sistema de tratamiento de aguas residuales y luego de una análisis de aguas se observó el cumplimiento de los parámetros exigidos por la resolución 0631 del 17 de Marzo del 2015, dando como resultado la continuidad de operación de la empresa Trompetero LTDA.

6. SUMMARY

TITLE: OPTIMIZATION OF A WASTEWATER TREATMENT SYSTEM FOR THE WASTE OF THE AURÍFERO BENEFIT PLANT AT TROMPETEROS LTDA.

AUTHOR: Jhonny Omar Ayala Diaz

KEYWORDS

Optimization, Treatment system, Shedding, Regulations, Mitigation.

CONTENT:

The company Minera Trompetero LTDA located in the Municipality of Vetas of the Department of Santander, has the operation of extracting ore for its respective gold processing. After the ore is processed, the wastewater generated is treated by a treatment system and then discharged to the Jaimes creek. Initially the company Trompetero LTDA presented relevant difficulties in the environmental scope for such discharges. According to the results obtained in the characterization carried out in December 2016 for compliance with article 4, numeral 3 of resolution 001314 of December 22, 2015, by which the discharge permit is granted in the wastewater and receiving body treatment system, the company Trompetero LTDA mining company did not comply with the permissible limits in the parameters of concentration of total suspended solids (TSS), sediment solids (SSED) and iron concentration, described in resolution 0631 of March 17, 2015. Having in mind that the immediate problem to be solved is to mitigate the impact caused to the receiving body and at the same time comply with said resolution, the present project of degree will implement a physico-chemical process in the optimization of the treatment system of non-domestic wastewater of the plant of gold production. The optimization will focus on the structural improvement of the sedimentation tanks, and the dosing of non-polluting chemical reagents to comply with current regulations. Once the wastewater treatment system was optimized and after a water analysis, compliance with the parameters demanded by resolution 0631 of March 17, 2015 was observed, resulting in the continuity of operation of the company Trompetero LTDA.

7. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La minería aurífera genera un considerable impacto ambiental hídrico y biológico si no se aplican tecnologías limpias para mitigarlo. El vertimiento de aguas residuales no tratadas en una región a cuerpos de agua superficiales generalmente ríos y quebradas no solo genera un impacto ambiental considerable en la vida acuática (plantas y animales), también provoca daños en la salud pública de comunidades que entran en contacto con esas aguas contaminadas. El agua vertida saliente de la industria debe presentar un límite de parámetros que determinen su calidad y permiso de vertimiento para el cual no modifique el sistema de agua del cuerpo receptor.

Las aguas de vertimiento minero aurífero presentan parámetros contaminantes que alteran el recurso hídrico y la salud humana, por lo cual el estado colombiano por medio del Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible emite la resolución 0631 del 17 de Marzo del 2015 que restringe los límites máximos permisibles en parámetros de calidad del agua (Resolución 0631, 2105).

Durante un monitoreo ambiental realizado en Diciembre de 2016 por la CDMB, como autoridad ambiental responsable de hacer seguimiento y control a los vertimientos puntuales, la empresa Sociedad Minera Trompetero LTDA no cumplió con el marco normativo de la Resolución 0631 del 17 marzo del 2015, en los parámetros: Sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales y concentración de hierro, se observó que dicho parámetros están por encima del límite establecido por la norma citada.

Como solución inmediata se planea ejecutar un proyecto de mejoramiento el cual se pretende realizar la optimización del sistema de tratamiento de vertimientos existente en la planta de beneficio de la empresa, identificando el problema en cada subproceso y realizando las mejoras de tipo físico y químico a que haya lugar.

8. JUSTIFICACIÓN

El tratamiento de las aguas vertidas protege la salud pública y el medio ambiente, cuida a los organismos acuáticos y el entorno que limita las fuentes hídricas.

La sostenibilidad de la explotación minera no es un problema por agotamiento de recursos minerales, sino un problema social y ambiental. Un óptimo sistema de tratamiento de aguas de vertimiento en una mina aurífera ubicado en el municipio de Vetas Santander, genera confiabilidad frente a la población y a las entidades ambientales gubernamentales (CDMB). Esa optimización produce la disminución del impacto hídrico de la zona, recurso ambiental de mayor representación en la zona por la cercanía a la región del páramo.

La ejecución de este proyecto de investigación se realiza con el interés de contribuir al mejoramiento de la calidad del agua de vertimiento minimizando el impacto ambiental generado por la empresa Sociedad Minera Trompetero LTDA mediante la optimización de los procesos en el sistema de tratamiento de aguas residuales no domésticas (STARnD) dando el cumplimiento a la resolución 0631 del 17 de marzo del 2015. Es de prioridad que la empresa siga conservando la licencia ambiental expedida por el ANLA (autoridad Nacional de Licencias Ambientales), la cual puede ser suspendida si no cumple los controles ambientales, un control es el cumplimiento de la Resolución descrita anteriormente.

De igual forma el presente proyecto generará un valor agregado al cuidado ambiental, el cual consiste en la recirculación del agua residual tratada al proceso de producción de la planta, el cual generará una disminución en el volumen de captación de agua de quebradas cercanas por la empresa.

9. OBJETIVO GENERAL

Optimizar el sistema de tratamiento de aguas residuales no domésticas de la planta de beneficio aurífero en la empresa Sociedad Minera Trompetero LTDA.

10. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar las aguas residuales no domésticas de vertimiento generadas por la planta de beneficio aurífero.
- Implementar las mejoras físicas en el sistema de tratamiento de vertimientos de la empresa Sociedad Minera Trompetero en cuanto al diseño de los tanques sedimentadores.
- Seleccionar los reactivos químicos no contaminantes apropiados para las aguas de vertimiento de la empresa.
- Determinar la dosificación de los reactivos con el fin de aumentar el proceso de sedimentación en los vertimientos.
- Controlar todo el proceso de optimización para dar cumplimiento con los límites permisibles descritos en la resolución 0631 del 17 de Marzo del 2105 para vertimientos mineros en la explotación de oro y otros metales preciosos.

11. MARCO TEORICO

11.1. EL AGUA

El agua es el componente principal de la materia viva, constituye del 50 al 90% de la masa de todos los organismos vivos, es el precursor de la vida presente en la Tierra, ocupa tres cuartas partes de la superficie del planeta. Una de las propiedades más utilizables e impresionantes del agua es su capacidad para disolver sustancias, por esta razón es llamado el solvente universal y es debido a su polaridad la cual es tan fuerte que atrae otras moléculas de agua a través de puentes de hidrógeno (Fibras y Normas de Colombia, 2014)

El agua debe ser aceptada desde el punto de vista estético sin turbidez de color, con una temperatura razonable. Este recurso se ha tratado y utilizado como si fuese ilimitado; sin embargo, el incremento indiscriminado de su uso ha conllevado a un deterioro. La calidad del agua puede definirse como el conjunto de características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, sin existir la intervención o presencia humana. Los principales problemas que amenazan la calidad del agua obedecen al crecimiento poblacional y a las actividades económicas, lo que requiere monitoreo y control constante para disminuir sus impactos en los procesos naturales y sociales, especialmente en la salud humana (López, Figueroa & Corrales, 2015)

11.1.1. Factores contaminantes del agua

La contaminación del agua es la modificación de las condiciones de la misma causada por el ser humano, tornándola nociva para todo ser vivo. Existe un gran número de sustancias contaminantes del agua en el cual Izaguirre (2017) los clasificar en varios tipos:

- Microorganismos patógenos: corresponden a las bacterias, virus y otros organismos que transmiten enfermedades como el cólera, tifus en la vida humana.
- Desechos orgánicos: Son el conjunto de residuos orgánicos provenientes de los seres humanos y demás animales, estos materiales orgánicos son descompuestos por bacterias aeróbicas (procesos con oxígeno). Cuando los desechos superan el oxígeno causa la proliferación de bacterias produciendo la contaminación.

- Nutrientes vegetales inorgánicos (Nitratos y Fosfatos): Son beneficiosos para el reino vegetal en el agua, pero cuando están en mayor cantidad producen un incremento de algas y de más plantas que cuando se mueren su descomposición por bacterias, hace que el agua se quede sin oxígeno.
- Compuestos orgánicos: Corresponden a todos los compuestos que posean carbono como el petróleo, el plástico, detergentes etc. Estos compuestos presentan un proceso de descomposición demasiado lento, difícil degradarlos por el microorganismo, contaminando así las aguas.
- Sedimentos y materiales suspendidos: Corresponden a las partículas provenientes del suelo y arrastradas a las aguas, junto a otras partículas provenientes de los procesos industriales, son la mayor fuente de contaminación del agua (Muñoz, 2008).
- Contaminación térmica: El agua caliente liberada de centrales de energía o procesos industriales aumenta la temperatura hidrográfica, con lo que disminuye el oxígeno disuelto en el agua.

11.2. AGUA RESIDUAL

La calidad del agua se refiere a las condiciones en que se encuentra el agua respecto a características físicas, químicas y biológicas, en su estado natural o después de ser alteradas por el ser humano. El concepto de calidad del agua ha sido asociado al uso del agua para consumo humano, entendiéndose que el agua es de calidad cuando está exenta de sustancias y microorganismos que sean peligrosos para los consumidores, así como también esté exenta de sustancias que transmitan sensaciones sensoriales desagradables para el consumo como el color, olor, sabor o turbiedad. Las aguas residuales corresponden a las aguas que presentan variabilidad de composición respecto al sistema donde fueron captadas y que ha sido modificada por diversas actividades como: domésticas, industriales, agrícolas entre otras. Debido a la naturaleza de las aguas residuales no pueden ser reutilizadas o descargadas a cuerpos receptores sin un tratamiento previo ya que pueden alterar los ecosistemas terrestres, acuáticos y afectar la salud humana (Lenntech, 2006)

11.2.1. Parámetros relevantes en aguas residuales

Los análisis de aguas residuales son realizados para lograr un tratamiento y disposición final apropiada de las mismas, en ellos se determinan los parámetros físicos, químicos y microbiológicos. La interpretación de los resultados obtenidos evidencia la variabilidad en comparación al análisis del agua donde se realiza la captación para el proceso industrial.

En el proyecto de investigación realizado por Valencia (2013) describe y clasifica los parámetros que diferencian las aguas residuales con las aguas naturales

- Parámetros físicos: Corresponden a la temperatura, olor, color, turbiedad, sólidos sedimentables y sólidos suspendidos.
- Parámetros Químicos: Corresponden al potencial de hidrógeno (pH), nitrógeno, fósforo, azufre, aceites y grasas, metales pesados, detergentes y materia orgánica (Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno) (Muñoz, 2008).
- Parámetros Biológicos: Las aguas residuales contienen un gran número de microorganismos que ayudan a descomponer, transformar y fermentar la materia orgánica, pero también están presentes varios microorganismos patógenos como los coliformes E. coli.

12. CONTAMINACION DE AGUAS EN LA INDUSTRIA MINERA AURIFERA

La extracción de oro del mineral aurífero a nivel mundial se obtiene generalmente por medio del proceso de lixiviación, utilizando como reactivo principal el cianuro. El vertimiento de estas aguas residuales ocasiona variabilidad de pH en el agua y la aparición de diferentes contaminantes como el cianuro libre o asociado a otros elementos, los sólidos sedimentables y suspendidos totales, los metales siendo los más comunes Arsénico, Cobre, Plata, Hierro, Zinc, Cadmio y Plomo que deterioran la calidad del agua, limitando su uso y poniendo en riesgo la existencia de las especies. La presencia de sustancias químicas disueltas e insolubles en el agua pueden ser de origen natural o antropogénico (Barrenechea, 2010).

12.1.1. Cianuro

Los cianuros existen por síntesis artificial. Las principales formas de cianuro fabricados por el ser humano son el cianuro de hidrógeno que es un gas olor almendra, el cianuro de sodio y el cianuro de potasio. Dichos compuestos en todas sus formas son catalogados como altamente tóxicos, es utilizado en diferentes industrias de plásticos y en gran proporción en la industria minera aurífera. En la extracción de oro de minerales auríferos el cianuro durante el proceso forma compuestos cianurados con la mayoría de los metales como el oro, el cobre, el zinc, el hierro, etc., los cuales son muy solubles en agua y de estabilidad variable (Vallejo 2014).

En el documento realizado por la OCMAL, (2010) clasifica los principales tipos de cianuro que se encuentran y se forman durante la lixiviación con cianuro, del mineral aurífero.

- Cianuro libre: Se le denomina al cianuro de hidrogeno en forma gaseosa o disuelta en agua en forma de anión cianuro (CN⁻). Esta forma de cianuro es altamente toxica al inhalar el gas o al tener contacto con él ya que la piel lo absorbe rápidamente. En dosis altas el cianuro impide la respiración de las células.
- Complejos metal-cianuro: Como se había descrito anteriormente el cianuro forma fácilmente complejos con la mayoría de los metales presente en los minerales auríferos como el hierro, cobre, zinc, arsénico, cadmio etc. Los complejos metal-cianuro son considerados menos tóxicos que el cianuro libre.
- Complejos fuertes y complejos débiles: Estos complejos se clasifican según la fuerza de los enlaces que unen el cianuro y el metal. En condiciones de temperatura y acidez normal los complejos débiles se disocian y los complejos fuertes no. Esta característica de disociación es la que determina el grado de contaminación, en el momento que los complejos débiles se disocian liberan el cianuro que cargan, esto quiere decir que los complejos fuertes son los menos contaminantes ya que su gran estabilidad los mantiene unidos un ejemplo es el cianuro de hierro (Aguilar, 2001)

12.1.2. Metales

La toxicidad de los metales es la más antigua conocida por el ser humano. El contacto humano con compuestos metálicos se produce a través del agua y los alimentos, normalmente en bajas dosis, pero por las actividades mineras aumenta su concentración en el organismo. Esta contaminación afecta los sistemas gastrointestinales, neurológico central y periférico, hemático, renal y algunos pueden ser cancerígenos (Ferrer, 2003)

Los metales se encuentran en agua naturales en concentraciones muy bajas (microgramos/litro) lo que se denomina trazas, son introducidos por procesos naturales como las erupciones volcánicas y la degradación de rocas y minerales. En la actualidad el aumento de las concentraciones de diferentes metales en aguas es causado por la influencia humana en procesos de extracción mineralógica, este incremento provoca considerables efectos tóxicos tanto para el ecosistema acuático como para la especie humanas. Los metales de máxima prioridad debido a su toxicidad y que pueden encontrarse en minas auríferas son: mercurio, plomo, arsénico, cadmio, cobre y zinc. En los sistemas acuáticos los metales tóxicos se depositan por descargas de aguas residuales industriales, filtración de minas y rellenos, lavados de suelos y lixiviación. La problemática de los metales se encuentra en su bioacumulación en el medio donde están siendo depositados, provocando que los organismos superiores presenten concentraciones elevadas, estos metales se establecen con material de la membrana

celular dificultando así el transporte a través de las paredes celulares (Benavides & Benavides, 2005).

12.1.3. Sólidos sedimentables y suspendidos totales

El agua residual proveniente de la industria minera contiene distintos tipos de materiales sólidos de diferentes tamaños de partícula, se encuentran los materiales gruesos que son removidos fácilmente por decantación y los materiales coloidales o sea en suspensión que son de difícil remoción. El proyecto de investigación de Macloni, (2014) clasifica los sólidos presentes en las aguas residuales mineras y como pueden ser analizados.

- Sólidos totales (ST): Son los sólidos presentes después de que la muestra ha sido evaporada y secada a una temperatura específica (103°C a 150°C).
- Sólidos suspendidos totales (SST): Son una fracción de los sólidos totales retenidos en un filtro con una malla específica después de haberse secado la muestra a temperatura específica (Muñoz, 2008).
- Sólidos disueltos totales (SDT): Son los sólidos que pasan a través del filtro, los cuales son evaporados y secados a una temperatura específica, la medida comprende coloides y SD.
- Sólidos sedimentables (SD): Son los sólidos suspendidos que se expresan como mm/L, los cuales se sedimentan fuera de la suspensión dentro de un rango de tiempo específico.

El efecto principal de los sólidos suspendidos en el agua es la alteración del caudal y el aumento de la turbidez la cual es una medida de las propiedades de la dispersión de la luz en el agua. La medición se realiza por comparación entre la intensidad de luz dispersa en una muestra y la luz dispersa por suspensión de contraste en las mismas condiciones. El material suspendido impide el paso de luz, ya que lo absorbe o lo dispersa, la turbidez está directamente relacionada al tamaño de partícula, donde la mayor concentración esta referenciada a tamaños inferiores a 3 micrómetros entre 0,17 y 1,0 micrómetros Los sólidos en suspensión son los que tienen partículas superiores a un micrómetro y que son retenidos mediante una filtración en el análisis de laboratorio (Barrenechea, 2010).

12.1.4. PH

Un agua es ácida cuando su $\text{pH} < 7$. Sin embargo, no deja de ser apropiada para los seres vivos, es nociva hasta alcanzar valores inferiores a $\text{pH} < 5,5$ ó $\text{pH} > 9$. Naturalmente el agua tiene un $\text{pH} = 7$ (neutra), por causas antrópicas presenta variabilidad en el valor. Si dicho pH del agua residual no es ajustado antes de ser vertido nuevamente al cuerpo de agua, el pH de este cuerpo receptor será alterado, de allí la necesidad del tratamiento previo de las aguas de vertimiento que deben ser descargados acorde a los límites establecidos para la no alteración del ecosistema viviente en el agua. El grado de disociación de ácidos y bases es afectado por cambios de pH , este efecto es importante debido a que la toxicidad de muchos compuestos es afectada por el grado de disociación. Valores extremos de pH , pueden originar la muerte de peces, alteraciones de flora y fauna, reacciones secundarias dañinas como por ejemplo cambios en la solubilidad de los nutrientes y formación de precipitados. El valor del pH también debe ser tenido en cuenta en el suministro de aguas con respecto a la coagulación química, la desinfección, el ablandamiento y el control de corrosión o de incrustación. (Ministerio de Medio Ambiente et al., 2015).

En la explotación minera la solubilidad de rocas y minerales afecta fuertemente el pH del medio, de forma que, un agua ácida suele ser nociva por su pH y también por ir acompañada de numerosos metales en disolución ya que la acidez del medio diluye los metales presentes en los minerales, aportando toxicidad al efluente. Las aguas ácidas se forman por la oxidación de la pirita u otros sulfuros (minerales auríferos) en presencia de humedad a condiciones atmosféricas (Baquero, Fernández, Verdejo & Lorca, 2008).

En el artículo de Baquero, Fernández, Verdejo y Lorca (2008) presenta las consecuencias de la acidez con el descenso del pH del agua:

- El agua se hace fuertemente corrosiva
- La solubilidad de muchos metales pesados aumenta
- El ecosistema fluvial se degrada, hasta ser incapaz de albergar vida acuática
- Los sistemas acuíferos se contaminan

13. MARCO AMBIENTAL PARA VERTIMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES EN COLOMBIA

A pesar de los beneficios económicos que genera la minería aurífera como la generación de empleos directos e indirectos que convierten a esta actividad una fuente de ingresos de la región donde se lleva a cabo, también se ve reflejada el deterioro de los ecosistemas en la calidad de los recursos y afectación a su fauna y flora como en las poblaciones humanas. Por estas razones en la mayor parte del planeta existen normas ambientales que ayudan a mitigar el impacto ambiental frente a las actividades humanas.

La normatividad en Colombia, está estructurada para señalar las medidas de prevención y control de los factores de deterioro ambiental, según los estándares definidos por el Estado en cabeza del Ministerio del medio Ambiente como prevención de las afectaciones considerables al medio ambiente y a los recursos naturales renovables. En razón a la legislación colombiana, un proyecto minero en el momento que obtenga el contrato de concesión y la licencia ambiental, está obligado al cumplimiento de las normas ambientales mínimas establecidas por los organismos de control y sería sujeto de responsabilidad por daño ambiental en caso de incumplimiento. El titular de la licencia ambiental es responsable de las obligaciones y de las sanciones que puedan imponerse en virtud de su incumplimiento, también lo sería si produce un daño ambiental o hace un uso inadecuado de los recursos naturales renovables y no renovables (González, 2008).

El primero de enero de 2016 entró en vigencia la Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015 como nueva norma de vertimiento nacional, expedida por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, por la cual se establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público a nivel de nacional, derrocando al Decreto 1594 de 1984, excepto en los artículos 20 y 21 del reglamentando, el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 (Norma Colombiana de vertimientos – Resolución 631 de 2015, 2015).

13.1. Resolución 0631 de 2015

Esta nueva norma está enfocada a la reducción y control de descarga de sustancias contaminantes que se realizan en cuerpos de aguas superficiales o al alcantarillado público, mediante límites máximos permisibles de 56 parámetros que definen las características de los diferentes tipos de vertimientos según la actividad desarrollada. Se agrupa en 8 sectores económicos: alcantarillado, agroindustria y ganadería, minería, hidrocarburos, elaboración de productos alimenticios y bebidas, fabricación y manufactura de bienes, servicios y otras actividades (Norma Colombiana de vertimientos – Resolución 631 de 2015, 2015).

Los cambios que presenta la resolución 0631 frente al Decreto 1594 de 1984, los cuales principalmente consisten en (MINAMBIENTE, 2015).

- Aplica para vertimientos realizados a cuerpos de agua superficiales y a alcantarillado público, no incluye a cuerpos de agua marinos o al suelo que se encuentre asociado a un acuífero.
- Es de obligatorio cumplimiento para los usuarios que desarrollen actividades que generan aguas residuales, sin diferenciar entre usuarios nuevos o existentes.

- Presenta los límites máximos permitidos de las sustancias contaminantes, haciendo distinción entre Aguas Residuales Domesticas (ARD) y Aguas Residuales no Domésticas (ARnD)
- Establece el límite máximo permitido a partir de la concentración de cada sustancia contaminante (mg/L) y no a través del porcentaje de remoción de carga contaminante (kg/día) de los sistemas de tratamiento de agua.
- Se incorpora la condición del cuerpo de agua receptor, principalmente a través de su cambio de temperatura y la temperatura máxima permitida del vertimiento, definiendo la zona de mezcla térmica, la diferencia de temperatura debe ser < 5°C.
- El rango de pH en cuerpos de agua debe estar entre pH 6 – 9 y en el alcantarillado público de pH 5 – 9
- Se analizan como características de calidad del agua 56 parámetros fisicoquímicos, metales y metaloides, iones, compuestos de nitrógeno y fósforo, hidrocarburos, plaguicidas, microbiológicos.

13.1.1. Resolución 0631 de 2015 para los vertimientos de aguas residuales de la actividad minera aurífera

La resolución 0631 del 17 de Marzo de 2015 establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. En el cual resuelve en el artículo 10 del capítulo VI los parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades de minería aurífera. En la Tabla 1 a seguir muestra los parámetros con sus límites máximos permisibles enfocados a la minería aurífera (Resolución 0631, 2015).

Tabla 1. Parámetros y límites máximos permisibles para el vertimiento de aguas residuales en la actividad minera aurífera (Resolución 0631, 2015)

| Parámetro | Unidades | Extracción de oro y otros metales preciosos |
|-------------------------------------|---------------------|---|
| Generales | | |
| pH | Unidades pH | 6,00 a 9,00 |
| Demanda Química de Oxígeno (DBQ) | mg/L O ₂ | 15,0 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) | mg/L O ₂ | 50,0 |
| Sólidos Suspendidos Totales (SST) | mg/L | 50,0 |

| | | |
|--|------------------------|--------------------|
| Sólidos Sedimentables (SSED) | mg/L | 2,0 |
| Grasas y Aceites | mg/L | 10,0 |
| Fenoles | mg/L | 0,20 |
| Sustancias Activas de Azul de Metileno | mg/L | Análisis y Reporte |
| Hidrocarburos Totales (http) | mg/L | 10,0 |
| Compuestos de Fósforo | | |
| Orto fosfatos (P-PO ₄ ³⁻) | mg/L | Análisis y Reporte |
| Fósforo Total (P) | mg/L | Análisis y Reporte |
| Compuestos de Nitrógeno | | |
| Nitratos (N-NO ₃ ⁻) | mg/L | Análisis y Reporte |
| Nitritos (N-NO ₂ ⁻) | mg/L | Análisis y Reporte |
| Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃) | mg/L | Análisis y Reporte |
| Nitrógeno Total (N) | mg/L | Análisis y Reporte |
| Iones | | |
| Cianuro Total (CN ⁻) | mg/L | 1,00 |
| Cloruros (Cl ⁻) | mg/L | 250,00 |
| Sulfatos (SO ₄ ²⁻) | mg/L | 1200,00 |
| Sulfuros (S ²⁻) | mg/L | 1,00 |
| Metales y Metaloides | | |
| Arsénico (As) | mg/L | 0,10 |
| Cadmio (Cd) | mg/L | 0,05 |
| Zinc (Zn) | mg/L | 3,00 |
| Cobre (Cu) | mg/L | 1,00 |
| Cromo (Cr) | mg/L | 0,50 |
| Hierro (Fe) | mg/L | 2,00 |
| Mercurio (Hg) | mg/L | 0,002 |
| Níquel (Ni) | mg/L | 0,50 |
| Plata (Ag) | mg/L | 0,50 |
| Plomo (Pb) | mg/L | 0,20 |
| Otros parámetros para análisis y reporte | | |
| Acidez Total | mg/L CaCO ₃ | Análisis y Reporte |
| Alcalinidad Total | mg/L CaCO ₃ | Análisis y Reporte |
| Dureza Cálcica | mg/L CaCO ₃ | Análisis y Reporte |
| Dureza Total | mg/L CaCO ₃ | Análisis y Reporte |
| Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm) | m ⁻¹ | Análisis y Reporte |

13.2. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de un efluente (agua residual, doméstica o industrial) se realiza con el fin de cumplir con las condiciones mínimas exigidas por normatividad ambiental para su

descarga a cuerpos superficiales. El sistema de tratamiento es un proceso que incorpora procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales tratan y remueven contaminantes físicos, químicos y biológicos del agua residual del uso humano. El objetivo del tratamiento es producir agua limpia o reutilizable en el ambiente (Vallejo, 2014).

Existen 3 métodos de tratamiento en los que se encuentra las operaciones físicas en los que predomina la acción de fuerzas físicas que permiten la remoción de la materia en suspensión presente en el agua a tratar, también se encuentra los procesos químicos en los que permiten remover la materia disuelta aplicando productos químicos que provocan alteraciones en la materia contenida en el agua y por último están los procesos biológicos que constituyen una serie de importantes procesos de tratamiento que tienen en común la utilización de microorganismos (especialmente bacterias) para llevar a cabo la eliminación de contaminantes del agua aprovechando la actividad metabólica de los mismos, comúnmente más utilizados para el tratamiento de aguas residuales urbanas (Valencia, 2013).

13.2.1. Tratamiento para la eliminación de la materia en suspensión

La materia en suspensión puede ser de diferentes tamaños, de varios centímetros y muy densas (normalmente inorgánicas), hasta suspensiones coloidales muy estables y con tamaños de partículas de mm (normalmente de naturaleza orgánica). También la concentración de los mismos es primordial a la hora de la elección del tratamiento más conveniente. Las operaciones para eliminar este tipo de contaminación de aguas son las primeras en efectuarse, dado que se facilita la remoción y es indispensable para los procesos siguientes del tratamiento. Esta eliminación comúnmente se realiza mediante procesos físicos donde intervienen operaciones mecánicas y el aprovechamiento de la gravedad. No obstante, en muchos casos favorece la separación en menor tiempo la utilización de productos químicos, denominándose en este caso tratamientos físico-químicos (Gomez, 2005).

A seguir se describen las operaciones unitarias más habituales. La selección de un proceso depende de las características de las partículas en cuanto a tamaño, densidad, y forma. También de la concentración de las mismas.

13.2.2. Cribado

Es una operación en la que se trata de eliminar sólidos de mayor tamaño, para ello se instalan rejillas o rejillas de barras metálicas paralelas e igualmente espaciadas. Pueden ser de limpieza manual (gruesas) o de limpieza mecánica (finas). El objetivo es eliminarlos y evitar que obstruyan o perjudiquen los equipos posteriores en el sistema de tratamiento (Lizarazo & Orjuela, 2013).

13.2.3. Sedimentación o decantación

Es un proceso físico donde se aprovecha la fuerza de gravedad que tiene una partícula densa donde hay una trayectoria descendente depositándose en el fondo del sedimentador. Esta operación es más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua y también mayor el tiempo de residencia, es decir mayor sea su velocidad de sedimentación, siendo el principal parámetro para el diseño de tanques sedimentadores. Generalmente en aguas industriales no existen partículas de gran tamaño o densas, lo habitual son sólidos poco densos, por lo que es necesario para aumentar la eficiencia del proceso de sedimentación la aplicación previa de productos químicos como el coagulante y el floculante. Los equipos de sedimentación pueden ser de forma variable en función de las características de las partículas a sedimentar (tamaño, forma, densidad, concentración). En el documento escrito por Rodríguez et al., (2006) describe algunas formas de estos tanques sedimentadores.

- **Sedimentadores rectangulares:** Los sedimentadores rectangulares son los más apropiados para partículas densas como las arenas, la velocidad de desplazamiento del agua es horizontal. Este tipo de sedimentación se denomina discreta ya que las partículas no varían sus propiedades físicas en su desplazamiento descendente hasta el fondo del sedimentador. Generalmente son equipos profundos.
- **Sedimentadores circulares:** El flujo del agua en estos sedimentadores es radial desde el centro al exterior, por lo que la velocidad de desplazamiento del agua disminuye al alejarse del centro del sedimentador. Esta forma del sedimentador es apropiado cuando el proceso va acompañado de un floculante de partículas, en las que el tamaño del floculo aumenta al descender la partícula y por lo tanto aumenta su velocidad de sedimentación (Muñoz, 2008).
- **Sedimentadores Tubulares:** Son sedimentadores de alternativa a los sedimentadores poco profundos. Consisten en tanques de poca profundidad que contienen paquetes de tubos inclinados respecto a la base y por cuyo interior se hace fluir el agua de manera ascendente. En la superficie inferior se van acumulando las partículas, desplazándose de forma descendente y depositándose en el fondo del sedimentador.
- **Sedimentadores de placas paralelas:** Son sedimentadores que tienen como objetivo aumentar el tiempo de residencia con el fin de que las partículas que tengan una velocidad descendente menor tengan mayor tiempo para depositarse en el fondo del sedimentador. Estos sedimentadores consisten en tanques de poca profundidad subdivididas en placas paralelas igualmente distanciados formando un flujo horizontal de movimiento de zigzag, mientras el flujo realiza las

curvas para salir del sedimentador el tiempo de residencia aumenta si solo fuera un movimiento horizontal (Montoya, 2013).

13.2.4. Filtración

Esta tecnología se utiliza para remover sólidos suspendidos que no se han eliminado en la sedimentación, es una operación en la se hace pasar el agua a través de un medio poroso con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El lecho poroso consiste en un lecho de arena de altura variable, dispuesta en distintas capas de distinto tamaño de partícula siendo la superior la más pequeña. En la industria como medio filtrante se utiliza la tierra Diatomeas (Pérez & Rincón, 2016)

Según Rodríguez et. al., (2006) existen Diversas maneras de clasificar los sistemas de filtración, as seguir se describe las de mayor uso.

- **Filtración por gravedad:** El flujo del agua residual circula verticalmente en descenso a través de filtro por gravedad. Su operación puede llevarse a cabo de forma lenta o rápida. El mecanismo de separación es una combinación de factores por lo que se elimina partículas mucho menores que el espacio intersticial del lecho. Es un proceso muy utilizado en sistemas de tratamiento para agua potable
- **Filtración por presión:** El lecho filtrante durante este proceso está contenido en recipientes y el agua residual es forzada a atravesar el medio filtrante sometido a presión. La superficie del filtro se desarrolla una torta filtrante donde la filtración, a través de la superficie es por mecanismos físicos y biológicos. Esta filtración a presión es muy utilizada para aguas industriales.

13.2.5. Flotación

El proceso de flotación es utilizado para la separación de partículas sólidas o líquidas en un medio líquido. En el tratamiento de aguas residuales se utiliza para remover aceites y grasas, partículas que tienen una densidad inferior o muy parecida al agua. La separación se consigue introduciendo burbujas muy finas de aire en la masa líquida para que arrastren las partículas suspendidas hacia la superficie de donde son arrastradas y sacadas del sistema. (Lizarazo & Orjuela, 2013).

El tratamiento de aguas por flotación utiliza el aire en función de su introducción en el líquido, se tiene dos sistemas de flotación (Rodríguez et al., 2006):

- **Flotación por aire disuelto:** En este sistema, el aire se introduce en el agua bajo una presión de varias atmosferas con una bomba de presurización, por lo que el aire disuelto se libera, formando un gran número de micro burbujas de aire.
- **Flotación por aire inducido:** El funcionamiento es similar a la flotación por aire disuelto, pero la generación de burbujas se realiza a través de difusores de aire situados en la parte inferior del equipo de flotación o inducida por rotores, en este caso el tamaño de burbuja es mayor que en el inyectado por aire disuelto (Cataldo, 2008)

13.3. Coagulación-Floculación

Generalmente en aguas residuales industriales son consideradas dispersiones debido a la gran cantidad de impurezas que contienen en su seno. Estas impurezas varían de tamaño en un rango que oscila entre unos 10^{-8} cm para sustancias solubles y 10^{-2} cm para la materia en suspensión lo que conforma una suspensión coloidal. Estas suspensiones coloidales son muy estables debido a interacciones eléctricas entre las partículas. Por tanto tienen una velocidad de sedimentación muy lenta. Una forma de mejorar la eficacia de los sistemas de remoción de materia en suspensión es la adición de reactivos químicos que desestabilicen la materia coloidal (coagulación) y luego favorecer la floculación de las mismas para obtener partículas fácilmente sedimentables (Gomez, 2005).

La coagulación-floculación es un proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua llamadas flóculos, los cuales son más fácilmente decantables con el fin de obtener una separación satisfactoria por sedimentación. La diferencia entre coagulación y floculación radica en que la coagulación desestabiliza las suspensiones por superación de las fuerzas que mantienen su estabilidad y que la floculación une las partículas desestabilizadas para formar grandes partículas estables o aglomeradas, por esta razón es más eficaz el sistema cuando ambos procesos se efectúan en el sistema de tratamiento de aguas residuales. El tratamiento presenta grandes ventajas: una menor sensibilidad a las variaciones de caudal y de composición; gran flexibilidad en el diseño de la planta de tratamiento y adaptación según las características del vertido ya que puede ser aplicado a diversos efluentes (Otero, 2007). El proceso de coagulación-floculación se usa para:

- Eliminar la turbidez orgánica o inorgánica que no se pueda sedimentar rápidamente.
- Eliminar de color verdadero y aparente.
- Eliminar las bacterias, virus y organismos patógenos.
- Eliminar precipitados químicos suspendidos, sustancias que le dan sabor y olor.

En la selección de tratamiento químico de aguas residuales, para lograr una coagulación y floculación efectiva es fundamental una comprensión de cómo los coloides interactúan individualmente. El proceso de coagulación requiere de un mezclado rápido, mientras que la floculación requiere mezclado lento. El mezclado instantáneo es crítico para bajar la carga superficial de las partículas coloidales. El comportamiento de los coloides en el agua es fuertemente influenciado por su carga electrocinética, donde cada partícula coloidal lleva una carga propia, la cual en su naturaleza es usualmente negativa. Los polímeros que son cadenas largas de alto peso molecular y alta carga, cuando se añaden al agua comienzan a hacer largas cadenas, lo que permite remover las partículas de materia suspendida (Díaz et al., 2017).

Los coagulantes suelen ser productos químicos que en solución aportan carga eléctrica contraria a la del coloide. Generalmente se utilizan sales con cationes de alta relación carga/masa (Fe^{3+} , Al^{3+}) junto con polielectrolitos orgánicos, cuyo objetivo favorecen a la floculación (Rodríguez et al., 2006):

- **Sales simples de Aluminio y Hierro:** Se distinguen el sulfato férrico, cloruro férrico, sulfato de aluminio hidratado, sulfato ferroso. Se pueden utilizar en estado sólido como en disoluciones.
- **Sales polimerizadas de Aluminio:** Suele ser el policloruro de aluminio (PAC). La utilización de PAC representa las siguientes ventajas (Otero, 2007):
 - Su hidrólisis proporcionara nuevas especies insolubles que intervendrán en el proceso de coagulación.
 - Las especies son relativamente estables una vez formadas.
 - Reduce el consumo de agentes para ajuste del pH.
 - Presenta un buen comportamiento a bajas temperaturas.
 - Buena velocidad de decantación. Se obtienen flóculos compactos y fácilmente sedimentables.
 - No se presenta turbidez residual al sobrepasar la dosis óptima cuando la calidad del agua lo requiera.

Una comparación entre los tipos de coagulante las sales de aluminio y de hierro descritas anteriormente están presentados en la Tabla 2 (Rinne, 2001).

Tabla 2. Comparación entre los tipos de coagulante (Rinne, 2001)

| Policloruro de aluminio | Sulfato férrico |
|--|--|
| Normalmente no requiere un ajuste de pH, el rango de operación es amplio | Un rango de operación de pH 3,5 – 7,0, en la remoción de sustancias orgánicas. |

| | |
|--|--|
| para la remoción de hierro y sustancias orgánicas | Una rango de operación de pH 8,0 – 9,5 para la remoción de Hierro y Manganeseo |
| Aluminio residual bajo | La dosis de Hierro es mayor |
| Manejo fácil del producto sólido | Muy corrosivo para manejar y almacenar |
| Alta velocidad de reacción | Alta velocidad de reacción |
| Un pH demasiado alto puede bajar la remoción de sustancia orgánica | Problemas en el proceso pueden causar color y precipitación en el agua tratada |

Los floculantes pueden ser inorgánicos y orgánicos. Los floculantes inorgánicos (electrolitos) son sales solubles en agua, siendo las más utilizadas las sales de hierro, aluminio y sílice. Los floculantes orgánicos pueden ser naturales (polisacáridos) y sintéticos (polímeros), los floculantes orgánicos sintéticos, son muy utilizados en la industria química, son eficaces a bajas concentraciones y se encuentran como un producto iónico, catiónico y aniónico de diferentes pesos moleculares, distinta densidad e independiente del pH. Según Díaz, (2014) los floculantes más representativos son:

- Floculantes minerales: Se encuentra la sílice activada, su preparación es delicada ya que presenta el riesgo de gelatinización
- Floculante orgánicos naturales: Son polímeros extraídos de sustancias animales y vegetales, entre ellos los almidones extraído de los tubérculos.
- Floculantes orgánicos de síntesis: Son biodegradables y no tóxicos, los más utilizados son macromoléculas de una gran cadena, obtenidos por asociación de monómeros sintéticos con masa molecular elevada de 106 a 107 g/mol. La Tabla 3 a seguir compara algunas características relevantes entre los polímeros sintéticos según su ionidad.

Tabla 3. Diferencias entre polímeros sintéticos según su ionidad (Otero, 2007).

| Polímero | Carga | Producto | Condiciones de Operación |
|-----------|--------|--|--------------------------|
| Aniónico | - | Copolímeros de la acrilamida y del ácido acrílico | pH 6,00 a 10,00 |
| Catiónico | + | Copolímeros de acrilamidas + un monómero catiónico | pH 4,00 a 8,00 |
| Iónico | Neutro | Poliacrilamidas | pH 6,00 a 10,00 |

Los floculantes sintéticos comparados con los naturales, ofrecen la ventaja de tener una mayor pureza, mayor estabilidad de su calidad y una mayor eficacia, ya que al ser los pesos moleculares de los sintéticos más elevados se obtienen un grado de floculación más alto que los naturales. También tienen la ventaja de que no afectan al pH de agua tratada, mejoran la floculación en temperaturas bajas, aumentan la sedimentación, mejoran la calidad del efluente, sin embargo su acción principal es favorecer la

aproximación y aglutinación de los flocúlos formados por el coagulante consiguiendo un aumento considerable en el tamaño de los mismos (Otero, 2007)

13.4. Pruebas de Jarras

La coagulación-floculación química y la dosificación apropiada de los reactivos seleccionados deben ser determinadas por simulación de la clarificación de una muestra de agua residual en un laboratorio a escala. La prueba de Jarras simula la química de la clarificación y la operación del proceso. Consiste en un arreglo simple de vasos precipitados y agitadores que permite comparar diversas combinaciones químicas, las cuales todas están sujetas a las mismas condiciones de operación. Esta prueba tiene como fin el de determinar la concentración óptima del coagulante y dado el caso del floculante necesario para obtener un floc de las mejores características (Restrepo, 2009)

13.5. Tratamiento para la eliminación de la materia disuelta

La materia disuelta en aguas residuales tienen características desde grandes cantidades de sales disueltas (salmueras), orgánicas (pesticidas), cantidades inorgánicas (metales pesados), estos tipos de contaminantes son de carácter peligroso por eso es necesaria su eliminación (Rodríguez et al., 2006). Algunos de los procesos que son utilizados para la remoción de materia disuelta en aguas residuales están descritas a seguir:

13.5.1. Precipitación

Consiste en la eliminación de una sustancia disuelta por adición de un reactivo donde forme un compuesto insoluble con el contaminante, facilitando su remoción por los métodos de remoción de materia suspendida. Un reactivo muy frecuente es el uso de Ca^{+2} en diversas industrias, dada la gran cantidad de sales insolubles que forma, además tiene propiedades de coagulante (Gomez, 2005).

13.5.2. Procesos electroquímicos

Está basado en la utilización de técnicas electroquímicas, donde pasa una corriente eléctrica a través del agua (donde contiene un electrolito), provocando así reacciones de óxido-reducción tanto en el cátodo como en el ánodo (Gil, 2012). La gran desventaja de este proceso es el costo de la energía eléctrica como descontaminador.

13.5.3. Intercambio iónico

Operación donde se utiliza un material generalmente denominado resina de intercambio iónico, donde opera con la facilidad de retener selectivamente sobre su superficie los iones disueltos en el agua, los mantiene temporalmente unidos a la superficie y los cede frente a una disolución con un fuerte regenerante. (Gil, 2012)

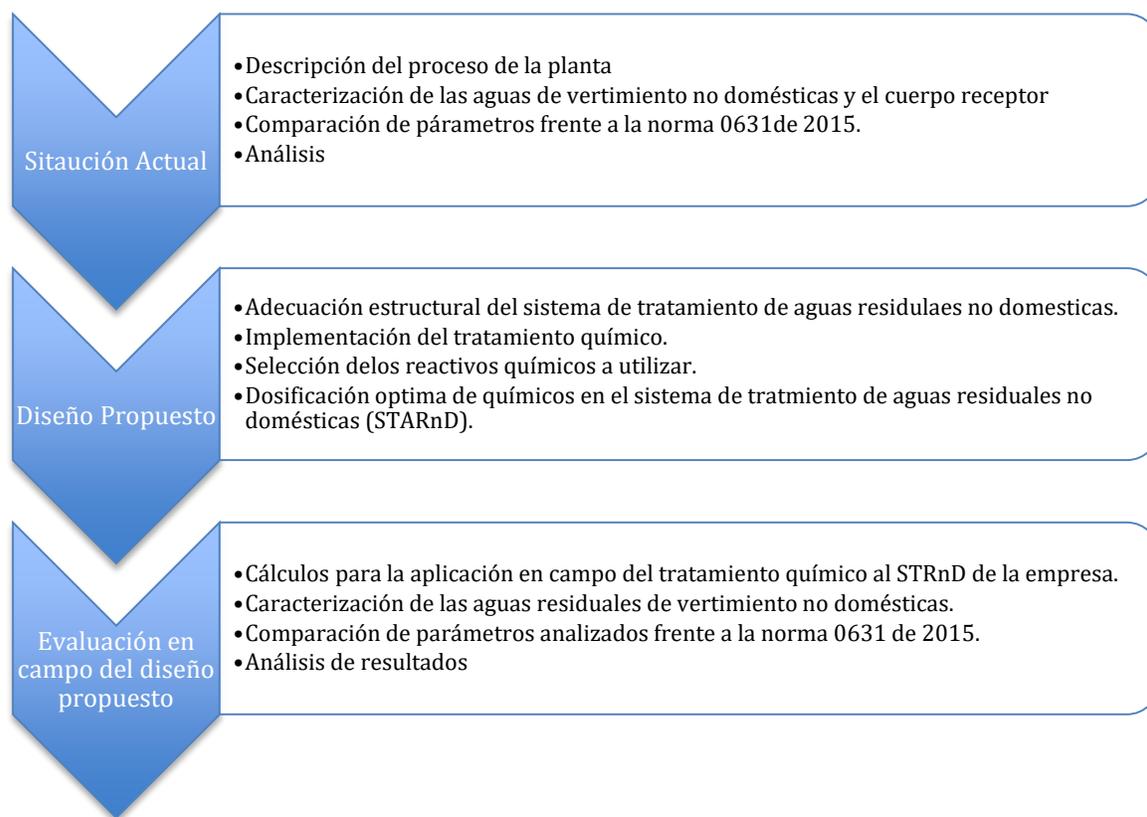
13.5.4. Tratamientos biológicos

Son procesos de tratamiento que se caracterizan en el uso de microorganismos (generalmente bacterias) para la eliminación de contaminantes en el agua residual aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes. La aplicación consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como de compuestos que contienen elemento nutrientes (N y P). Es uno de los tratamientos más habituales, en aguas residuales urbanas (Montoya, 2013).

14. METODOS Y MATERIALES

La metodología desarrollada para la optimización del sistema de tratamiento de aguas de vertimiento no domésticas (STARnD) de la empresa Sociedad Minera Trompetero LTDA en comparación a los límites máximos establecidos por la Resolución 0631 de 2015 consiste en 3 etapas cuya secuencia se muestra en la Figura 1.

Ilustración 1. Etapas de Desarrollo del Proyecto (Ayala, 2018)

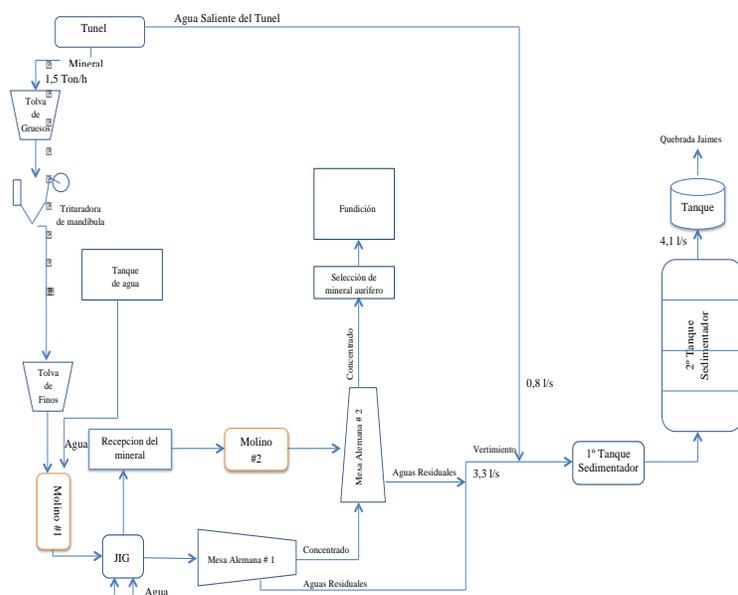


14.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La empresa sociedad minera Trompetero LTDA se encuentra ubicada en el municipio de vetas del departamento de Santander, tiene como operación extraer mineral por galerías para su respectivo procesamiento aurífero. Luego de que el mineral es extraído ingresa a la planta de producción donde por medio de procesos gravimétricos donde intervienen los equipos la JIG (lecho fluidizado utilizado para concentrar mineral) y la mesa Alemana (concentradora de mineral) se obtiene en mineral de interés (oro y plata).

El procesamiento del mineral aurífero de la empresa Trompetero LTDA. Genera dos efluentes, el primero perteneciente al Túnel donde es extraído el mineral aurífero y el segundo es generado en la planta de producción. Estos dos efluentes son unidos antes de entrar al sistema de tratamiento de aguas residuales no domésticas donde tiene como fin mitigar la contaminación causada por el proceso para así poder ser vertida a la quebrada Jaimes. El proceso completo se describe en la Figura 2 a seguir:

Ilustración 2. DIAGRAMA DEL PROCESO DE LA EMPRESA TROMPETERO LTDA
(Ayala, 2018)



15. CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS (STAR_nD) DE LA EMPRESA TROMPETERO LTDA

La caracterización de los vertimientos líquidos del sistema de tratamiento de aguas residuales y el cuerpo receptor de la Sociedad Minera Trompetero LTDA fue realizada en un monitoreo continuo, los puntos donde se tomaron las muestras y el análisis de parámetros in situ (temperatura ambiente, temperatura del agua, pH y sólidos sedimentables) fueron:

- Entrada y salida de la planta de tratamiento de aguas residuales.
- Aguas arriba y aguas abajo del punto de vertimiento en la quebrada Jaimes (cuerpo receptor).

15.1. Descripción del muestreo

El muestreo fue realizado el día 13 de Diciembre del 2016, se tomaron muestras para composición cada hora, durante 8 horas, a la entrada y salida de la planta de tratamiento de aguas residuales no domésticas de la empresa Trompetero LTDA. El muestreo inicio a las 9:00 horas y finalizó a las 17:00 horas, momento en el cual se realizó la composición

de las muestras tomadas, para obtener una muestra compuesta por cada punto monitoreado (dos muestras compuestas). Adicionalmente se efectuó toma de muestra 100 metros aguas arriba y 100 metros aguas abajo del punto de vertimiento.

El muestreo se llevó a cabo, teniendo en cuenta el manual de toma y preservación de muestras del IDEAM y los lineamientos de la norma NTC-ISO/IEC 17025. El análisis de las muestras tomadas para los diferentes parámetros contemplados en la resolución 0631 de 2015 fueron realizados por el laboratorio ECOSAM S.A.S., acreditado por el Instituto de Hidrologías y Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

Para la toma de muestras puntuales se utilizaron recipientes plásticos de un litro, identificados con etiquetas de acuerdo al punto y a la hora de toma de las muestras. Las muestras fueron preservadas mediante refrigeración en neveras de icopor y mediante el uso de reactivos, de acuerdo a los requerimientos de cada parámetro, siguiendo las directrices del Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater.

En los análisis de grasas y aceites, se tomaron muestras simples en frascos de vidrio de 500 ml boca ancha a las 15:00 horas, se preservaron con ácido clorhídrico (HCl) al 37% y se refrigeraron en neveras de icopor.

Los recipientes usados para la toma de muestras fueron purgados 3 veces antes de realizar la respectiva toma. Con el fin de asegurar una correcta preservación de las muestras, se realizó el control de pH con un sensor de pH (pH-metro), adición de reactivos y refrigeración. La temperatura ambiental y la del agua se realizaron con un sensor electrónico de temperatura.

En la planta de tratamiento de aguas residuales no domésticas se realizó la medición de caudal mediante la técnica volumétrica (utilizando un recipiente de 12 litros aforado y un cronometro) y en la quebrada Jaimes se efectuó la medición con molinete (equipo con un medidor de velocidad y medido el área del punto se calcula el caudal).

Los sólidos sedimentables se midieron utilizando el cono imhoff. La técnica consiste en tomar la muestra e inmediatamente adicionarla al cono aforado hasta un litro dejándolo decantar en su base por un lapso de 45 minutos, transcurrido el tiempo se lee la cantidad de solidos sedimentables en ml/L.

15.2. SELECCIÓN Y DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE LOS REACTIVOS QUÍMICOS PARA EL MEJORAMIENTO DEL STARnD

La selección de los reactivos químicos (coagulante y floculante) para el mejoramiento del sistema de tratamiento de aguas residuales no domesticas se realizó basado en las características de los diversos reactivos, en comparación al efluente de la planta de

producción de la empresa Trompetero LTDA en cuanto a la composición físico-química y a las condiciones de operacionales. Ya seleccionado los reactivos se realizaron 3 pruebas de Jarras con una muestra compuesta tomada cada hora durante 8 horas continuas del STRnD de la empresa Trompetero LTDA., para encontrar la óptima dosificación; la primera prueba se realizó utilizando solo el coagulante, la segunda prueba se utilizó el floculante y la tercera prueba se utilizaron ambos. La toma de decisión se basó en la apreciación cualitativa y cuantitativa final de la clarificación de la muestra basado en los parámetros de turbidez, color aparente, color verdadero y alcalinidad total.

15.2.1. Materiales para el control del sistema STARnD de la empresa Trompetero LTDA.

En el instante que se implementó las mejoras al STARnD de la empresa Trompetero LDTA se procedió a controlar el sistema realizando mediciones durante el proceso, controlando las dosificaciones de los reactivos químicos, el pH y los sólidos sedimentables, parámetros que pueden medirse in situ. También se mantuvo la concentración uniforme de cada reactivo en su tanque de almacenamiento, en el cual se instalaron agitadores en cada tanque con el fin de mantener una solución homogénea en todo momento durante su aplicación en el proceso.

- En el control de las dosificaciones de los reactivos químicos se utilizaron como instrumentos de medida probetas de vidrio de 25 ml y cronometro.
- El control del pH se realizó con cintas de pH marca MERCK.
- El control de los sólidos sedimentables se utilizó el cono imhoff.

16. RESULTADOS

16.1. ESTADO INICIAL DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS DE LA EMPRESA TROMPETERO LTDA

Realizada la caracterización y análisis en el laboratorio del STARnD de la empresa Sociedad Minera Trompetero LTDA se obtuvieron los resultados in situ y los presentados por el laboratorio ECOSAM S.A.S.

16.1.1. Resultados obtenidos in situ

En las Tablas 4 y 5 se presentan los datos medidos in situ de las muestras tomadas el 13 de Diciembre de 2016 a la entrada y salida del sistema de tratamiento de aguas residuales de la empresa Trompeteros LTDA.

Tabla 4. Datos in situ de la entrada del STARnD (Ayala, 2018)

| Alícuota No. | Hora | Temperatura Muestra (°C) | pH | Sólidos sedimentables (ml/L) | Caudal (L/s) |
|------------------------|-------------|---------------------------------|-----------|-------------------------------------|---------------------|
| 1 | 9:00 | 10,1 | 5,36 | 12,2 | 2,985 |
| 2 | 10:00 | 9,9 | 5,48 | 11,9 | 1,869 |
| 3 | 11:00 | 10,8 | 8,09 | 11,5 | 3,583 |
| 4 | 12:00 | 11,4 | 5,81 | 12,3 | 2,840 |
| 5 | 13:00 | 11,8 | 6,24 | 12,1 | 3,670 |
| 6 | 14:00 | 11,8 | 6,81 | 12,2 | 2,722 |
| 7 | 15:00 | 11,8 | 5,57 | 12,4 | 4,844 |
| 8 | 16:00 | 11,0 | 5,76 | 12,4 | 2,333 |
| 9 | 17:00 | 11,4 | 6,03 | 12,4 | 2,984 |
| Caudal Promedio | | | | | 3,092 |

Tabla 5. Datos in situ de la salida del Sistema del STARnD (Ayala, 2018)

| Alícuota No. | Hora | Temperatura Muestra (°C) | pH | Sólidos sedimentables (ml/L) | Caudal (L/s) |
|---------------------|-------------|---------------------------------|-----------|-------------------------------------|---------------------|
| 1 | 9:00 | 10,1 | 9,86 | 11,0 | 4,320 |
| 2 | 10:00 | 10,3 | 10,61 | 23,0 | 5,623 |

| | | | | | |
|------------------------|-------|------|-------|------|--------------|
| 3 | 11:00 | 10,9 | 10,53 | 28,0 | 3,540 |
| 4 | 12:00 | 11,2 | 10,10 | 50,0 | 3,520 |
| 5 | 13:00 | 12,1 | 10,26 | 30,0 | 4,363 |
| 6 | 14:00 | 11,2 | 5,80 | 5,0 | 4,309 |
| 7 | 15:00 | 11,9 | 6,24 | 5,0 | 4,381 |
| 8 | 16:00 | 11,7 | 5,85 | 50,0 | 2,885 |
| 9 | 17:00 | 11,5 | 6,09 | 10,0 | 3,771 |
| Caudal Promedio | | | | | 4,079 |

En la Tabla 6 a seguir se muestran los resultados medidos in situ para las muestras 100 m aguas arriba y 100 metros aguas abajo del punto de vertimiento sobre la quebrada Jaimes.

Tabla 6. Datos in situ de aguas arriba y abajo del punto de vertimiento quebrada Jaimes (Ayala, 2018)

| Alícuota | Temperatura Muestra (°C) | pH | Caudal(L/s) |
|-----------------|---------------------------------|-----------|--------------------|
| Aguas arriba | 9,8 | 3,84 | 4,320 |
| Aguas abajo | 10,6 | 4,00 | 5,623 |

16.1.2. Resultados obtenidos por el laboratorio

Los resultados obtenidos de los análisis físico-químicos medidos en el laboratorio ECOSAM S.A.S. de las muestras entrada y salida del sistema de tratamiento de aguas residuales no domesticas son mostrados en la Tabla 7. Los resultados de las muestras tomadas 100 m aguas arriba y 100 m aguas abajo son mostrados en la Tabla 8. Los parámetros presentados en estas tablas son los más relevantes y que obtuvieron un valor, el restante que se analizó y que están contemplados en la resolución 0631 de 2015 dieron trazas.

Tabla 7. Resultados del laboratorio del STARnD (Laboratorio Ecosam SAS-Santander)

| Análisis | Punto de muestreo | | Unidades |
|------------------|--------------------------|---------------|----------------------|
| | Entrada | Salida | |
| DBO ₅ | 39,6 | 10,4 | mg O ₂ /L |
| DQO | 56 | 26 | mg O ₂ /L |
| Grasas y Aceites | <12 | <12 | mg/L |

| | | | |
|-----------------------------|--------|--------|---------|
| Sólidos suspendidos Totales | >10000 | 3890 | mg/L |
| Sulfuros | 2,6 | <1,2 | mg S/L |
| Aluminio | 70,4 | 30,8 | mg Al/L |
| Hierro Total | 55,2 | 57,6 | mg Fe/L |
| Cobre | 0,566 | 0,102 | mg Cu/L |
| Plomo | 0,913 | 0,152 | mg Pb/L |
| Zinc | 2,61 | 0,938 | mg Zn/L |
| Cianuro Total | 0,03 | <0,02 | mg CN/L |
| Mercurio | <0,002 | <0,002 | mg Hg/L |

Tabla 8. Resultados del laboratorio del STARnD (Laboratorio Ecosam SAS-Santander)

| Análisis | Punto de muestreo | | Unidades |
|-----------------------------|-------------------|-------------|----------------------|
| | Aguas arriba | Aguas abajo | |
| DBO ₅ | 5,10 | <1 | mg O ₂ /L |
| DQO | <10 | 11 | mg O ₂ /L |
| Grasas y Aceites | <12 | <12 | mg/L |
| Sólidos suspendidos Totales | 47,0 | 157 | mg/L |

Como se puede observar en la Tabla 7, la calidad del agua residual presenta valores significativos, por esta razón se ve la necesidad de realizar un comparativo con los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales presentados en la resolución 0631 del 2015 (ver Tabla 9).

Tabla 9. Comparativo entre la caracterización de las aguas de vertimiento no domésticas de la empresa Trompetero LTDA y resolución 0631 de 2015

| Análisis | Unidades | Resolución 0631/2015 | Efluente del sistema de tratamiento | Cumplimiento |
|------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|--------------|
| pH | Unidades de pH | 6,00 – 9,00 | 8,4 | Sí |
| DBO ₅ | mg O ₂ /L | 50,00 | 10,4 | Sí |

| | | | | |
|-----------------------------|----------------------|-------|--------|----|
| DQO | mg O ₂ /L | 50,00 | 26 | Sí |
| Grasas y Aceites | mg/L | 10,00 | <12 | Sí |
| Sólidos suspendidos Totales | mg/L | 50,00 | 3890 | No |
| Sólidos Sedimentables | ml/L | 2,00 | 11 | No |
| Sulfuros | mg S/L | 1,00 | <1,2 | Sí |
| Hierro Total | mg Fe/L | 2,00 | 57,6 | No |
| Cobre | mg Cu/L | 1,00 | 0,102 | Sí |
| Plomo | mg Pb/L | 0,20 | 0,152 | Sí |
| Zinc | mg Zn/L | 3,00 | 0,938 | Sí |
| Cianuro Total | mg CN/L | 1,00 | <0,02 | Sí |
| Mercurio | mg Hg/L | 0,002 | <0,002 | Sí |

En la anterior tabla se observa que el sistema de tratamiento de aguas residuales no domésticas no es eficiente en los parámetros que corresponden a los sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables y concentración de hierro del agua residual ya tratada, es decir, a la salida del sistema de tratamiento de aguas de la empresa Trompetero LTDA se está excediendo en los límites de permisibles contemplados en la norma 0631 de 2015; por lo tanto se hace necesario un tratamiento más eficiente y adecuado que permita el cumplimiento total de la normatividad ambiental vigente.

Sin embargo en cuanto a los resultados obtenidos en los demás parámetros se confirma que se encuentran dentro del rango establecido, conforme a lo establecido en la resolución 0631 de 2015.

17. PROPUESTA DE DISEÑO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL STARnD DE LA EMPRESA TROMPETERO LTDA

De acuerdo a los resultados mostrados en la caracterización del sistema de tratamiento de aguas residuales no domésticas (STARnD) de la empresa Sociedad Minera Trompetero LTDA se ve la necesidad de dar pronta solución al deficiente sistema con el fin de cumplir la normatividad vigente y evitar un posible cierre de vertimiento por parte de las entidad ambiental responsable de la zona de Vetas – Santander (CDMB). A continuación se plantea las mejoras enfocadas a la optimización del sistema las cuales ayudaron a obtener un efluente de mejor calidad y de esta forma poder reusarlo en las etapas del proceso productivo.

17.1. Modificación estructural de las unidades de tratamiento STARnD

Como primera medida se propone aumentar el tiempo de residencia en los tanques sedimentadores antes de ingresar el efluente al cuerpo receptor (quebrada Jaimes).

La empresa Trompetero LTD consta de 2 tanques sedimentadores, uno de dimensiones pequeñas en comparación al segundo. Estos tanques están construidos en cemento y ladrillo. En las Figuras 3 y 4 se observan las características de primer y segundo tanques al inicio del proyecto.

Ilustración 3. Primer tanque sedimentador al inicio de STARnD (Ayala Díaz, 2018)

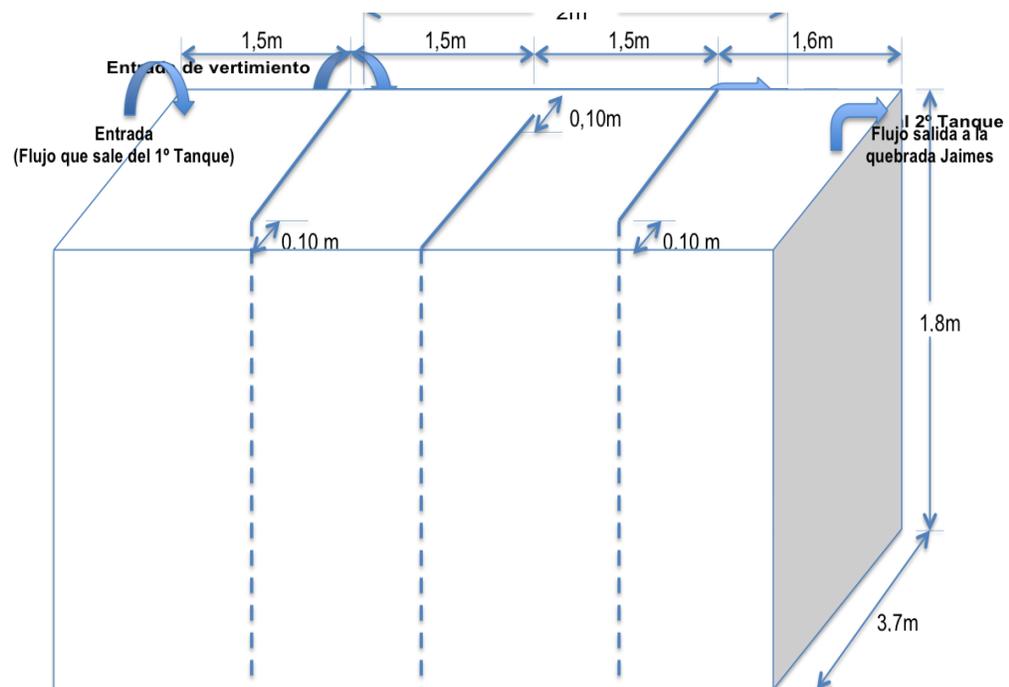
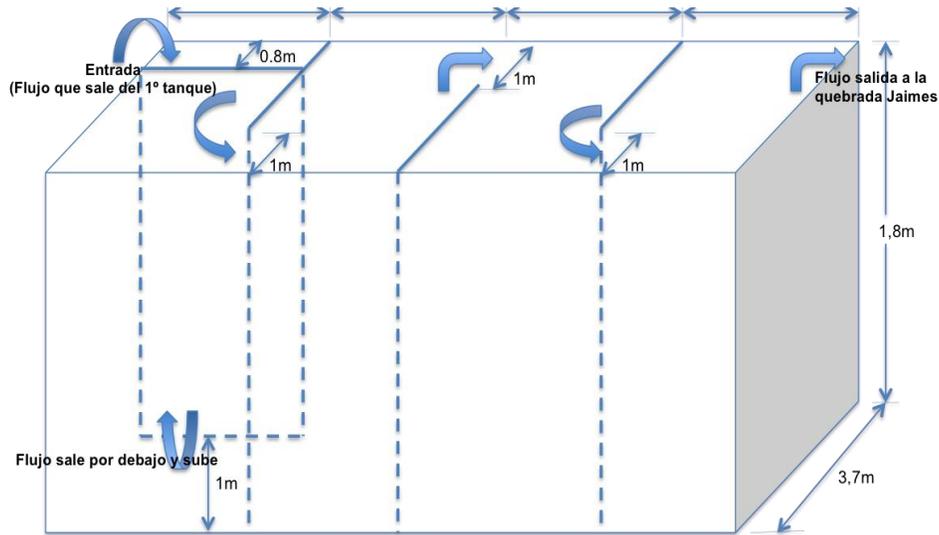


Ilustración 4. Segundo tanque sedimentador al inicio del STARnD
(Ayala Díaz, 2018)



Como se puede observar en las Figuras 3 y 4 los sedimentadores inicialmente estaban contruidos como tanques de almacenamiento, en ellos se observa la ineficiencia en el tiempo de retención hidráulico de los sólidos antes del vertimiento a la quebrada Jaimes, parámetro esencial para la remoción de la turbidez en el agua, por esta razón se propuso modificarlos estructuralmente basado en las características de diseño de los tanques sedimentadores de placas paralelas, ya que el espacio del STARnD es tan limitado que es casi imposible la construcción de nuevos tanques sedimentadores. En las Figuras 5 y 6 se presenta la modificación estructural realizada a los tanques sedimentadores del STARnD de la empresa Trompeteros LTDA

Ilustración 5. Primer tanque sedimentador del STARnD, modificado
(Ayala, 2018)

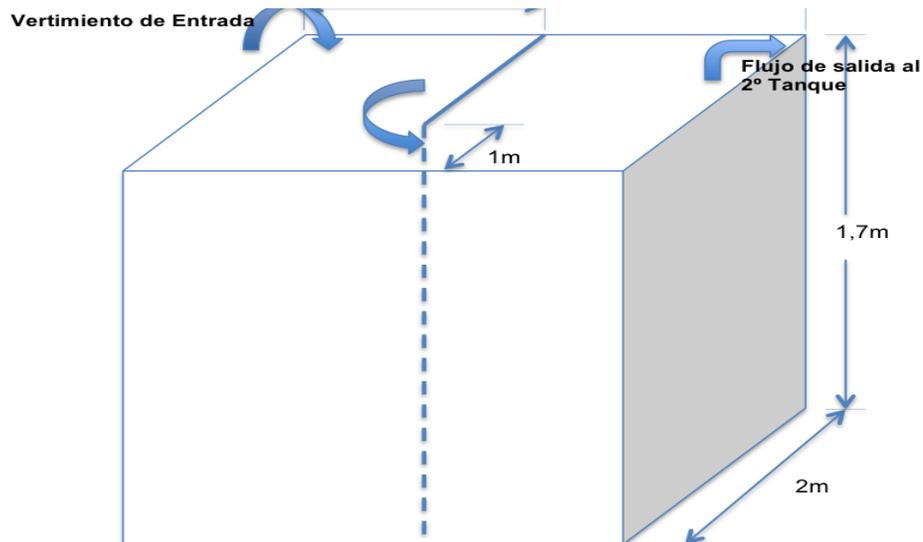
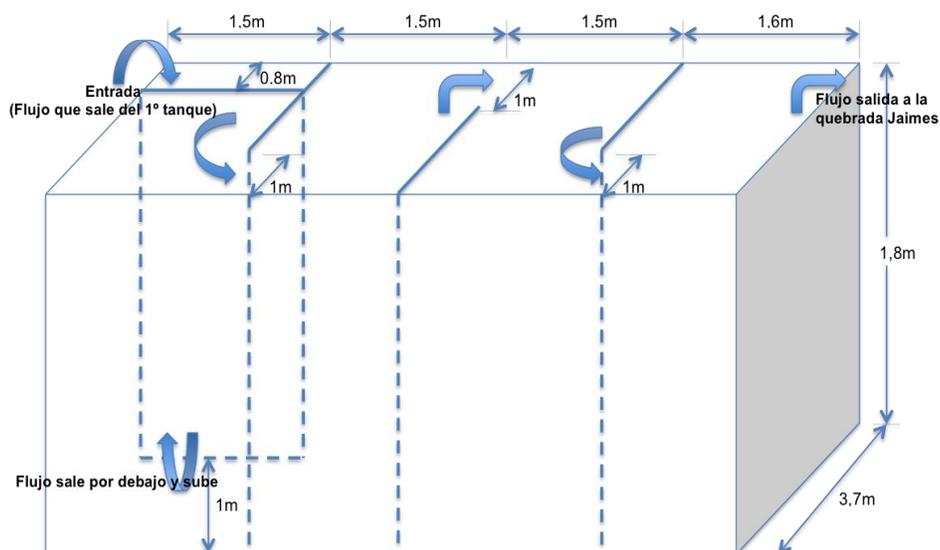


Ilustración 6. Segundo tanque sedimentador del STARnD modificado (Ayala, 2018)



Las Figuras 5 y 6 muestran claramente la modificación de los sedimentadores, su modificación consistió en subdividir los tanques en regiones de forma que el efluente realice un recorrido mayor, es obligado a modificar la dirección de su flujo, ya no es de forma horizontal sino en zigzag, esa modificación se realizó con el fin de aumentar el tiempo de residencia hidráulico del efluente antes de salir de la STARnD. En la Figura 6 se observa una pared colocada que no llega al fondo sino 1 m por encima, esta pared tiene como objetivo en la entrada del segundo sedimentador obligar al flujo a descender para luego tener un flujo ascendente, esto se realizó con el fin de frenar la caída del vertimiento convirtiendo de un flujo turbulento a un flujo laminar, flujo en el cual la sedimentación aumenta su grado de efectividad.

A pesar del aumento en el tiempo de residencia por causa de la modificación estructural de los sedimentadores, no fue lo suficiente para tener una eficiencia en el proceso de sedimentación, aun el tiempo de residencia era corto para cumplir con los parámetros establecidos en la resolución 0631 de 2015. Por esta razón fue necesario la implementación de un tratamiento químico que aumente la velocidad de sedimentación.

17.2. Implementación del tratamiento químico en el STARnD

Es habitual que la depuración de aguas residuales, sean sometidas a un tratamiento físico-químico previo a su descarga a los medios receptores (quebrada) o a su reutilización, siendo el más adecuado la coagulación y floculación. Se propuso implementar la dosificación de un coagulante y floculante al inicio del STARnD.

17.2.1. Selección de los reactivos químicos

Teniendo en cuenta los resultados de las Tablas 4 y 5 respecto a la variabilidad del pH en el STARnD durante la caracterización inicial, se propuso implementar un mecanismo de control del pH en el agua residual por medio de la adición de Cal. Su implementación ayudó a estabilizar del pH, característica que mejora la efectividad del coagulante y el floculante. También es precursor a disminuir la turbidez de las aguas residuales por su propiedad de coagulación.

Analizando los parámetros de la caracterización de las aguas residuales no domésticas de la empresa Trompetero LTDA se seleccionó el coagulante y el floculante para el tratamiento químico.

El coagulante escogido fue el policloruro de aluminio, se seleccionó gracias a sus ventajas descritas, las cuales fueron:

- Es efectivo en un rango amplio de pH para la remoción de Hierro (ver Tabla 2): Esta propiedad es importante en el hecho de que el efluente a tratar presenta variabilidad de pH durante el proceso de producción (ver Tabla 5)
- No presenta hierro residual: Ventaja en cuanto a las características del agua residual a tratar ya que presenta valores de concentración de hierro por encima de la norma vigente.
- Alta velocidad reacción se obtienen flóculos compactos y fácilmente sedimentables: El tiempo de residencia de los sedimentadores aún sigue siendo baja a pesar del aumento que se le proporcionó con las modificaciones estructurales realizadas a los tanques sedimentadores. El objetivo es aumentar la velocidad de sedimentación en el menor tiempo posible.
- No presenta turbidez residual si la dosis óptima aumenta: En algunas ocasiones la producción de la planta aumenta y eso conlleva a un aumento en los contaminantes del agua residual, por prevención la dosis óptima del coagulante se debe aumentar, el que no genere impacto en el agua tratada debido al aumento de la dosis es una gran ventaja.
- Manejo fácil del producto sólido: Ventaja a considerar, ya que la empresa Sociedad Minera Trompetero LTDA. está ubicada en una zona montañosa sin acceso de carretera para el STARnD, el transporte de reactivos es de extremo cuidado debido a las condiciones de la zona.

El reactivo escogido para la floculación fue la poliacrilamida, un floculante orgánico sintético, se seleccionó gracias a sus ventajas descritas, las cuales fueron:

- Es biodegradable y no tóxico
- Tiene un rango de operación amplio de pH (6,00 a 10,00) y no afecta el pH del agua tratada: la caracterización de las aguas residuales no domésticas de la empresa Trompetero LTDA se ubica dentro de ese rango de pH (6,00 y 7,00). Como se puede observar en las Tablas 4 y 5 el pH de las aguas residuales no domésticas se mantiene muy cercano al límite según la norma ambiental, razón por la cual es importante que el floculante aplicado no lo altere.
- Presenta mayor pureza, estabilidad y eficacia como floculante.
- Mejora la floculación a temperaturas bajas. Como se puede observar en las Tablas 4 y 5 la temperatura de las aguas residuales de la empresa Trompetero LTDA son bajas, una de las razones de su selección.

17.2.2. Dosificación óptima de coagulante y floculante en el STARnD

Las dosificaciones óptimas del coagulante y floculante seleccionadas fueron determinadas por el método de Jarras descrito. La primera prueba que se realizó consistió en determinar la dosificación óptima del Policloruro de Aluminio (coagulante), los resultados obtenidos son mostrados en la Tabla 10 a seguir.

Tabla 10. Prueba de Jarras con Policloruro de Aluminio (Ayala, 2018)

| Análisis | Resultados obtenidos | | Unidades |
|---|----------------------|---------|-------------------------|
| | Iniciales | Finales | |
| pH | 7,93 | 7,51 | Unidades de pH |
| Turbidez | 1908 | 2,90 | NTU |
| Color aparente | 4280 | 46 | Unidades Pt-Co |
| Color verdadero | 480 | 34 | Unidades Pt-Co |
| Alcalinidad total | 53 | 34 | mg CaCO ₃ /L |
| Dosis óptima: Policloruro de Aluminio: 20 g/m³ | | | |

La segunda prueba determinó la dosificación óptima de la Poliacrilamida (floculante), los resultados obtenidos son mostrados en la Tabla 11 a seguir.

Tabla 11. Prueba de Jarras con Poliacrilamida iónica (Ayala, 2018)

| Análisis | Resultados obtenidos | | Unidades |
|--|----------------------|---------|-------------------------|
| | Iniciales | Finales | |
| pH | 7,93 | 7,86 | Unidades de pH |
| Turbidez | 1908 | 640 | NTU |
| Color aparente | 4280 | 1320 | Unidades Pt-Co |
| Color verdadero | 480 | 460 | Unidades Pt-Co |
| Alcalinidad total | 53 | 36 | mg CaCO ₃ /L |
| Dosis óptima: Poliacrilamida iónica: 5 g/m³ | | | |

La tercera prueba consistió en determinar la dosificación óptima de ambos reactivos (Policloruro de Aluminio y Poliacrilamida iónica) trabajando en conjunto, los resultados obtenidos son mostrados en la Tabla 12 a seguir.

Tabla 12. Prueba de Jarras con Policloruro de Aluminio y Poliacramida iónica (Ayala, 2018)

| Análisis | Resultados obtenidos | | Unidades |
|--|----------------------|---------|-------------------------|
| | Iniciales | Finales | |
| pH | 7,93 | 7,86 | Unidades de pH |
| Turbidez | 1908 | 640 | NTU |
| Color aparente | 4280 | 1320 | Unidades Pt-Co |
| Color verdadero | 480 | 460 | Unidades Pt-Co |
| Alcalinidad total | 53 | 36 | mg CaCO ₃ /L |
| Hierro | -- | 0,62 | mg Fe/L |
| Sólidos Suspendidos Totales | -- | 10 | mg/L |
| Dosis óptima: Policloruro de Aluminio: 20 g/m³ Poliacrilamida iónica: 2 g/m³ | | | |

Analizando los resultados mostrados en las Tablas 10, 11 y 12 se observa que los datos finales tienden a disminuir cuando ambos reactivos (coagulante y floculante) se aplican juntos, la turbidez, el color aparente, el color verdadero y la alcalinidad presentan menores valores. Por esta razón se decidió aplicar ambos reactivos para la optimización de la STARnD de la empresa Trompetero LTDA.

Con el interés de verificar la efectividad de ambos reactivos en aplicación a la muestra tomada en las aguas residuales no domesticas de la empresa, se analizaron los parámetros donde la empresa no cumple la norma ambiental, los resultados mostraron satisfactoriamente el cumplimiento de la resolución 0631 de 2015 en los parámetros de concentración de Hierro, concentración de sólidos suspendidos y concentración de sólidos sedimentables, este último parámetro no se registra ya que dio trazas (ver Tabla 12).

18. EVALUACIÓN EN CAMPO DEL DISEÑO PROPUESTO

Realizado la modificación de los tanques sedimentadores, seleccionado los reactivos para el tratamiento químico coagulación-floculación y determinado la dosificación óptima de dichos reactivos se procedió a implementar en campo el tratamiento químico en el STARnD de la empresa Trompetero LTDA.

18.1. Cálculos para la aplicación en campo del nuevo STARnD de la empresa Trompetero LTDA

Teniendo en cuenta el caudal del efluente en el STARnD de la empresa Trompetero LTDA determinado en la caracterización inicial (ver Tabla 5) y la dosificación óptima encontrada del coagulante y el floculante (ver Tabla 12) se procedió a calcular los flujos de adición de dichos reactivos en campo.

Los cálculos se realizaron para un proceso de 24 horas continuas. Los datos encontrados utilizaron las siguientes bases de cálculo:

- El caudal de las aguas residuales no domésticas de la empresa Trompetero corresponde a un promedio de 4,1 l/s, se aproximó a 5 l/s por las posibles fluctuaciones que pueda tener la planta de producción.
- La preparación de cada reactivo se llevó a cabo en un tanque de 208 litros para un proceso de 24 horas continuas.
- La dosificación del coagulante (Policloruro de Aluminio) se determinó en 20 g/m³.
- La dosificación del floculante (Poliacrilamida Iónica) se determinó en 2 g/m³.
- La dosificación de la cal se determinó a prueba y error durante varios días alterando el flujo de adición en el proceso, con un continua medición de pH con cintas de pH marca Merck

Los resultados de los cálculos basados en los anteriores datos están detallados en la Tabla 13 a seguir.

Tabla 13. Dosificación en campo para el tratamiento químico en 24 horas de proceso (Ayala Díaz, 2018)

| Parámetro | Reactivos | | |
|---|-----------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Volumen de agua del tanque a preparar (L) | 208 | 208 | 208 |
| Caudal de aguas residuales (L/s) | 5 | 5 | 5 |
| Flujo másico (mg/s) | 100 | 10 | 115,7 |
| Masa adicionada al tanque (kg) | 8,64 | 0,864 | 10 |
| Caudal de dosificación (ml/s) | 2,41 | 2,41 | 2,41 |

*1: Policloruro de Aluminio *2: Poliacrilamida Iónica *3: Cal

Las dosificaciones fueron controladas cada hora durante el día de proceso.

18.1.1. Ubicación de los puntos de adición de los respectivos reactivos químicos

La ubicación de los reactivos en el STARnD es de crucial importancia para el buen funcionamiento y efectividad del proceso. La posición de los reactivos inició desde la salida del primer tanque sedimentador, con el fin de utilizar dicho tanque como sedimentador primario para los sólidos de mayor densidad, los cuales se sedimentan con mayor facilidad, logrando evitar el desgaste de reactivos innecesarios en el proceso.

La cal se ubicó a la salida del primer tanque sedimentador con el fin de que todo el sistema mantuviera un pH estable dentro del rango de operación del coagulante y principalmente el floculante el cual a diferencia del coagulante opera en un rango establecido de pH 6,00 - 10,00.

El coagulante (Policloruro de Aluminio) se ubicó también a la salida del primer tanque sedimentador, con el fin de desestabilizar las partículas, cambiándolas de polaridad en suspensión, comenzando así el proceso de aglutinación.

El floculante (Poliacrilamida Iónica) se ubicó en la entrada del segundo tanque sedimentador, ya desestabilizadas las partículas y aglutinándose, el floculante actuó rápidamente formando un floc denso de mayor masa en el cual aumentó la velocidad de sedimentación.

La Figura 7, 8 y 9 a seguir muestran la ubicación de los 3 tanques que se utilizaron para la dosificación de reactivos en el STARnD de la empresa Trompetero LTDA.

Ilustración 7. Diagrama del nuevo STARnD de la empresa Trompetero LTDA (Ayala, 2018)

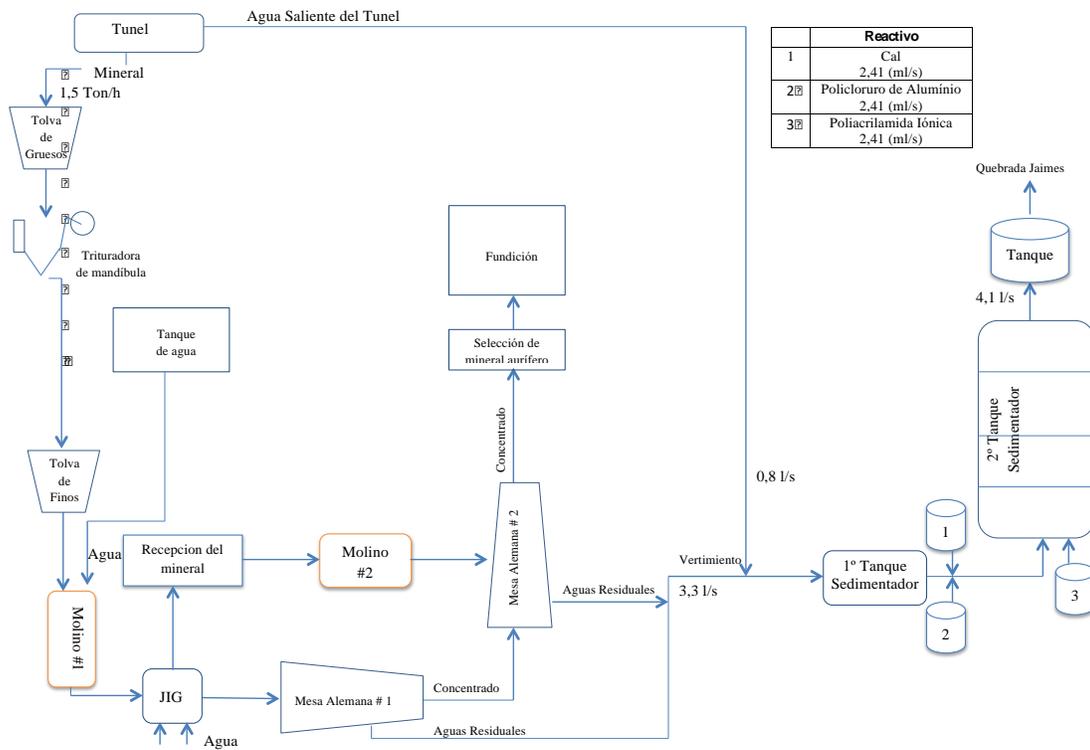


Ilustración 8. Ubicación de la cal y el policloruro de Aluminio a la salida del primer tanque sedimentador (Avala. 2018)



Ilustración 9. Ubicación de Poliacrilamida iónica a la entrada del segundo tanque sedimentador (Ayala, 2018)



Poliacrilamida
Iónica

18.2. Caracterización de las aguas residuales no Domésticas luego de la implementación de mejoras en el STARnD de la empresa Trompetero LTDA

Luego de haber implementado las mejoras al STARnD de la empresa se realizó la caracterización de las aguas residuales no domésticas vertidas a la quebrada Jaimes. Los datos obtenidos in situ y los resultados de los análisis del laboratorio se realizaron siguiendo los procedimientos descritos para toma de muestras.

La Tabla 14 presenta los resultados obtenidos en el laboratorio para los parámetros que la empresa Trompetero LTDA no estaba cumpliendo frente la norma 0631 de 2015.

Tabla 14. Resultados del laboratorio del nuevo STARnD de la empresa trompetero LTDA (Laboratorio Ecosam SAS- Santander)

| Análisis | Punto de muestreo Salida | Unidades |
|-----------------------------|--------------------------|-------------|
| pH | 7,46 | Unidades pH |
| Sólidos suspendidos Totales | 31,3 | mg/L |
| Sólidos Sedimentables | 0,1 | mg/L |
| Hierro | 1,63 | mg Fe/L |

La Tabla 15 a seguir muestra la comparación entre la caracterización inicial, la caracterización final del STARnD de la empresa Trompetero LTDA frente a los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales presentados en la resolución 0631 del 2015.

Tabla 15. Comparativo entre las caracterizaciones inicial y final de las aguas de vertimiento no domésticas de la empresa Trompetero LTDA y la resolución 0631 de 2015

| Análisis | Resolución 0631/2015 | Caracterización inicial | Caracterización Final | Cumplimiento |
|------------------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|--------------|
| pH | 6,00 – 9,00 | 8,4 | 7,46 | Sí |
| Sólidos Suspendidos Totales (mg/L) | 50,00 | 3890 | 31,3 | Si |
| Sólidos Sedimentables (mg/L) | 2,00 | 11 | 0,1 | Si |
| Hierro Total (mg Fe/L) | 2,00 | 57,6 | 1,63 | Si |

Observando la Tabla 15 se comprueba que las mejoras realizadas en el STARnD de la empresa Trompetero LTDA. Fueron efectivas, los parámetros en donde la empresa no estaba cumpliendo con la norma ambiental disminuyeron su concentración en el punto de vertimiento, ubicándose dentro de los límites máximo permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales presentados en la resolución 0631 del 2015,

dando como resultado el cumplimiento total de la norma, es decir, las aguas residuales generadas por la empresa Sociedad Minera Trompetero LTDA no tiene afectación significativa sobre la calidad del agua de la quebrada Jaimes.

La ilustración 10 muestra la comparación entre el proceso de sedimentación del STARnD al inicio del proyecto y ya finalizada la investigación, basado en la apreciación cualitativa del efluente. La ilustración 11 muestra las aguas residuales no domésticas de vertimiento a la salida del óptimo STARnD.

Ilustración 10. Comparación cualitativa entre el STARnD al inicio del proyecto y ya finalizado Salida de aguas residuales no domésticas del óptimo STARnD (Avala, 2018)



Ilustración 11. Salida de agua al final del proceso. CUMPLIMIENTO DE LA RESOLUCIÓN 0631 DEL 2015, Y CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS (Avala, 2018)



19. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Inicialmente el STARnD de la empresa Sociedad Minera Trompetero LTDA. presentaba algunas falencias en su operación, los tanques que eran utilizados como sedimentadores operaban como tanques de almacenamiento por la carencia de un diseño propio para el proceso de sedimentación, el sistema carecía de un tratamiento químico para la decantación de partículas suspendidas o disueltas en el agua residual, lo que ocasiona la baja remoción de sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y concentración de hierro disuelto en el agua, dando como resultado el no cumplimiento de límites máximo permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales presentados en la resolución 0631 del 2015.

De acuerdo a la caracterización inicial de las aguas residuales no domésticas de vertimiento del STARnD realizado en la empresa Sociedad Minera Trompetero LTDA, se identificó las necesidades del proceso, debido a esto se realizaron diversas mejoras al sistema, como la modificación estructural de los tanques sedimentadores basados en diseños de sedimentadores de placas paralelas, la aplicación de un tratamiento químico de coagulación-floculación para el aumento de la velocidad de sedimentación, la selección de un estabilizador para el control del pH. Finalizadas las mejoras, el STARnD de la empresa Trompetero LTDA logró optimizar su proceso, sus vertimientos de aguas residuales carecen de turbidez sin ningún tipo de contaminante a la vista humana, cuantitativamente cumplió con los límites máximo permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales presentados en la resolución 0631 del 2015.

La implementación del tratamiento químico coagulación y floculación evitó la posible construcción de más tanques sedimentadores para mejorar su efectividad.

La optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales no domésticas de la empresa Trompetero LTDA mitigó el impacto ambiental generado por su operación a la quebrada Jaimes, iniciando una recuperación ambiental de la quebrada, permitiendo devolver a la misma su ecosistema acuático, recuperar el recurso suelo, minimizando las enfermedades de la población ocasionadas por la turbidez del agua residual y los metales pesados disueltos en ella, dando una mejor imagen frente a la población de la región de Vetás –Santander y a las entidades gubernamentales responsables del cuidado del medio ambiente, fortaleciendo los vínculos minero ambientales en pro de la conservación del medio ambiente en todo el territorio.

20. RECOMENDACIONES

Se sugiere operar y adecuar el sistema de tratamiento de aguas residuales no domésticas para un fácil monitoreo en el punto de vertimiento antes de entrar en contacto con el cuerpo receptor.

Se recomienda crear formatos de control de dosificaciones de reactivos y de análisis de parámetros in situ en el STARnD

Se sugiere realizar un estudio para determinar exactamente la dosificación de la cal en las aguas residuales, debido a que el comportamiento del pH es tan variable por el avance en la explotación dentro del túnel, donde pueden encontrarse con regiones de mayor acidez.

Se recomienda la adquisición de un pH-metro para el monitoreo de del pH en las aguas residuales, debido a que las cintas de pH no son muy confiables si están expuestas a la humedad de la región.

Para la dosificación de reactivos en el sistema de tratamiento de aguas residuales no domésticas, se recomienda la utilización de bombas dosificadoras para mejorar el control y evitar posibles errores humanos.

Se sugiere instalar una bomba centrífuga a la salida del STARnD exactamente en el punto de vertimiento para recircular parte del agua vertida hacia la planta de producción y disminuir así la captación del agua limpia de quebradas cercanas.

21. BILIOGRAFÍA

- Aguilar, F. (2011). *Tratamiento de aguas contaminadas con cianuro* (tesis de pregrado), Lima, Perú.
- Ayala, J. (2018). *Diseño de Optimización de un Sistema de Tratamiento y manejo de Vertimientos de la Planta de Beneficio Aurífero en la Empresa Trompetero, Vetas-Santander* (tesis de pregrado), Universidad Nacional a Distancia, Bucaramanga, Colombia.
- Baquero, J., Fernández, R., Verdejo, J., y Lorca, D. (Noviembre de 2008). Tratamiento de aguas ácidas. Prevención y reducción de la contaminación. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, (10), p. 44-47.
- Barrenechea, A. (2010). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. Manual I: teoría. Lima: Organización Panamericana de la Salud (OPS), Organización Mundial de la salud (OMS). Recuperado de: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/uno.pdf>
- Benavides, T y Benavides, L. (2005). *Impacto de la minería en la calidad del agua en la microcuenca del rio Artiguas. Énfasis en metales pesados* (tesis de pregrado), Universidad Centroamericana, Managua, Nicaragua.
- Cataldo, P. (2008). *Modelamiento de un sistema de costeo basado en actividades para el proceso de flotación de la compañía minera doña Inés de Collahuasi* (tesis de Vertimientos de la Planta de Beneficio Aurífero en la Empresa Trompetero, maestría), Santiago de Hile, Chile.
- Díaz, M., Rivas, L., Fernández, D., Salazar, D., Miller, S., y Maza, N (31 de Enero de 2017). Selección de programa químico de tratamiento para aguas residuals oleosas. *Centro Azúcar*, 44, p 90.

- Díaz, J. (2014). *Coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra para el tratamiento de aguas contaminadas* (Tesis de maestría). Universidad pedagógica nacional Francisco Morazan, Tegucigalpa, México.
- Ferrer, A. (2003). Intoxicación por metales. *Anales Sis Navarra*. 26(supl 1), 141-153.
- Fibras y Normas de Colombia. (2018). Aguas residuales, clasificación y características [Mensaje en un blog]. Ingeniería en agua. Recuperado de <https://www.fibrasynormasdecolombia.com/terminos-definiciones/aguas-residuales-clasificacion-y-caracteristicas/>
- Gaioli, M., Amoedo D., y González, D. (2012). Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente. *Arch. Argent. Pediatr*, 110 (3), 259-264.
- Gil, J. (2012). *Tratamiento electroquímico para la remoción de metales pesados en residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios de docencia de la Universidad del Cauca* (tesis de maestría), Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Gomez, A. (2005). *Remoción de materia orgánica por coagulación-floculación* (tesis de pregrado), Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.
- González, A. (2008). *Diseño de metodología para la identificación de pasivos ambientales mineros en Colombia* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Guiza, L. (2013). La pequeña minería en Colombia: Una actividad no tan pequeña. *DYNA*, 80 (181), 109-117.
- Izaguirre, M. (2017). Contaminación del agua ¿Qué es? Conoce causas y efectos en la salud. Contaminación Ambiental. Recuperado de <http://contaminacionambiental.net/contaminacion-del-agua/>.
- Lenntech. (2006). Agua residual & purificación del aire. Holding B.V. Rotterdamseweg 402 M 2629 HH Delft, Holanda) Potablewater. Recuperado de http://www.infoiarna.org.gt/guateagua/subtemas/3/3_Calidad_del_agua.pdf.
- Lizarazo, J., y Orjuela, M. (2013). *Sistema de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia* (Tesis de Especialización). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- López, I., Figueroa, A., y Corrales, J. (2015). Un mapeo sistemático sobre predicción de calidad del agua mediante técnicas de inteligencia computacional. *Revista Ingenieros Universidad de Medellín*, 15(28), 35-52.

- Macloni, D. (2014). *Diseño de planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz* (tesis de pregrado). Universidad Rafael Landívar, Guatemala de la Asunción, Guatemala.
- MINAMBIENTE. (Septiembre de 2015). Por lo cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.
- Ministerio de Minas y Energía.(2015).Guía de orientación para el minero sobre el correcto manejo de vertimientos para la minería de metales preciosos y de carbón. Universidad de Córdoba. Recuperado de http://www.upme.gov.co/SeccionMineria_sp/Guia_orientacion_para_el_minero_correcto_manejo_vertimietnos.pdf.
- Montoya, M. (2013). *Aplicación de un modelo numérico (3D) a la modelación del comportamiento del sedimento en la toma y descarga de un río a un tanque sedimentador* (tesis de maestría), Mexico
- Muñoz, A. (2008). *Caracterización y tratamiento de aguas residuales* (tesis de pregrado). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- Norma colombiana de vertimientos – Resolución 631 de 2015 (5 de Noviembre de2015). INGEPROL. Recuperado de <http://ingeprol.com/norma-colombiana-vertimientos/>.
- Observatorio de conflictos mineros de américa latina. (2010). Cianuro, la cara toxica del oro. Recuperado de https://www.ocmal.org/wpcontent/uploads/2017/03/Informe_Cianuro-1.pdf.
- Otero, N. (2007). *Filtración de aguas residuales para reutilización* (Tesis de Doctorado). Universidad de la Laguna, San Cristóbal de la Laguna, España.
- Pérez, J., y Rincón, M. (2016). *Evaluación del proceso de filtración como tratamiento de aguas residuales de la fase de pelambre en la curtiembre camelo, barrio San Benito, Bogotá* (Tesis de pregrado). Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia.
- Resolución 0631. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia, 17 de Marzo de 2015.
- Restrepo, H. (2009). *Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable* (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Rinne, T. (22 de Agosto de 2001). Potabilización con diferentes coagulantes de aluminio y hierro. *Asociación interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, pp. 1-7.
- Rodríguez, A., Ietón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., y Sanz, J. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*, España: CEIM Dirección General de Universidades e Investigación.

Valencia, A. (2013). *Diseño de un sistema de tratamiento para las aguas residuales de la cabecera parroquial de San Luis – provincia de Chimborazo* (tesis de pregrado), Riobamba, Ecuador.

Vallejo, J. (2014). *Estudio del proceso de depuración de aguas residuales industriales provenientes de empresas mineras* (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.