

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN, FLOCULACIÓN Y  
CENTRIFUGADO MEDIANTE SULFATO DE ALUMINIO COMO TRATAMIENTO  
DE LIXIVIADO MADURO GENERADO EN RELLENO SANITARIO EL OJITO DE  
POPAYÁN**



**NAREN ORLEY DAZA CERQUERA  
JUAN CAMILO MARTINEZ CERÓN**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE  
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
POPAYÁN, 2021**

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN, FLOCULACIÓN Y  
CENTRIFUGADO MEDIANTE SULFATO DE ALUMINIO COMO TRATAMIENTO  
DE LIXIVIADO MADURO GENERADO EN EL RELLENO SANITARIO EL OJITO  
DE POPAYÁN**



**NAREN ORLEY DAZA CERQUERA  
JUAN CAMILO MARTINEZ CERÓN**

**Trabajo de investigación para optar por el título en Ingeniería Ambiental y  
Sanitaria**

**Director:**

**M. Sc. Ronald Edinson Cerón**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE  
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
POPAYÁN, 2021**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

El director del trabajo de grado, en modalidad de investigación: **“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN, FLOCULACIÓN Y CENTRIFUGADO MEDIANTE SULFATO DE ALUMINIO COMO TRATAMIENTO DE LIXIVIADO MADURO GENERADO EN RELLENO SANITARIO EL OJITO DE POPAYÁN”** realizado por Naren Orley Daza Cerquera y Juan Camilo Martínez Cerón. Una vez revisado el informe final y aprobado la sustentación, autorizan para que se realicen los trámites concernientes para optar el título profesional en Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.



---

Director  
M.Sc. Ronal Edinson Ceron



---

Jurado  
Esp. Arnol Arias Hoyos



---

Jurado  
M.Sc. Natalia Eugenia Samboni Ruiz

Popayán, septiembre 10 de 2021

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres por haberme brindado todo su apoyo en mi proceso formativo, por brindarme los principios y valores que me han hecho destacar como persona dentro y fuera de la universidad.

***Naren O. Daza Cerquera***

Dedico este trabajo a mis padres y hermanos los cuales me inculcaron principios y valores que me han permitido destacarme dentro y fuera de la universidad, también quiero dedicarle este trabajo a mis amigos y a todas las personas allegadas a mí, que brindaron su apoyo en mi proceso formativo y estuvieron presentes en este largo camino.

***Juan Camilo Martínez Cerón***

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme regalado la vida, a mis padres por su apoyo incondicional dentro de mi proceso formativo permitiéndome buscar siempre los mejores resultados y poniendo todo de mí.

En segundo lugar, agradezco a los docentes de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca que impartieron sus conocimientos profesionales a nosotros y que ahora con este trabajo se ven reflejados sus aportes.

***Naren O. Daza Cerquera***

En primer lugar, agradecer a Dios por todo lo recibido y por darme la fuerza para salir adelante ante tantas adversidades, a mi papá, mamá y a mis hermanos por su apoyo incondicional, por creer en mí, por sus esfuerzos constantes y también por compartir conmigo momentos de alegría, tristezas, éxitos y fracasos.

En segundo lugar, agradecer a la Corporación Autónoma del Cauca y a todos sus docentes que impartieron todos sus conocimientos profesionales a nosotros los cuales se ven reflejados en este trabajo con sus aportes.

En tercer lugar y no menos importante agradecer a la Dra. Adriana Lorena Sánchez Vergara, Dra. Nasly Delgado por su apoyo y comprensión y sobre todo agradecerle al Ing. Ronal Cerón por brindarnos ayuda, paciencia, tiempo y dedicación para asesorar el desarrollo de esta investigación, gracias por darme la oportunidad de trabajar con usted, un docente lleno de conocimientos y ante todo un gran ser humano.

***Juan Camilo Martínez Cerón***

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	X
<b>ABSTRACT</b> .....	XII
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1 CAPÍTULO I: PROBLEMA</b> .....	2
1.1 Planteamiento del Problema.....	2
1.2 Justificación .....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos .....	4
<b>2 CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO O REFERENTES CONCEPTUALES</b> .....	5
2.1 Bases teóricas .....	5
2.1.1 Generalidades.....	5
2.1.2 Tecnologías aplicables al tratamiento de Lixiviados.....	5
2.1.3 Tratamientos alternativos para lixiviados: centrifugado .....	10
2.1.4 Evaluación de eficiencia de tratamiento: turbiedad en términos de % remoción.....	10
2.2 Antecedentes.....	11
2.2.1 Tratamiento de lixiviados en Latinoamérica.....	11
2.2.2 Tratamiento de lixiviados en Colombia.....	12
<b>3 CAPÍTULO III: METODOLOGÍA</b> .....	14
3.1 Revisión bibliográfica .....	14
3.2 Criterios de selección de puntos de toma de lixiviado .....	14
3.3 Verificación del estado actual de operación de la planta de tratamiento de lixiviado.....	14
3.3.1 Toma de la muestra .....	14
3.3.2 Comprobación del tiempo de coagulación y floculación existente .....	15
3.4 Análisis de la muestra de lixiviado en laboratorio .....	15
3.4.1 Determinación de la turbiedad .....	15
3.4.2 Descripción del proceso de Coagulación .....	16
3.5 Proceso de centrifugado .....	17

3.5.1	Planificación del proceso de centrifugado.....	17
3.5.2	Registro y validación de resultados.....	17
3.6	Análisis de resultados.....	17
3.7	Análisis de la viabilidad técnica y económica .....	18
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....</b>	<b>19</b>
4.1	Combinación óptima en el tratamiento de lixiviados.....	19
4.1.1	Resultados para temporada de altas precipitaciones.....	19
4.1.2	Resultados para temporada de bajas precipitaciones .....	25
4.2	Validación técnica y económica del sistema de centrifugado .....	32
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>34</b>
5.1	Conclusiones .....	34
5.2	Recomendaciones .....	34
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>35</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Lagunas de tratamiento biológico de aguas residuales .....	6
Tabla 2. Tiempo de decantación de algunas partículas .....	7
Tabla 3. Diseño factorial de dos factores y tres réplicas .....	18
Tabla 4. Información del factor.....	20
Tabla 5. Resumen del modelo para altas precipitaciones.....	21
Tabla 6. Información de factores para temporada de bajas precipitaciones .....	27
Tabla 7. Resumen del modelo para bajas precipitaciones.....	28
Tabla 8. Predicción de respuesta múltiple .....	31



## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Turbiedad Vs dosificación de coagulante, muestra 1 .....	19
Gráfica 2. Turbiedad Vs dosificación de coagulante, muestra 2 .....	20
Gráfica 3. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	21
Gráfica 4. Residuos para porcentaje de remoción de turbiedad .....	22
Gráfica 5. Efectos principales para porcentaje de remoción de turbiedad. ....	23
Gráfica 6. Interacción porcentaje de remoción vs dosificación de coagulante .....	23
Gráfica 7. Optimizador de respuesta, época de altas precipitaciones .....	24
Gráfica 8. Porcentaje de remoción vs dosificación de coagulante y tiempo de centrifugado .....	25
Gráfica 9. Turbiedad Vs dosificación de coagulante, muestra 3 .....	26
Gráfica 10. Turbiedad Vs dosificación de coagulante, muestra 4 .....	26
Gráfica 11. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados. ....	27
Gráfica 12. Residuos para porcentaje de turbiedad.....	28
Gráfica 13. Efectos principales para porcentaje de remoción de turbiedad .....	29
Gráfica 14. Interacción porcentaje de remoción de turbiedad.....	30
Gráfica 15. Optimizador de respuesta, época de bajas precipitaciones .....	31
Gráfica 16. Porcentaje de remoción vs dosificación de coagulante y tiempo de centrifugado. ....	32

## RESUMEN

La generación de residuos sólidos a nivel mundial supone un gran problema, no solo por componerse de múltiples materiales con periodos de descomposición que llegan a ser miles de años y los gases efecto invernadero liberados, sino también por los lixiviados, líquido resultante de la percolación del agua lluvia y posterior mezcla con sustancias químicas provenientes de los residuos, dicho líquido se caracteriza por poseer altas cargas contaminantes representadas en DQO, carbono orgánico total, hidrocarburos aromáticos, presencia de metales pesados y sustancias tóxicas [1], [2].

La composición química y biodegradabilidad de los lixiviados es variable en el tiempo, es decir, en rellenos sanitarios en operación no mayor a 5 años, se les considera jóvenes y en caso de que el tiempo de operación sea mayor a 10 años serán considerados maduros, siendo esto confirmado con la baja biodegradabilidad de los mismos, es decir, cuando el contenido de DBO, DQO y otras sustancias sea bajo [3]; en el caso particular del relleno sanitario El Ojito, se genera lixiviado maduro el cual no está siendo tratado de manera adecuada generando la contaminación del río Cauca, receptor de este vertimiento.

Como alternativas de tratamiento de lixiviados a nivel mundial se tienen múltiples tecnologías las cuales han ido mejorando conforme los requerimientos normativos de cada país, en general se destaca el uso de procesos de coagulación – floculación adjunta a decantadores convencionales, lagunas de estabilización, procesos de oxidación tipo Fenton, sistemas de tratamiento nuevos como discos rotativos y decantadores acelerando de este modo la separación de los sólidos resultantes de un pretratamiento con sales coagulantes.

Debido a que el relleno sanitario El Ojito ya no recibe más residuos y sus vasos han sido cerrados, el lixiviado que este genera se considera maduro, por tanto, se determina la verificación y ajuste de dosificación del agente coagulante (Sulfato de Aluminio), adicionalmente se pretende evaluar la eficiencia en remoción de turbiedad utilizando, a escala laboratorio una máquina centrífuga sustituyendo el sedimentador convencional.

Se tomaron dos muestras de lixiviado, una en temporada de altas precipitaciones y otra en bajas, teniendo en cuenta la variabilidad climática de la zona de estudio; en el laboratorio se realizó un diseño factorial de tres réplicas, teniendo como factores la dosis de sulfato de aluminio y el tiempo de centrifugado; de este modo se evaluó la influencia de ambos factores en el volumen de lodos separados del proceso de centrifugación del lixiviado dejando en un nivel mínimo la turbiedad del mismo.

Como resultados principales se halló que la combinación de agentes coagulantes, específicamente sulfato de aluminio y el centrifugado es un tratamiento viable puesto que en temporadas de altas precipitaciones o con niveles de turbiedad dada en el rango de 26,4 a 39,1 NTU se logra remover hasta el 85% de la turbiedad del medio utilizando una dosificación aproximada de 300 mg/l y 2 minutos como tiempo mínimo de centrifugación; por otro lado, en temporadas de bajas precipitaciones, al no tener una variabilidad alta en la turbiedad inicial, la cual puede ir desde los 21,6 hasta 33,3 NTU con la aplicación de 800 mg/l de agente coagulante un 3 minutos de centrifugado es posible alcanzar remociones hasta de  $79,55\% \pm 0,45\%$ .

**Palabras clave:** *Lixiviado, centrifugado, decantación, remoción de turbiedad, relleno sanitario.*

## ABSTRACT

The generation of solid waste worldwide is a major problem, not only because it is composed of multiple materials with decomposition periods of up to thousands of years and the greenhouse gases released, but also because of the leachate, a liquid resulting from the percolation of rainwater and subsequent mixing with chemical substances from the waste. This liquid is characterized by high pollutant loads represented in COD, total organic carbon, aromatic hydrocarbons, presence of heavy metals and toxic substances [1], [2].

The chemical composition and biodegradability of leachates is variable over time, i.e., in landfills in operation for no more than 5 years, they are considered young and in case the operation time is more than 10 years they will be considered mature, this being confirmed by the low biodegradability of the same, i.e., when the content of BOD, COD and other substances is low [3]; In the particular case of the El Ojito sanitary landfill, mature leachate is generated which is not being adequately treated, generating the contamination of the Cauca river, the recipient of this discharge.

As leachate treatment alternatives worldwide, there are multiple technologies that have been improving according to the regulatory requirements of each country. In general, the use of coagulation-flocculation processes attached to conventional decanters, stabilization ponds, Fenton-type oxidation processes, new treatment systems such as rotating disks and decanters, thus accelerating the separation of solids resulting from pretreatment with coagulant salts, stand out.

Since the El Ojito landfill no longer receives waste and its vessels have been closed, the leachate generated is considered mature, therefore, the verification and adjustment of the dosage of the coagulating agent (Aluminum Sulfate) is determined; additionally, the efficiency of turbidity removal is evaluated using, at laboratory scale, a centrifuge machine replacing the conventional sedimenter.

Two leachate samples were taken, one in high rainfall season and the other in low rainfall season, taking into account the climatic variability of the study area; a factorial design of three replicates was carried out in the laboratory, having as factors the aluminum sulfate dose and the centrifugation time; in this way, the influence of both factors on the volume of sludge separated from the leachate centrifugation process was evaluated, leaving the turbidity of the leachate at a minimum level.

As main results, it was found that the combination of coagulating agents, specifically aluminum sulfate and centrifugation, is a viable treatment since in seasons of high rainfall or with turbidity levels in the range of 26.4 to 39.1 NTU, it is possible to remove up to 85% of the turbidity of the medium using a dosage of approximately 300 mg/l and 2 minutes as minimum centrifugation time; On the other hand, in low

rainfall seasons, since there is no high variability in the initial turbidity, which can range from 21.6 to 33.3 NTU, with the application of 800 mg/l of coagulant agent and 3 minutes of centrifugation, it is possible to achieve removals of up to 79.55%  $\pm$  0.45%.

**Key words:** Leachate, centrifugation, decantation, turbidity removal, sanitary landfill.

## INTRODUCCIÓN

El manejo de los residuos sólidos y la eliminación de los mismos son un gran problema en las áreas urbanas ya que son causantes de muchos problemas ambientales y afecciones a la salud humana por lo que la implementación de rellenos sanitarios se ha convertido en una de las técnicas más seguras para hacer una disposición controlada minimizando los efectos negativos, por esto nace en Colombia el decreto 1713 de 2002, el cual estableció todas las etapas de la gestión integral de los residuos sólidos, el decreto 1076 de 2015 y las resolución 631 de 2015 los cuales controlaran las cargas contaminantes vertidas a una fuente hídrica en este caso el líquido resultante por las descomposición y la percolación de las basuras denominado lixiviado, por ello los rellenos sanitarios como principal función figura la importancia de una disposición final controlada y que se puede llevar a cabo mediante planes de manejo que permitirá establecer acciones y medidas adecuadas para cumplir los objetivos del relleno sanitario y la normativa.

El tratamiento de los lixiviados es de vital importancia para el cuidado del medio ambiente y entre ello la salud humana. Hoy en día existen varias variables y sistemas de tratamiento enfocados en la clarificación y disminución de la carga contaminantes que este líquido puede llegar a presentar sin embargo de no ser tratados de una manera adecuada, los lixiviados pueden llegar a generar grandes problemas que pueden afectar a la salud humana, generando diferentes enfermedades las cuales se pueden adquirir por medio del contacto con aguas contaminadas, asimismo se afectaran diversos componente de la fuente hídrica que reciba las descargas de estos líquidos como la biota acuática y los suelos que estén en contacto los cuales modificaran sus características fisicoquímicas [4].

A raíz de lo anterior el presente documento contiene las medidas o acciones generales para el manejo y tratamiento ambiental adecuado a implementar en las diferentes etapas de la PTL, donde el tratamiento de lixiviados se realizará mediante diferentes técnicas, las cuales dependerán de la composición principal del lixiviado y de la disponibilidad técnica y económica del mismo relleno.

# 1 CAPÍTULO I: PROBLEMA

## 1.1 Planteamiento del Problema

La utilización excesiva de los recursos naturales conlleva a la generación de residuos que son llevados en el mejor de los casos a un relleno sanitario [5]. Mundialmente la producción de residuos sólidos genera afectaciones al ambiente específicamente al aire, suelo y agua, siendo esta última la mayor afectada por ser receptora de un subproducto llamado lixiviado, este posee altas cargas contaminantes en DQO (Demanda Química de Oxígeno), carbono orgánico total, hidrocarburos aromáticos, entre otros, que en muchos casos se encuentran concentraciones de sustancias tóxicas como hierro, manganeso y otros metales pesados [2], [3], sin embargo, dicha composición adjunta nuevos elementos depende del tipo de residuo depositado en el vaso [4], [5].

Normalmente los rellenos sanitarios por su extensión pueden presentar vasos con diferentes edades, la edad de los lixiviados presentes en estos se pueden clasificar en: jóvenes, intermedios y maduros. De acuerdo con esta edad también es la biodegradabilidad de los mismos. La edad de un lixivado puede determinarse con la concentración de variables fisicoquímicas como DBO (Demanda Biológica de Oxígeno), ST (Sólidos Totales), SDT (Sólidos Disueltos Totales), siendo estas altas en lixiviados jóvenes y menores en maduros [3].

Debido a la inadecuada gestión de los componentes fisicoquímicos, se generan afectaciones al ambiente y a la población aledaña, especialmente, de los sitios de disposición final de residuos, es así como en el caso del botadero de la ciudad de Buenaventura, Valle del Cauca, se han presentado casos de aumento de enfermedades respiratorias, infecciones diarreicas agudas e infecciones en la piel por entrar en contacto tanto con el agua de la quebrada “El Venado” a la cual se hace el vertimiento de lixiviados [4].

El relleno sanitario El Ojito de la ciudad de Popayán presenta inconvenientes con el tratamiento del lixivado proveniente de la descomposición de las basuras dispuestas en sus vasos debido a que el diseño de la planta de tratamiento estaba dispuesta para tratar lixiviados jóvenes, es decir, la dosis de sulfato de aluminio aplicable no es apta para el que se encuentra ahora, ya que pasó de ser un lixivado joven a uno maduro causando el vertimiento con cargas contaminantes superiores a los límites máximos permisibles.

El grado de biodegradabilidad de los lixiviados, es inversamente proporcional a su edad, siendo más biodegradables los jóvenes y menos los maduros, lo cual indica que presentarán mayor toxicidad [3] y serán más difíciles de sedimentar dado que

la dosis de sulfato de aluminio no es la más óptima, provocando que las cargas contaminantes vertidas sean mayores a las establecidas en la Resolución 0631 de 2015 [9] y el Decreto 1076 del 2015 [10] generando así, inhibición en la germinación de algunas plantas [11] presentes en la fuente hídrica sobre la cual se realizan los vertimientos en los que se hallan concentraciones de materia orgánica, macro componentes inorgánicos, metales pesados, compuestos xenobióticos, entre otros, que están afectando al río Cauca causando la disminución del oxígeno presente en el medio acuático, muerte de la biota y afecciones a las comunidades aledañas a la cuenca hídrica

## **1.2 Justificación**

El tratamiento de lixiviados es importante para la protección de la salud ambiental, en la actualidad existen muchas variables y sistemas de tratamiento enfocados en la clarificación y disminución de la carga contaminante que este líquido presenta, este puede realizarse mediante diferentes técnicas, que dependen de la composición principal del lixiviado y de la disponibilidad técnica y económica de quien desea implementar el sistema, es común que se priorice la disminución de la DBO, para ello es común utilizar reactores anaerobios los cuales gracias a sus características generan menores volúmenes de lodos y costes económicos, por otro lado, se utilizan reactores aerobios los cuales pueden llegar a tener remociones superiores al 90% de DBO, estos últimos utilizados principalmente en lixiviados jóvenes gracias a su mayor tasa de biodegradabilidad [6].

El tratamiento con procesos fisicoquímicos se ha popularizado ya que es de mayor efectividad y adicional a ello genera grandes remociones de contaminantes en periodos cortos de tratamiento, la floculación y coagulación con agentes metálicos permite la eliminación principalmente de sólidos en suspensión y de materia orgánica disuelta gracias a la desestabilización de las cargas [12], el sulfato de aluminio permite la formación de flóculos de gran densidad y por consiguiente de fácil sedimentación, de igual manera ayuda a una eliminación efectiva no solo de sólidos en suspensión, sino también la eliminación de algunos microorganismos [12].

Para la utilización de uno u otro agente coagulante es importante conocer la composición del fluido a tratar, en el caso del lixiviado es viable su utilización en concentraciones altas [13], sin embargo es posible concentraciones menores, debido a que en Colombia y en especial en el relleno sanitario El Ojito de la ciudad de Popayán, no se hace una gestión adecuada de las redes de transporte del lixiviado desde los vasos hasta la PTL, en esta sección es común que al sistema



ingresen, adicional a los aportes de los residuos, más sólidos y materiales externos contenidos en el agua de lluvia especialmente.

El planteamiento y realización del proyecto surge puesto que el diseño de la PTL en el relleno sanitario El Ojito de la ciudad de Popayán fue establecido para el tratamiento de lixiviado joven, por consiguiente, las dosis optimas no son las correctas debido a que el lixiviado presente en estos momentos en el relleno es maduro por ende se requiere un recalcu de las dosis de agente coagulante y tiempo de mezcla como consecuencia de que su biodegradabilidad es menor con respecto al joven y la sedimentación del mismo no será igual, con lo cual se pretende la implementación a escala laboratorio de una centrífuga para acelerar el proceso de separación del contenido de solidos presentes en el lixiviado [14] siendo viables tanto para alto contenido de material sedimentable como para bajo, aunque teniendo en cuenta que las eficiencias pueden variar según el tipo de centrifugado que se aplique [15], adicionalmente cabe resaltar que los lodos generados en este proceso se pueden recolectar de manera manual o mecánica.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Evaluar el proceso de coagulación, floculación y centrifugado como tratamiento de lixiviado maduro en el relleno sanitario El Ojito de la ciudad de Popayán.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Determinar la disminución de la turbiedad mediante la sedimentación de partículas formadas en los procesos de coagulación y floculación aplicado al lixiviado proveniente del relleno sanitario El Ojito de la ciudad de Popayán.
- Establecer los tiempos, las revoluciones y eficiencia del proceso del Centrifugado.
- Analizar la viabilidad técnica de la implementación del proceso de coagulación, floculación y centrifugado como tratamiento de lixiviado.

## 2 CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO O REFERENTES CONCEPTUALES

### 2.1 Bases teóricas

#### 2.1.1 Generalidades

**Relleno sanitario:** Un relleno sanitario es un sitio técnicamente seleccionado donde su principal función es el control y manejo adecuado de los residuos sólidos además de todos los subproductos que las basuras puedan generar como lo son las emisiones gaseosas y líquidas siendo estas potencialmente peligrosas para el ambiente [16], es por ello que los rellenos han estado en constante cambio desde tiraderos a cielo abierto, hasta relleno altamente tecnificados.

**Lixiviado:** El lixiviado es un subproducto generado por la descomposición de los residuos presentes el relleno sanitario, estos surgen gracias a las escorrentías dado a que las lluvias entran en contacto con los desechos y de esta manera sobrepasan su capacidad de absorción dando como resultado este líquido que presenta un gran riesgo de contaminación para los suelos, subsuelos y fuentes hídricas [17], es por ello que este líquido debe ser tratado de una manera adecuada para así mitigar el impacto que pueda llegar a generar al momento de ser vertidos a los diferentes sitios de disposición final.

#### 2.1.2 Tecnologías aplicables al tratamiento de Lixiviados

La descomposición de los desechos depositados en el relleno sanitario genera múltiples emisiones, una de ellas se conoce como lixiviados los cuales, como se ha mencionado anteriormente cuentan con una alta carga contaminante la cual debe ser removida para su correcta disposición al medio ambiente, en este sentido, a lo largo de los años se han diseñado múltiples tecnologías que permiten la eliminación de una gran parte de los agentes peligrosos presentes en esta agua, todas adaptadas a las condiciones del sitio en el que se instalarán como lo son el espacio disponible, el clima de la región, el presupuesto y las propias características del lixiviado; en los siguientes títulos se presentan algunas de las tecnologías que se utilizan de manera común en la descontaminación de los lixiviados.

##### 2.1.2.1 *Tratamiento Biológico*

Dentro de las alternativas de tratamiento de lixiviados predominan los biológicos teniendo en cuenta que, el líquido presenta altas cargas de materia orgánica; sin embargo se ha de considerar que estos tienen mayores niveles de eficiencia en lixiviados jóvenes por cuenta del alto contenido en ácidos grasos volátiles y relaciones  $DBO_5/DQO$  mayores a 0,4 [18]; ahora bien, de acuerdo con las

características propias del lixiviado a tratar y las necesidades de la industria se escogerá entre un sistema de degradación aerobio o anaerobio.

- Degradación Anaeróbica

Esta tecnología es recomendada para cargas contaminantes significativamente elevadas como las presentes en los lixiviados de un relleno sanitario, de acuerdo con Röben [1], el tratamiento anaeróbico logra la disminución considerable de contaminantes como DBO<sub>5</sub> y DQO, dejando como resultado concentraciones por debajo de la mitad de lo que originalmente se tenía.

- Lagunas

Las lagunas no se consideran al 100% una alternativa de tratamiento completo sino un pretratamiento, su amplia utilización se debe a que estas requieren una inversión relativamente baja, los costos operativos son casi nulos y su eficiencia es muy elevada; existen múltiples tipos de lagunas, estas se describen en la tabla 1.

*Tabla 1. Lagunas de tratamiento biológico de aguas residuales*

Laguna aerobia	Laguna de poca profundidad que mantiene oxígeno disuelto en todo el tirante de agua
Laguna aireada	Estanque natural o artificial de tratamiento de agua residual en el que se supe abastecimiento de oxigeno por aireación mecánica o aire comprimido
Laguna anaerobia	Laguna con alta carga orgánica en la cual se efectúa el tratamiento en ausencia de oxígeno disuelto, con la producción de gas metano y otros gases como el sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S). ¡La laguna anaerobia es un sistema de pre- tratamiento!
Laguna de estabilización	estanques construidos en tierra, de poca profundidad y periodos de retención considerable. En ellas se realizan de forma espontánea procesos físicos, químicos, bioquímicos y biológicos, conocidos con el nombre de autodepuración o estabilización natural.
Laguna de maduración	Laguna de estabilización diseñada para tratar efluente secundario o agua residual previamente tratada por un sistema de lagunas (anaerobia – facultativa – aireada – secundaria)
Laguna facultativa	Laguna de coloración verdosa cuyo contenido de oxígeno varía de acuerdo con la profundidad y hora del día. En el estrato superior de una laguna facultativa existe una simbiosis entre algas y bacterias, en presencia de oxígeno; en los estratos

	inferiores se produce una biodegradación anaerobia de los sólidos sedimentables.
--	--

Fuente: Autores

- Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA - FAFA).

EL reactor anaerobio de flujo ascendente se compone de una biopelícula fija con una cámara de digestión que cuenta con un flujo ascendente, dentro de este, a cierta altura se desarrolla un manto de lodos anaerobios altamente activos los cuales se encargan de realizar la estabilización de la materia orgánica hasta convertirla en metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) [19].

- Coagulación- floculación

Dentro de los procesos fisicoquímicos comunes en el tratamiento de aguas se destaca la coagulación-floculación, esta utiliza la acción de un agente químico metálico el cual forma aglomeraciones de partículas permitiendo la remoción de materia orgánica, cargas coloidales y material sedimentable de difícil eliminación [2]. Se precisa la utilización de la coagulación - floculación a modo de agilizar los tiempos de tratamiento de aguas residuales por cuenta de sustancias disueltas que, por poseer cargas de igual signo son de difícil remoción por otros procesos; a modo de ejemplo, en la tabla 2 se muestran algunos tiempos de decantación no forzada para diferentes partículas en 1 m de profundidad.

*Tabla 2. Tiempo de decantación de algunas partículas*

<b>Diámetro en micras (µm)</b>	<b>Tipo de partícula</b>	<b>Tiempo</b>
<10	Arcillas	2 horas
10 a 1	Bacterias	8 días
1 a 0,1	Coloides gruesos	2 años
0,1 a 0,001	Coloides finos	20 años

Fuente: [2]

Barrenechea Martel [20] describe que las partículas coloidales al tener estructuras levemente diferentes poseen ciertas propiedades que modifican su comportamiento dentro del líquido en el que se encuentren, así como también el proceso de tratamiento que se aplique para su remoción; las propiedades básicas de los coloides son las cinéticas, ópticas, superficie y electrocinéticas.

Las propiedades cinéticas refieren a la modificación del comportamiento de las partículas dentro del agua dentro de las cuales se encuentran las siguientes:

**Movimiento Browniano:** este es el movimiento irregular y constante que presentan las partículas coloidales en estado líquido, se caracteriza por ser directamente proporcional a la temperatura del medio, es decir, cuanto más calor exista en el líquido asimismo será el movimiento de las partículas; es de apreciar que este solo explica la estabilidad de las partículas coloidales pequeñas, para partículas de mayor tamaño, se describe la estabilidad con el estudio de las corrientes de convección termal y las velocidades bajas de sedimentación.

**Difusión:** conforme al movimiento, las partículas se dispersan en el medio, teniendo entonces que la velocidad de difusión es menor a la velocidad media en el movimiento browniano.

**Presión osmótica:** se explica mediante la capacidad de paso entre un disolvente, en este caso agua, pasa a través de una membrana que separa el contenido coloidal presente en el líquido; la presión osmótica es, por tanto, la presión hidrostática necesaria para detener el flujo alcanzando un sistema en equilibrio.

De otro lado, dentro de las propiedades ópticas predomina el efecto Tyndall-Faraday, descrito como la capacidad de dispersión de la luz que tienen los coloides disueltos en un líquido; aunque no se relacione directamente con el tamaño y masa de las partículas, este efecto se utiliza para medir la turbiedad de un medio acuoso [20].

Las partículas coloidales, de acuerdo con [20], “se caracterizan por tener una gran superficie específica, definida como la relación entre el área superficial y la masa”. Galvín [2] establece que la carga superficial de las partículas tiene una influencia significativa sobre el proceso de coagulación – floculación, esta se adquiere por rotura de estructuras cristalinas, sustitución isomorfa o reemplazo de iones en la estructura del coloide; por otro lado, en el caso de las proteínas, la carga superficial se adquiere mediante ionización de los grupos carboxilo y amino superficiales.

La estabilidad coloidal está determinada por diferentes factores y fuerzas las cuales son susceptibles de modificación, dentro de las fuerzas de estabilización se encuentran,

**Carga eléctrica:** los coloides y la mayoría de las partículas húmicas presentan una carga eléctrica superficial que depende de tres procesos, el primero se describe como la capacidad de donar o recibir protones, aunque esta depende de la concentración de iones ( $H^+$ ), de tal manera que depende del pH del agua.

La segunda característica depende de la capacidad de reacción, además de con protones, con otros solutos formando complejos y reacciones químicas específicas en las superficies de las partículas.

Finalmente, las cargas se modifican en función de las imperfecciones de la estructura molecular de las partículas.

**Doble capa eléctrica:** puesto que en la superficie de las partículas en suspensión se encuentra una capa eléctrica de carga negativa, adjunta a esta se encuentra un grupo de iones positivos que forman una doble capa eléctrica; en la figura 1 se esquematiza este fenómeno.

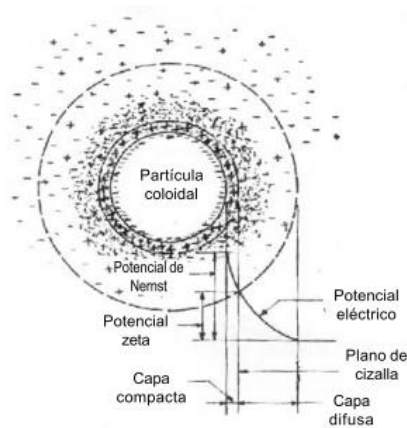


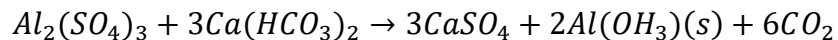
Figura 1. Configuración esquemática de la doble capa eléctrica

#### 2.1.2.2 Agentes facilitadores de la precipitación química

En el tratamiento de aguas, ya sean de origen doméstico o industrial se cuenta con contenidos de sólidos coloidales los cuales por su tamaño resultan de difícil sedimentación, para ello, mediante la adición de agentes coagulantes se modifica la doble capa de estas partículas facilitando la eliminación de las mismas al formar partículas de mayor tamaño o flóculos [21], de acuerdo con Marín Galvín [2], los agentes metálicos más utilizados y las reacciones en este proceso son:

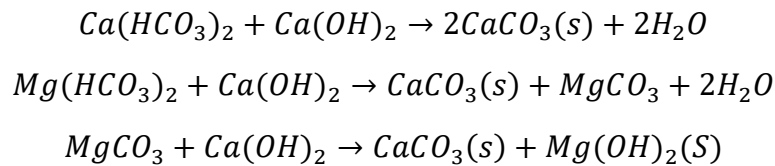
- Alúmina

“El sulfato de aluminio, sólido o en solución, es el producto químico coagulante convencional usado en el tratamiento del agua en la etapa de clarificación” [22], la adición de aluminio genera un precipitado gelatinoso que arrastra otros materiales, la reacción global que ocurre en este caso es,



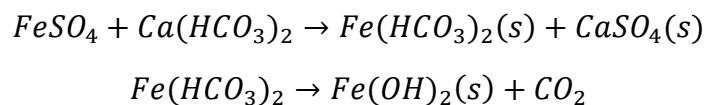
- Cal

La reacción, tanto en forma de hidróxido o de óxido se esquematiza como,

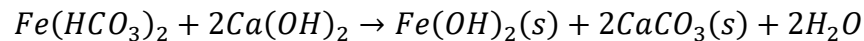


- Sulfato ferroso

Este agente coagulante se utiliza principalmente en agua con alcalinidad elevada ya que no es posible utilizar otro tipo de agentes, la reacción para este caso se describe de la siguiente manera,



En caso de presentar baja alcalinidad en el agua, se hace una dosificación conjunta cal y sal de hierro, de tal modo que se genera la siguiente reacción:



### 2.1.3 Tratamientos alternativos para lixiviados: centrifugado

La centrifugación es la separación de partículas específicas en una solución. El término partícula involucra sustancias disueltas y partículas de tamaño microscópico y macroscópico que se encuentran suspendidas en un fluido que usualmente es agua y en este caso lixiviado [23]. El lixiviado es el resultado de la descomposición de las basuras y de las precipitaciones, por ende, es un líquido que está totalmente contaminada y es por ello que el uso de la centrifugación puede dar resultados óptimos en el tratamiento de los lixiviados ya que presentan una composición muy variada, donde se podrá ejercer esta fuerza para separar todas aquellas partículas que están dispersas en el líquido y esto a consecuencia de que estas al ser sometidas a altas velocidades se verán obligadas a sedimentarse.

### 2.1.4 Evaluación de eficiencia de tratamiento: turbiedad en términos de % remoción.

Según [24], [25] la turbiedad mide el nivel de transmisión de luz en el agua, y sirve como una medida de la calidad del agua en relación a materia suspendida coloidal y residual.

El lixiviado al ser una mezcla de los componentes anteriormente nombrados, presenta elevados niveles de turbiedad la cual indica un alto grado de contaminación y es por ello que se hace necesario emplear métodos fisicoquímicos para hacer una remoción óptima de las partículas suspendidas en el medio; los métodos complementarios para llevar a cabo esta actividad son la coagulación – floculación con ayuda de agentes metálicos principalmente sulfato de aluminio el cual se encarga de, mediante la desestabilización de las cargas, aglomerar las partículas coloidales formando flóculos de mayor tamaño y masa, por tanto más fáciles de sedimentar.

Como proceso adicional, se ha desarrollado el proceso de centrifugación, este, mediante el aumento de la fuerza de gravedad dentro del equipo separa el medio sólido del líquido [14], obteniendo de esta manera una gran disminución de la turbiedad y por ende un ligero aumento de la calidad del agua para así ser vertida en los diferentes puntos de disposición final mitigando el impacto ambiental generado por estas.

## **2.2 Antecedentes**

### **2.2.1 Tratamiento de lixiviados en Latinoamérica**

El tratamiento de los lixiviados es una parte fundamental en la gestión de los residuos donde se presentan algunas técnicas usadas para llevar a cabo dicho proceso, por ejemplo en América Latina se ha estudiado la viabilidad de la utilización de nuevos agentes coagulantes dando surgimiento a procesos como el método Fenton, que consiste en un tratamiento de los lixiviados mediante una desestabilización de sus cargas contaminantes con agua oxigenada ( $H_2O_2$ ) combinado con  $FeSO_4$  [26], como es el caso de México, en el que se determinó la eficiencia del proceso arrojando resultados de remociones superiores al 98% de DQO y eliminación total del color combinando el proceso Fenton con filtraciones y sedimentaciones [26].

Este mismo proceso de postratamiento se ha utilizado en Perú teniendo en cuenta la variabilidad climática de la zona tropical, es decir, se realizó la determinación de las dosis óptimas de reactivo fenton para época de altas y bajas precipitaciones encontrando así un indicador de biodegradabilidad, de 0,568 para época de altas precipitaciones y de 0,329 en época de bajas precipitaciones [27].

De acuerdo con algunos estudios, se ha determinado que la oxidación fenton tiene un tiempo de contacto óptimo de 20 minutos y pH ácido, es decir, menor a 4 unidades, adicional a ello, por lo tanto se recomienda que las concentraciones para  $H_2O_2$  sean de 600 mg/L y 1000 mg/L de Fe [28].

En el año 2002 se propuso el tratamiento de lixiviados con carbón activado, como caso particular en el relleno sanitario de la ciudad de Mérida, el material de cubierta



de los residuos funcionaba como un filtro eliminando los sólidos mayores a 23  $\mu\text{m}$  dejando así, inviable la utilización de procesos de coagulación, floculación y sedimentación, adicional a esto se anotó que las condiciones para que el carbón activado tuviese mayor eficiencia debe contar con un medio ácido, especialmente menor a 2 unidades de pH [29].

La potencialidad de coagulación de otros elementos y la necesidad de reducir costes, impulsó la evaluación del potencial coagulante de diferentes mezclas para el tratamiento de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios, es así que [30] realizó una serie de mezclas de almidón de plátano con sulfato de aluminio y arcillas, obteniendo como resultado remociones significativas en la carga contaminante del lixiviado estudiado, concluyendo que los coagulantes convencionales por si solos cuentan con una mayor eficiencia.

En cuanto a la remoción de unidades de turbidez, se ha hallado que el sulfato de Aluminio posee mayor eficiencia, siendo este comparado con óxido de calcio y sulfato de hidroxidocloruro, teniendo en cuenta que el sulfato de aluminio presenta mayor porcentaje de remoción en los lixiviados [31].

De igual manera, se ha procurado la optimización del proceso de sedimentación de los sólidos generados por los procesos de coagulación y floculación, de manera que en primer lugar la eliminación de estos sea más rápida, particularmente se ha optado por la utilización de procesos de centrifugado los cuales aumentan dentro del equipo la fuerza de gravedad desde 1000 hasta 20000 veces facilitando la separación de sólidos demasiado pequeños presentes en las mezclas acuosas o gaseosas [16], [17], así, para facilitar la precipitación hasta de un 50% de las partículas finas menores a 10  $\mu\text{m}$  en gases [32], la aplicación de ciclones y procesos de centrifugación en tratamiento de aguas queda por ser estudiado, sin embargo basando la investigación en lo propuesto por Ramachandran, O., Raynor, P. C., & Leith, D., es posible la construcción de un prototipo que elimine las partículas de cualquier tamaño.

### 2.2.2 Tratamiento de lixiviados en Colombia

En Colombia los estudios para el tratamiento de lixiviados han ido variando de acuerdo con la composición específica de cada relleno sanitario estudiado, para el caso del relleno sanitario Doña Juana, localizado en la ciudad de Bogotá, en el que se propuso el uso del óxido de grafeno como agente coagulante para sustituir el PAC, sin embargo, los resultados para remoción de DQO fueron muy similares [33].

En el caso del relleno sanitario La Pradera - Medellín se estudió la viabilidad sobre la implementación de un sistema de contactores biológicos rotativos de los cuales, a escala piloto, lograron remociones en sólidos suspendidos totales del 90%, DQO superior al 95% y  $\text{DBO}_5$  una remoción de 70% [34].

En el diseño del sistema de tratamiento de lixiviados del Parque Ambiental Los Pocitos de la ciudad de Barranquilla, como parte del tratamiento primario, para la remoción de sólidos en suspensión, al igual que en la mayoría de los casos en tratamientos de agua, se utilizan lagunas de sedimentación las cuales reducen en un 30% los sólidos totales y un 5% en relación a DBO5 y DQO; sin embargo y aunque funciona por acción de la gravedad, se hace necesario utilizar un sistema de bombeo que transporta el lixiviado a un tanque precipitador de metales en el que el agua ingresa por la parte superior, con ayuda de una elevación de pH se precipitan los metales por gravedad y finalmente se extrae el líquido por la parte superior del tanque llevándolo a un tanque homogeneizador en el que se acondiciona el lixiviado para poder utilizar un tratamiento biológico [35].

La variabilidad en la carga de DQO en el lixiviado resultante de la descomposición de los residuos dispuestos en el relleno sanitario El Guayabal de la ciudad de Cúcuta permitió el estudio de la implementación a escala laboratorio de un sistema de biodiscos y un sistema anaerobio UASB alcanzando eficiencias superiores al 70% en su remoción con biodiscos y dejando el reactor UASB con resultados muy variables [36].

En Popayán – Cauca, el relleno sanitario El Ojito cuenta con un sistema de tratamiento de lixiviados conformado por una laguna de estabilización, un sistema de coagulación/floculación que funciona con los cambios de velocidad del fluido dentro de tanques ubicados con cambios bruscos de profundidad y finalmente un tanque de sedimentación; se utiliza sulfato de aluminio como agente coagulante para remover el material coloidal y la carga de DBO y DQO, este proceso se ha llevado a cabo sin sufrir modificaciones significativas desde el inicio de operación de la planta de tratamiento de lixiviado (PTL) y del relleno sanitario.

Actualmente se pretende la modernización y optimización del sistema, para lo cual se ha propuesto la implementación de un sistema de centrifugado que elimine las partículas de menor tamaño presentes en el lixiviado y, por consiguiente, conseguir reducir al máximo los valores de turbidez en el afluente.

### **3 CAPÍTULO III: METODOLOGÍA**

#### **3.1 Revisión bibliográfica**

Para el desarrollo del proyecto se establecieron bases teóricas, antecedentes y bases legales que soportaron y dieron guía para la elaboración del diseño experimental, para dicha búsqueda se utilizaron palabras claves como “TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS”, “RELLENO SANITARIO” “CENTRIFUGADO INDUSTRIAL” “SEPARACIÓN Y FILTRACIÓN”, entre otras, las cuales se buscaron en bases de datos especializadas como EBSCO Host, Dialnet, Scielo, ScienceDirect, Redalyc, bases de datos de universidades nacionales e internacionales y de organizaciones internacionales especializadas en el manejo de vertimientos, enfocando la temática al tratamiento y gestión de lixiviados producidos en rellenos sanitarios.

#### **3.2 Criterios de selección de puntos de toma de lixiviado**

La planta de tratamiento de lixiviado (PTL) se localiza a 2° 28' 00,83" N y 76° 39' 01,91" W dentro del relleno sanitario El Ojito, cuenta con tres procesos, siendo uno de ellos la laguna de estabilización, punto de recibimiento del caudal total de lixiviado generado por los residuos sólidos almacenados en los vasos ya sellados, ya que se planteó la optimización del sistema de tratamiento de lixiviado se tomaron las muestra en esta zona, de igual manera una de las condiciones para realizar esta selección es que en este lugar aún no se ha agregado ningún tipo de agente químico que altere la composición total del lixiviado.

#### **3.3 Verificación del estado actual de operación de la planta de tratamiento de lixiviado**

##### **3.3.1 Toma de la muestra**

La muestra para el análisis se realizó en la tubería que recolecta el Lixiviado de todos los vasos presentes en el relleno, esta descarga en la laguna de estabilización de la cual se tomó la muestra, teniendo todas las medidas de protección específicas tales como: guantes látex industrial, botas con suela gruesa de goma, mascarilla industrial N95 y mono gafas; para esta toma se utilizó un balde de plástico de nueve litros cuyo contenido se pasó a 6 garrafas de plástico con tapa y sello hermético con capacidad de 20 litros debidamente rotuladas cada una. Posteriormente se

trasladaron al laboratorio de la Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, en vehículo particular hasta el sitio en mención, el almacenamiento temporal se realizó en este lugar con condiciones libres de luz y de calor.

### 3.3.2 Comprobación del tiempo de coagulación y floculación existente

Debido a que las condiciones del relleno sanitario no son posibles de cambiar, con la ayuda del conductímetro HANNA INSTRUMENTS HI 8733 se tomó el tiempo de coagulación y floculación existente en el relleno sanitario el ojito.

La prueba inicio en el punto de descarga de la laguna de estabilización al coagulador en donde se captó en primer lugar la conductividad inicial del medio, seguido de esto, el conductímetro se localizó en la salida del coagulador en donde se tomó el tiempo que tarda en pasar la sal (alterar la conductividad del medio); este procedimiento se repetirá en el punto de floculación/sedimentación de la PTL.

## 3.4 Análisis de la muestra de lixiviado en laboratorio

### 3.4.1 Determinación de la turbiedad

Una vez adquirida la muestra, se extrajo una alícuota (muestra de la muestra) de la cual se eligió una muestra blanco (muestra sin tratar) de 15 ml (ver ilustración 1) para la determinación de la turbiedad y el potencial de hidrógeno (pH) iniciales presentes en esta, para ello se utilizaron los equipos: turbidímetro HACH 2100Q, configurado según standard methods [37] para turbiedad y pHmetro marca METTLER TOLEDO S220 SEVEN COMPACT, para el pH.

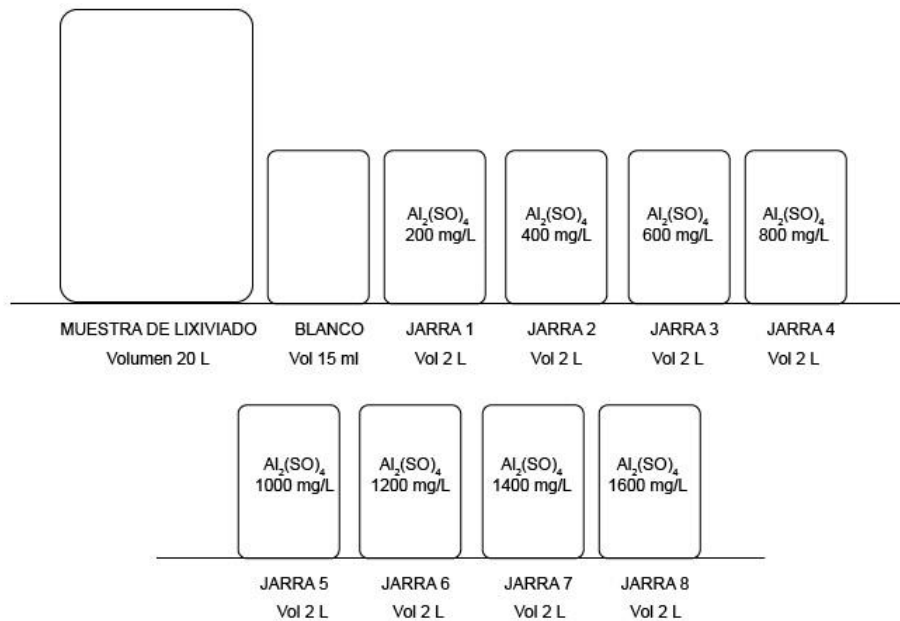


Figura 2. Diseño de la prueba de jarras para la temporada de altas precipitaciones.

### 3.4.2 Descripción del proceso de Coagulación

Una vez obtuvo la turbidez de la muestra, se determinó la dosis óptima de Sulfato de Aluminio tipo A mediante la toma de otras 8 alícuotas del Lixiviado sin tratar, cada una de 2 L vertidas en los recipientes del equipo VELP SCIENTIFICA FC4S para prueba de jarras determinando un rango del agente coagulante, dentro del cual se generan remociones superiores al 80% de la turbiedad presente en el líquido.

Las dosis de Sulfato de Aluminio tipo A ( $Al_2(SO_4)_3$ ) se fijaron utilizando la balanza de precisión RODWAG WTC 2000, en un rango comprendido entre 200 mg/L y 1600 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$ , como se muestra en la figura 2; el tiempo correspondiente al proceso de coagulación y floculación se establecerá conforme al obtenido mediante la prueba de trazadores realizada en el relleno sanitario El Ojito.

Este ejercicio de determinación de dosis de coagulante se realizó dos veces, una en época de altas precipitaciones y la segunda en época de bajas precipitaciones, debido a que la composición del lixiviado sufre algunas alteraciones por cuenta del volumen de agua que este contiene, y por consiguiente la cantidad de material coloidal disuelto en él; las concentraciones de dosis de sulfato de aluminio para época de bajas precipitaciones se asignaron en rangos distintos a los aquí expresados, esta descripción se realizó para temporadas de altas precipitaciones.

Se analizaron los datos antes y después de realizar el procedimiento de pruebas de jarras y turbiedad, se establecieron los porcentajes de remoción y se verificó cuál

de ellos resulto ser el más apropiado y cercano a lo que indica la normatividad vigente: Decreto 1076 y Resolución 0631, ambos expedidos en el año 2015 [7], [8].

### **3.5 Proceso de centrifugado**

#### **3.5.1 Planificación del proceso de centrifugado**

El proceso se llevó a cabo una vez obtenido el rango de sulfato de aluminio óptimo para el tratamiento del lixiviado maduro tanto en la época de lluvia como en la época de bajas precipitaciones, en este se utilizó la centrifuga variando el tiempo de operación de esta, se tomaron cuatro alícuotas, acordes con el rango del agente coagulante, cada una de 14 ml las cuales se insertaron de manera equilibrada. El tiempo evaluado inicio en un minuto hasta llegar a cinco minutos, en los cuales para cada tiempo se tomó cuatro muestras cada vez.

#### **3.5.2 Registro y validación de resultados**

Posterior al centrifugado a cada alícuota se le elimino el agua presente en esta, con ayuda de la balanza se obtuvo la masa del material solido separado y el contenedor, a este resultado resto la masa de uno de los contenedores vacíos con el fin de determinar la masa final de sólidos eliminados en cada alícuota.

### **3.6 Análisis de resultados**

Los datos registrados se analizaron mediante el procesamiento estadístico utilizando el programa Minitab 18, para ello se realizó un diseño factorial de múltiples factores con tres réplicas, teniendo como factores la dosis de sulfato de aluminio y el tiempo de centrifugado; de este modo se evaluó la influencia de ambos factores en el volumen de lodos separados del proceso de centrifugación del lixiviado dejando en un nivel mínimo la turbiedad del mismo.

En la tabla 3 se detalla la combinación de factores y los resultados expresados en unidades nefelométricas de turbidez, se hizo una combinación entre un rango de sulfato de aluminio seleccionado previamente en la prueba de jarras con cinco tiempos de centrifugado los cuales iniciarán en 1 minuto y finalizarán en 5 minutos.

*Tabla 3. Diseño factorial de dos factores y tres réplicas*

Dosificación sulfato de aluminio	Tiempos de centrifugado				
	T1	T2	T3	T4	T5
D1	NTU1a	NTUna	NTUna	NTUna	NTUna
	NTU1b	NTUnb	NTUnb	NTUnb	NTUnb
	NTU1c	NTUnc	NTUnc	NTUnc	NTUnc
D2	NTU2a	NTUna	NTUna	NTUna	NTUna
	NTU2b	NTUnb	NTUnb	NTUnb	NTUnb
	NTU2c	NTUnc	NTUnc	NTUnc	NTUnc
Dn	NTUna	NTUna	NTUna	NTUna	NTUna
	NTUnb	NTUnb	NTUnb	NTUnb	NTUnb
	NTUnc	NTUnc	NTUnc	NTUnc	NTUnc

### **3.7 Análisis de la viabilidad técnica y económica**

Una vez obtenidos los resultados de ambas temporadas (altas y bajas precipitaciones), se realizó un análisis técnico y económico que permitió establecer si los procesos realizados en el laboratorio son óptimos para el tratamiento adecuado de lixiviados maduros mediante la revisión de precios, porcentaje de remoción de turbiedad y sobre todo si la máquina de centrifugado cumple con los estándares establecidos en la normativa colombiana.

## 4 CAPÍTULO IV: RESULTADOS

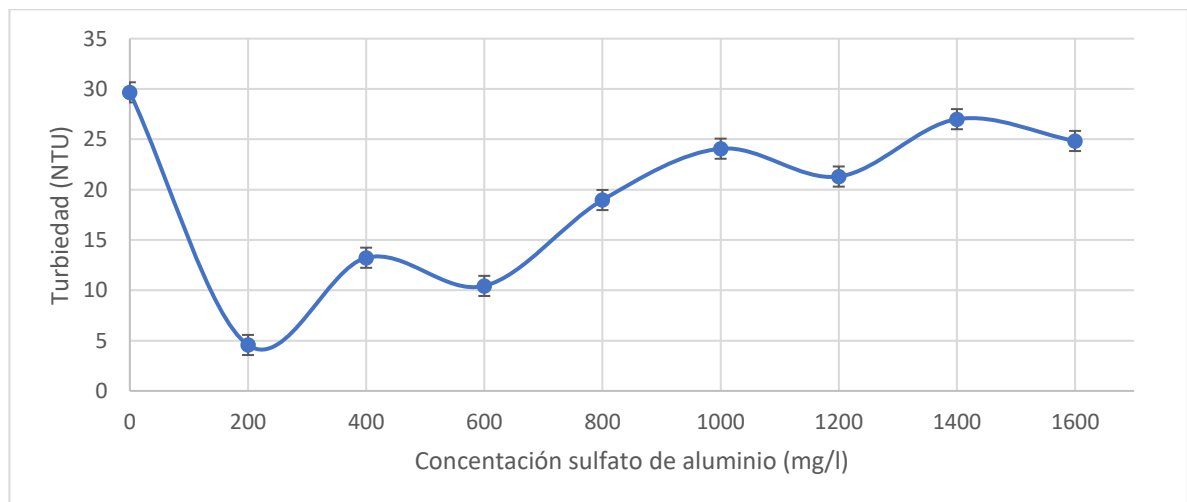
### 4.1 Combinación óptima en el tratamiento de lixiviados

#### 4.1.1 Resultados para temporada de altas precipitaciones

##### 4.1.1.1 Determinación de la dosificación óptima sin proceso de centrifugado

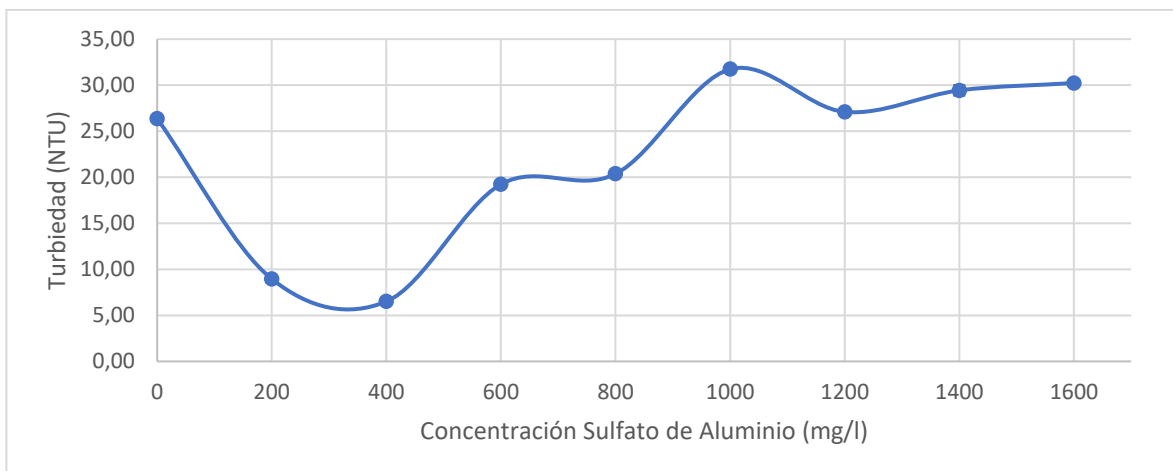
El proceso de coagulación y floculación tiene como variables tres tiempos fundamentales para lograr la eficiencia en el, estos son el tiempo de mezcla rápida o tiempo de disolución del floculante, en segunda instancia se encuentra el tiempo de floculación necesario para que los coloides, mediante la acción de las fueras de Van de Waals [38] se unan formando partículas de mayor tamaño y se facilite su precipitación y finalmente el tiempo de sedimentado, en este caso, se han utilizado los datos de operación del sistema obtenidos mediante una prueba de trazadores los cuales son 3:20 minutos en coagulación, 30 minutos en floculación y 12 horas de sedimentación.

El tratamiento de lixiviados supone grandes retos e investigaciones, en este sentido, el relleno sanitario El Ojito de la ciudad de Popayán, en época de altas precipitaciones ocurrida en los meses de enero a marzo presentó niveles de turbiedad comprendidos entre 26,4 y 29,1 Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU), de este modo se procedió a determinar un rango de dosis, como se muestra en las gráficas 1 y 2.



Gráfica 1. Turbiedad Vs dosificación de coagulante, muestra 1





*Gráfica 2. Turbiedad Vs dosificación de coagulante, muestra 2*

Como se aprecia en las gráficas 1 y 2, para concentraciones de sulfato de aluminio mayores a 800 mg/l estos tiempos de operación son ineficientes causando un aumento en la turbiedad ya que no se completa de manera adecuada el proceso de coagulación y floculación, sin embargo, con concentraciones inferiores a 600 mg/l si se tiene una disminución significativa de la turbiedad cumpliendo parcialmente el objetivo de este proceso; teniendo en cuenta la variación de la turbiedad entre la primera muestra y la segunda, las cuales se tomaron con dos semanas de diferencia, se estableció un rango de 200 a 500 mg/l como dosis de sulfato de aluminio de tal modo que la turbiedad se reduzca en más del 80% asegurando así una disminución de otros parámetros asociados a la presencia de coloides y materia orgánica disuelta en el lixiviado.

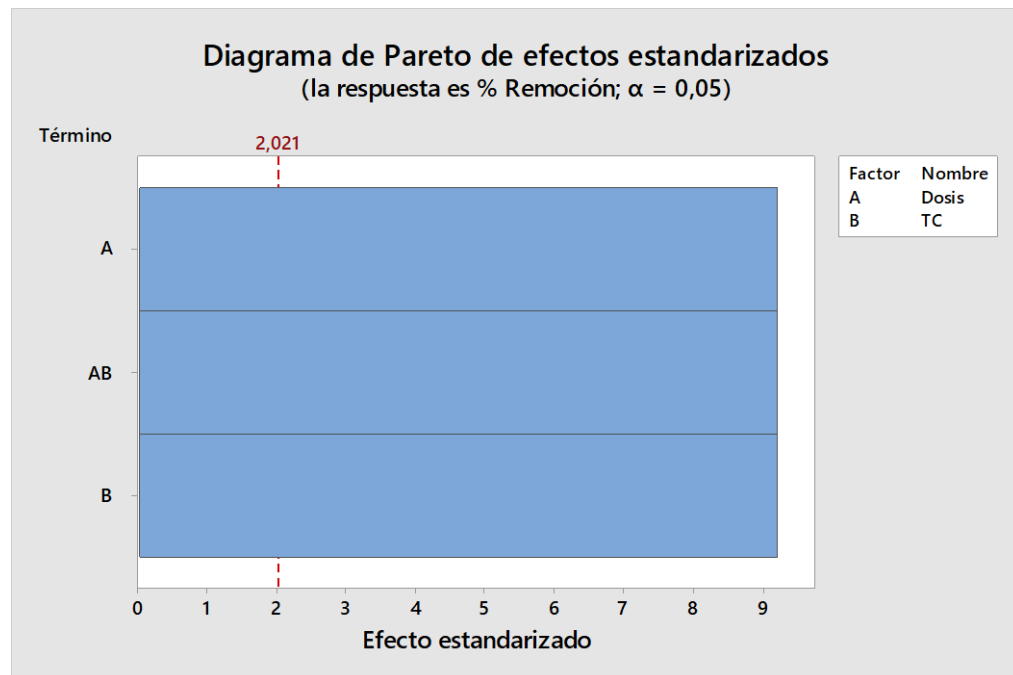
#### *4.1.1.2 Estudio de remoción máxima incluyendo el proceso de centrifugado*

En el análisis de laboratorio se realizó en tres replicas entrelazando los dos factores: dosificación de Sulfato de Aluminio tipo A y Tiempo de centrifugado con gradiente de velocidad o revoluciones constantes, teniendo como variable de respuesta el porcentaje de remoción de turbiedad, los niveles de cada factor se detallan en la tabla 4.

*Tabla 4. Información del factor*

<b>Factor</b>	<b>Abreviación</b>	<b>Unidades</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>
Dosificación $AL_2(SO_4)_3$	Dosis	mg/l	4	200; 300; 400; 500
Tiempo de centrifugado	TC	min	5	1; 2; 3; 4; 5

En el diseño planteado se estudia la incidencia individual de cada factor, así como también la incidencia de la combinación de ambos factores sobre el porcentaje de remoción de turbiedad, siendo, de acuerdo al diagrama de Pareto (gráfica 3) tanto los factores individuales como su interacción tienen un efecto significativo dentro del proceso estudiado, esto determinado por su lejanía de la línea de referencia localizada en el punto 2,021 de efecto estandarizado teniendo un intervalo de confianza de 95% o un valor alfa  $\alpha = 0,05$ , lo cual permite la continuación con el análisis del diseño sin la eliminación de algún factor o interacción entre factores.



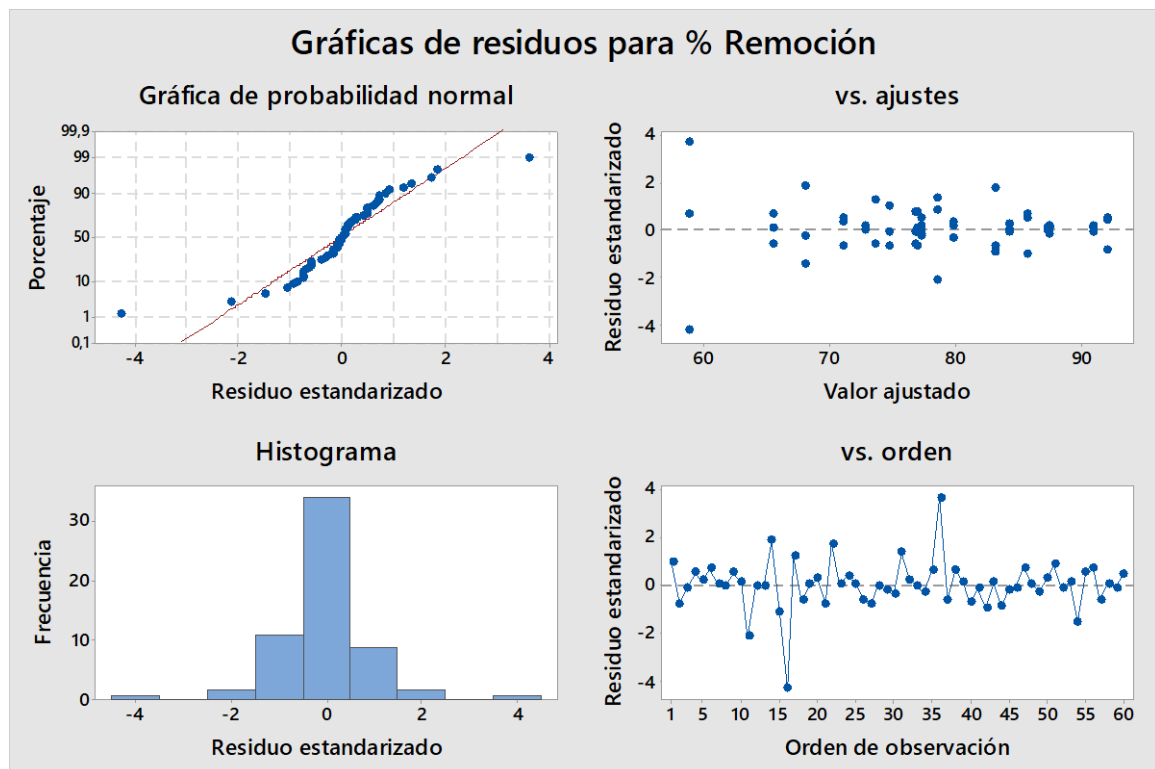
Gráfica 3. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

El diseño factorial, de acuerdo con la tabla 5. Resumen del modelo presenta una varianza de 0,4704 NTU, dejando de este modo una certeza superior al 99%, por tanto, se dice que el modelo tiene un ajuste entre los datos lo cual es corroborado con la gráfica de probabilidad normal dentro del gráfico 4, lo cual indica una correlación de los datos tomados de manera experimental.

Tabla 5. Resumen del modelo para altas precipitaciones

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,470428	99,79%	99,69%	99,53%

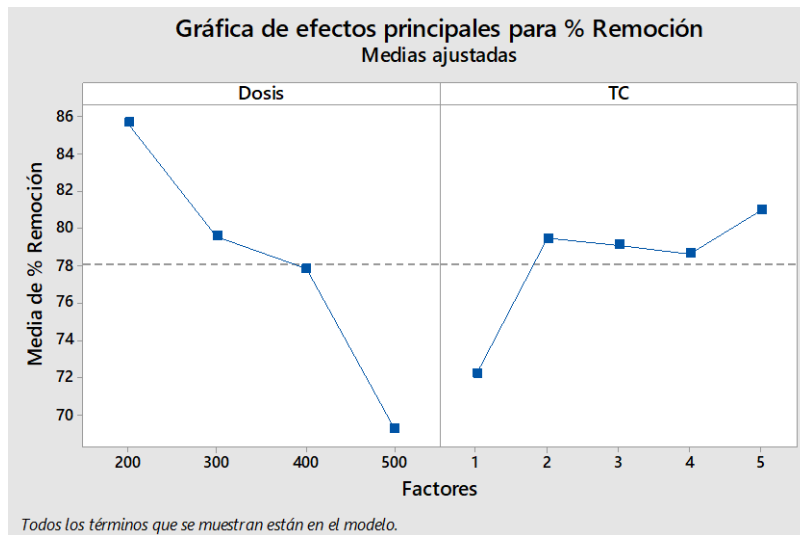
Por otro lado, de acuerdo con las gráficas vs. Ajustes y vs orden dentro del gráfico 4 se cumple que los datos tomados no tienen un orden específico, es decir no cumplen un orden específico ya sea creciente o decreciente, teniendo por tanto una independencia entre las 60 muestras tomadas.



Gráfica 4. Residuos para porcentaje de remoción de turbiedad

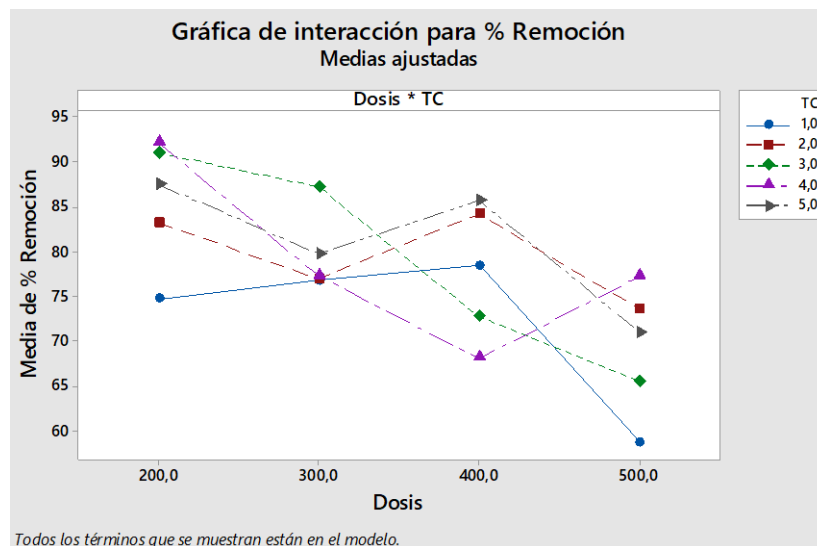
Ahora bien, se ha determinado una relación directa sobre el porcentaje de remoción de turbiedad presente en el lixiviado, por su parte según la gráfica 5, se aprecia que, en términos independientes, al aumentar la dosificación se obtienen remociones menores, siendo las dosificaciones inferiores a 400 mg/L las que si logran superar la media de 78% en remoción de turbiedad.

Por su parte el tiempo de centrifugado se observa un efecto positivo aumentando de uno a dos minutos, sin embargo, este se reduce al aumentar de dos a 4, aunque igual logrando superar la media de remoción de turbiedad para la temporada de altas precipitaciones de 78% aproximadamente.



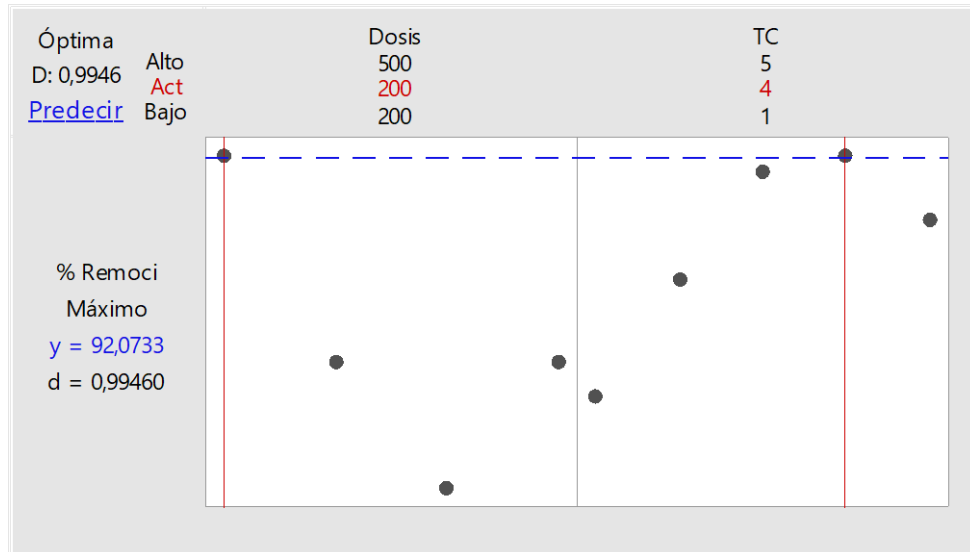
Gráfica 5. Efectos principales para porcentaje de remoción de turbiedad.

De acuerdo a la gráfica de interacción entre la variable de respuesta y los factores (gráfica 6), se ha determinado que aplicando dosificaciones bajas se puede obtener una remoción superior a la media, teniendo en cuenta que para lograr esta meta es necesario contar con tiempos de sedimentación superiores a 3 minutos, lo que en términos económicos podría suponer un reto pues aunque el proceso cumpla con las expectativas propuestas, se generará un gasto energético alto y por consiguiente afectaría el presupuesto de operación del relleno sanitario.



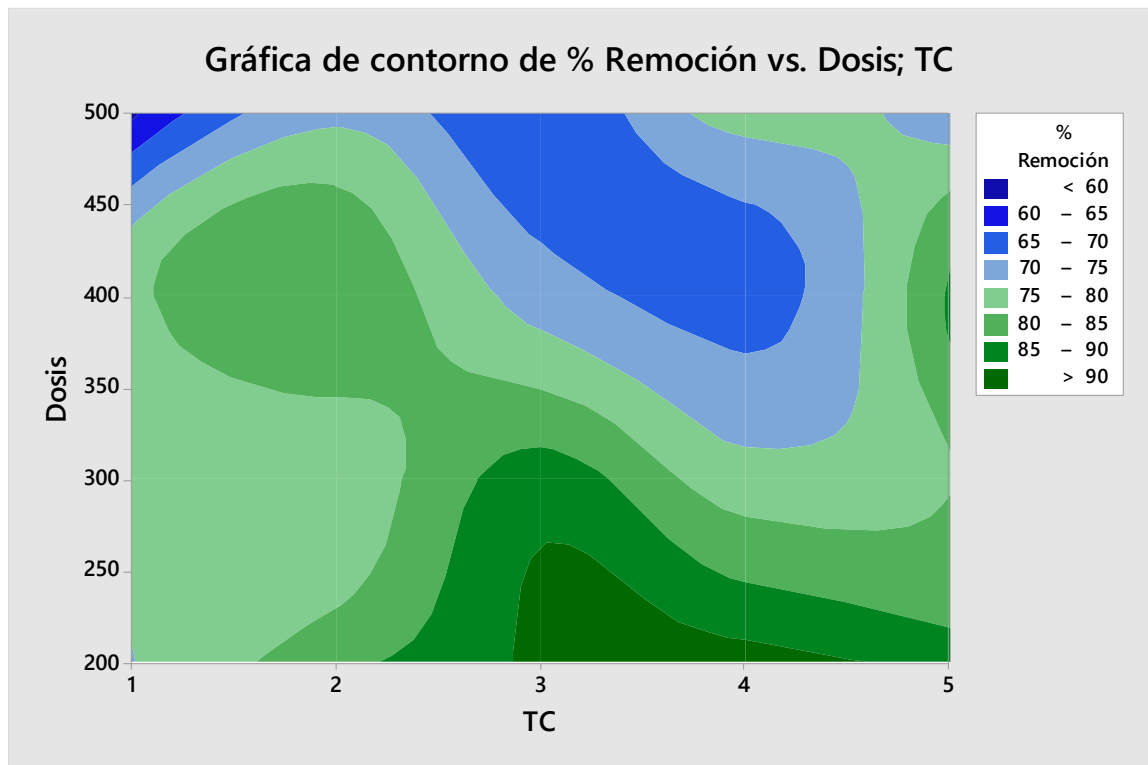
Gráfica 6. Interacción porcentaje de remoción vs dosificación de coagulante

Teniendo en cuenta que el rango de remoción de turbiedad se encuentra comprendido entre el 57,14% y el 92,26%, se ha realizado un modelo de optimización de respuesta en el que se identificó que para lograr la remoción máxima se ha de establecer una dosificación de 200 mg/l y 4 minutos de tiempo de centrifugado (ver gráfico 7).



Gráfica 7. Optimizador de respuesta, época de altas precipitaciones

Puesto que la turbiedad presente en el lixiviado maduro para un mismo periodo de altas precipitaciones varía constantemente, se ha establecido el gráfico 8 el cual muestra cuales pueden ser las remociones alcanzables para cuando la turbiedad inicial se encuentra entre las 26,4 y 29,1 NTU, mostrando que las configuraciones deseables para tener un porcentaje de remoción superior al 85% serán dosificaciones menores a 300 mg/l y tiempos de centrifugado superiores a dos minutos.

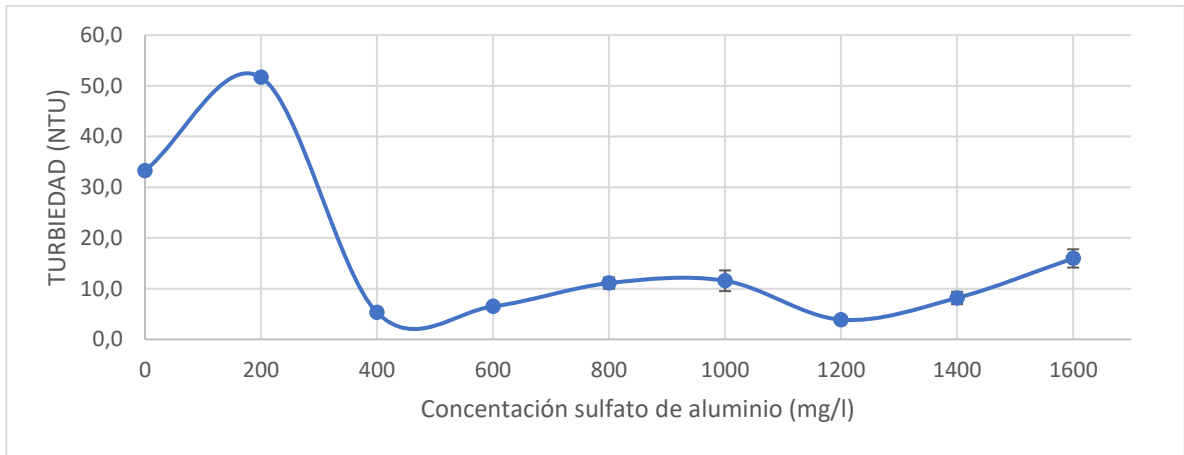


*Gráfica 8. Porcentaje de remoción vs dosificación de coagulante y tiempo de centrifugado*

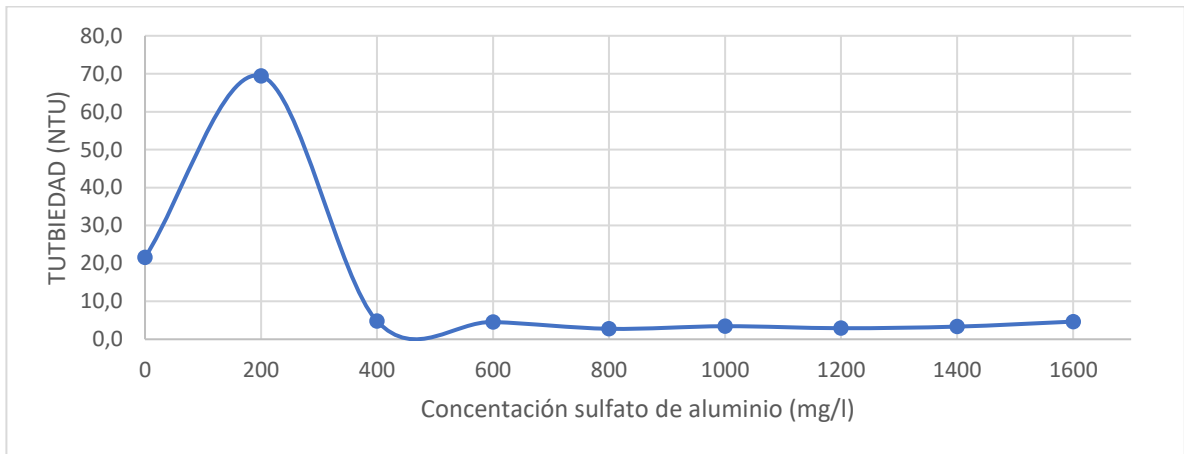
#### 4.1.2 Resultados para temporada de bajas precipitaciones

##### 4.1.2.1 Determinación de la dosificación óptima sin proceso de centrifugado

En temporada de bajas precipitaciones el lixiviado presenta una mayor concentración de coloides y material susceptible de precipitación química, en el caso del lixiviado generado en el relleno Sanitario El Ojito se encontró que para esta temporada se presentan niveles de turbiedad entre 21,6 y 33,3 NTU en las gráficas 9 y 10 se aprecia el comportamiento de la turbiedad al momento de adicionar el Sulfato de Aluminio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) en concentraciones que van desde los 200 a 1600 mg/l.



*Gráfica 9. Turbiedad Vs dosificación de coagulante, muestra 3*



*Gráfica 10. Turbiedad Vs dosificación de coagulante, muestra 4*

Como se aprecia en las gráficas 9 y 10, para concentraciones de sulfato de aluminio menores a 200 mg/l estos tiempos de operación son ineficientes causando un aumento en la turbiedad ya que no se completa de manera adecuada el proceso de coagulación y floculación, sin embargo, con concentraciones superiores a 400 mg/l si se tiene una disminución significativa de la turbiedad cumpliendo parcialmente el objetivo de este proceso; teniendo en cuenta la variación de la turbiedad entre la primera muestra y la segunda, las cuales se tomaron con dos semanas de diferencia, se estableció un rango de 800 a 1200 mg/l como dosis de sulfato de aluminio de tal modo que la turbiedad se reduzca en más del 80% asegurando así una disminución de otros parámetros asociados a la presencia de coloides y materia orgánica disuelta en el lixiviado.

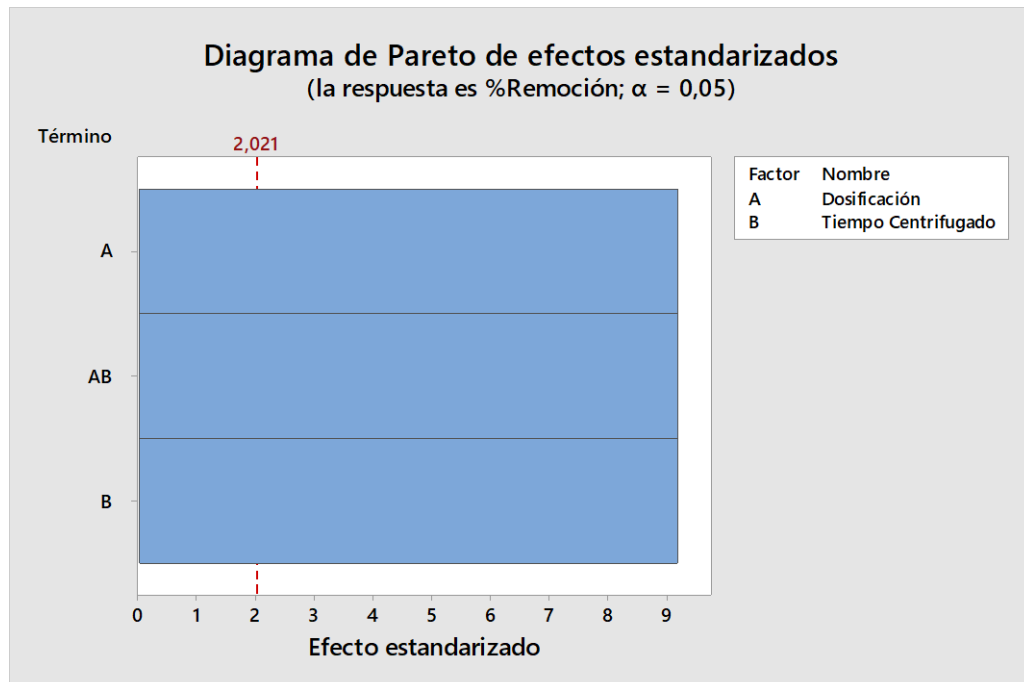
#### 4.1.2.2 Estudio de remoción máxima incluyendo el proceso de centrifugado

Para este segundo momento se ha decidido, conforme a lo hallado en el rango de dosificación descrito en el punto 4.1.2.1, quedando así los niveles de cada factor:

Tabla 6. Información de factores para temporada de bajas precipitaciones

Factor	Abreviación	Unidades	Niveles	Valores
Dosificación	Dosis	mg/l	4	800; 900; 1000; 1100
Tiempo Centrifugado	TC	min	5	1; 2; 3; 4; 5

Como es el caso del modelo para altas precipitaciones, el diseño factorial tiene en cuenta la influencia directa de cada factor de manera individual y conjunta, de acuerdo con el gráfico 11. Diagrama de Pareto, se ha determinado que el resultado en porcentaje de remoción es afectado por todos los términos, los cuales tienen un intervalo de confianza del 95%.



Gráfica 11. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados.

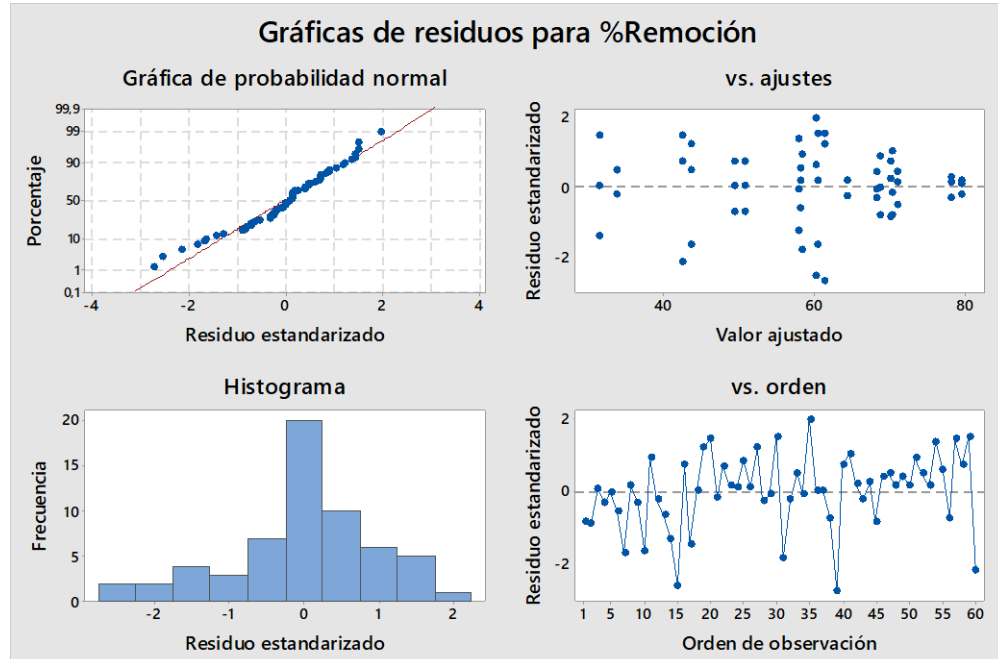


En este sentido, la tabla 7 evidencia que el ajuste en la varianza de los datos recolectados para la temporada de bajas precipitaciones se encuentra en un 99,76% teniendo solo una desviación de 0,79 Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU).

*Tabla 7. Resumen del modelo para bajas precipitaciones*

<b>S</b>	<b>R-cuad.</b>	<b>R-cuad. (ajustado)</b>	<b>R-cuad. (pred)</b>
0,790605	99,76%	99,65%	99,46%

Previo al análisis de eficiencias de remoción alcanzado tanto por la participación individual de cada uno de los factores y la interacción de ambos en el proceso de remoción de turbiedad en la temporada de bajas precipitaciones sobre el relleno sanitario El Ojito, se determina que, según la gráfica 12 los datos del modelo presentan una varianza la cual es imprescindible que exista en cualquier modelo estadístico, esto con el fin de asegurar una independencia entre cada dato y combinación estudiada.



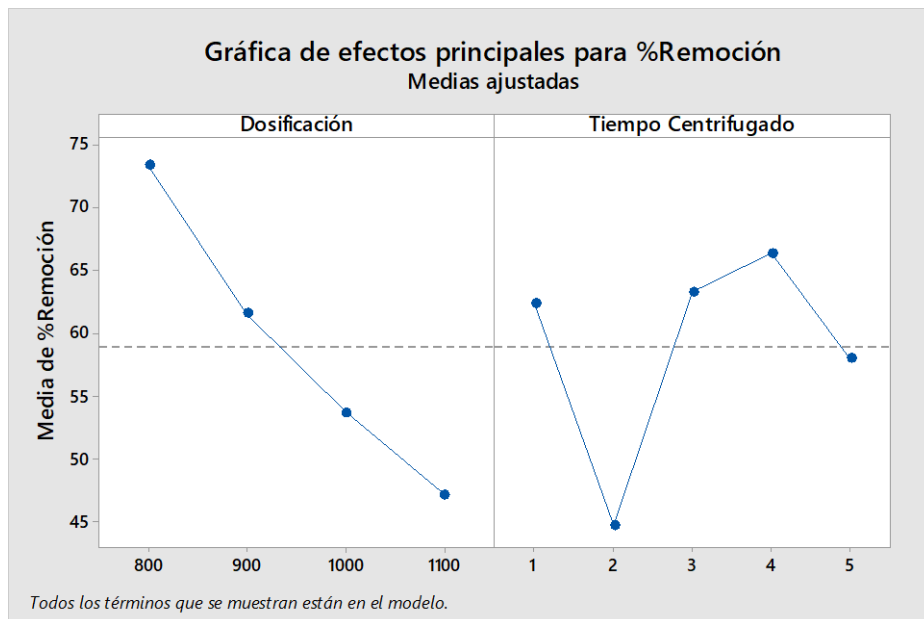
*Gráfica 12. Residuos para porcentaje de turbiedad*

De acuerdo a lo observado en la gráfica de probabilidad, dentro del conjunto de gráficas 12, se aprecia una varianza baja dentro de cada dato capturado en laboratorio, de tal modo que se corrobora la información presentada en la tabla 7 que muestra una varianza inferior a 1 Unidad Nefelométrica de Turbiedad.

Las gráficas vs ajustes y vs orden permiten apreciar la aleatoriedad con la que se tomaron los datos, de tal manera que no hay relación directa entre ellos, por tanto, es posible afirmar que todo el diseño experimental se llevó a cabo de manera correcta y que las conclusiones a las que se lleguen con este tendrán un 95% de intervalo de confianza.

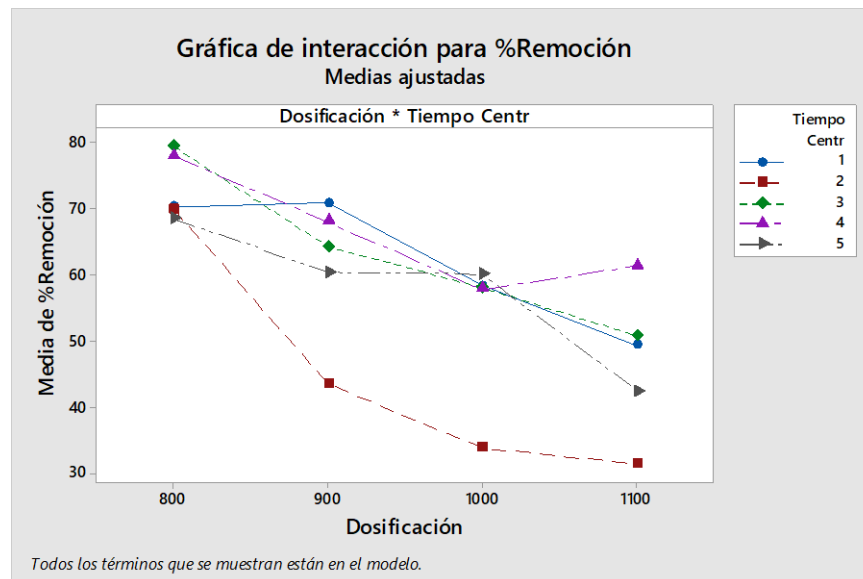
Por otro lado, teniendo en cuenta que el proceso de remoción de turbiedad basa su eficiencia en la dosificación del agente coagulante sumado al proceso de sedimentación que se haya escogido, en la gráfica 13 se aprecia que al aumentar la dosificación de sulfato de aluminio tipo A la remoción es menor.

Por su parte, los efectos del tiempo de centrifugado sobre la remoción de la turbiedad son completamente variables, es decir, aunque con un minuto de centrifugación se pueda alcanzar superar la media de remoción, aumentar a dos minutos no hace eficiente el proceso, caso contrario cuando se aumenta el tiempo a tres y cuatro minutos con los que sí es posible lograr remociones superiores al 60%.



Gráfica 13. Efectos principales para porcentaje de remoción de turbiedad

Una vez analizada la influencia individual de los dos factores (dosificación y tiempo de centrifugado), se ha realizado un análisis del efecto que tiene la interacción conjunta sobre la variable de respuesta, por tanto, según el gráfico 14 se aprecia que en todos los tiempos propuestos y dosificaciones de 800 mg/l se logran las mayores remociones de turbiedad, alcanzando un mínimo de 70% y máximo de 80% aproximadamente; finalmente, se ha establecido que al igual que en temporada de altas precipitaciones, para lograr una remoción elevada se tendrá que operar el sistema de centrifugado como mínimo por tres minutos.

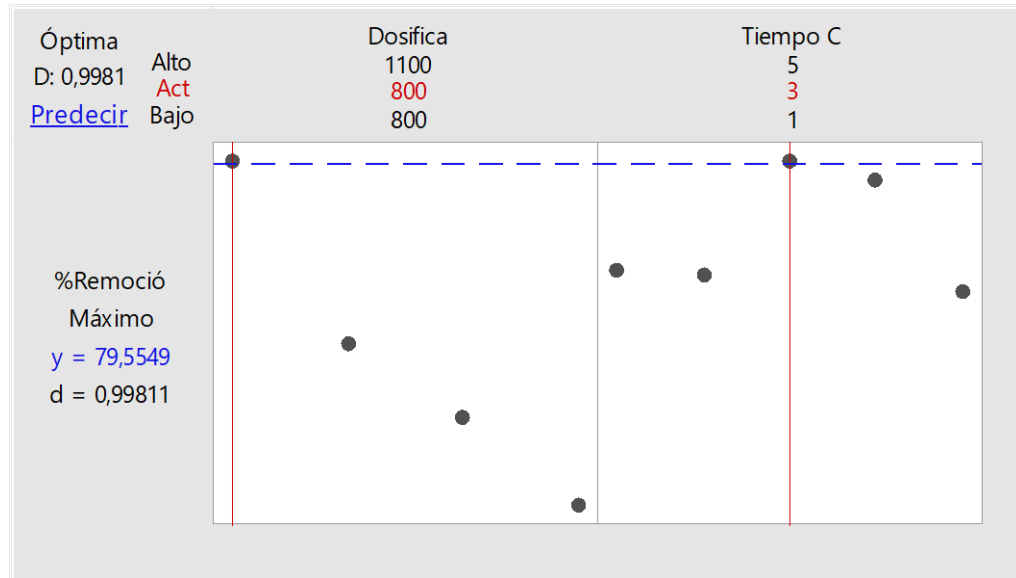


Gráfica 14. Interacción porcentaje de remoción de turbiedad

En temporada de bajas precipitaciones se estableció un rango de remoción comprendido entre 30,46% y 79,65%; se ha realizado, mediante el software Minitab 18 la maximización del porcentaje de remoción encontrando que para alcanzarlo es necesario aplicar una dosificación de 800 mg/L de  $Al(SO_4)_3$  y un tiempo de centrifugado de 3 minutos, de acuerdo con la tabla 8 y la gráfica 15 se ha determinado que según el intervalo de confianza IC de 95%, es posible que se alcance una remoción de  $79,65\% \pm 0,45\%$ , pudiendo llegar a superar el 80% en algunas ocasiones.

Tabla 8. Predicción de respuesta múltiple

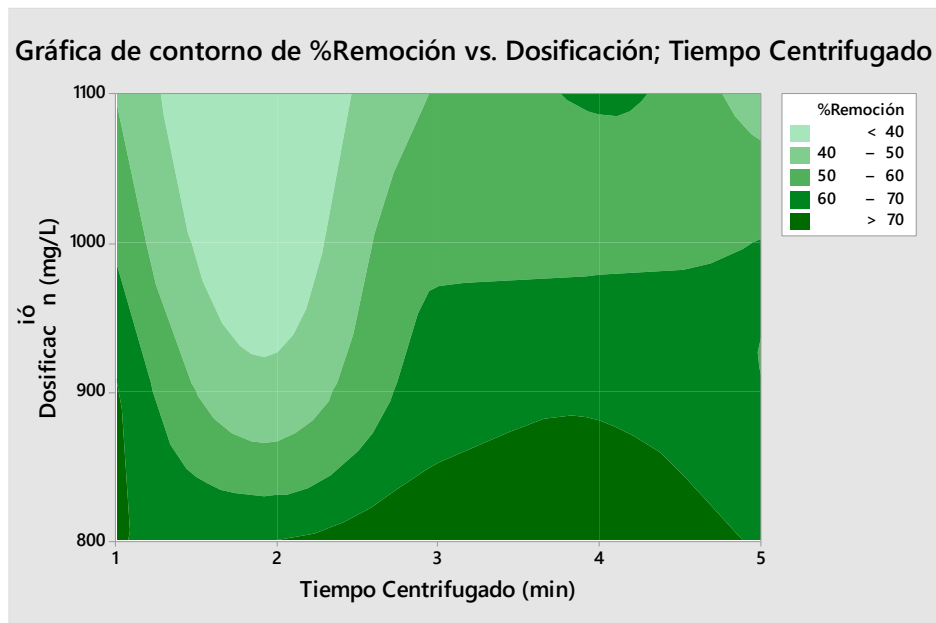
Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
%Remoción	79,555	0,456	(78,632; 80,477)	(77,710; 81,400)



Gráfica 15. Optimizador de respuesta, época de bajas precipitaciones

Al estar localizado en la zona tropical, el relleno sanitario el Ojito presenta grandes variaciones en la turbiedad del lixiviado en época de bajas precipitaciones, esto se ha demostrado con los datos de las muestras 3 y 4 los cuales arrojaron turbiedades de 21,6 y 33,3 NTU respectivamente; esto da paso al establecimiento de rangos de dosificación para cuando no sea posible la realización de una prueba de jarras.

De acuerdo con el gráfico 16, se confirma que la combinación de dosificaciones menores a 850 mg/l de sulfato de aluminio y tiempos de centrifugado entre 3 y 4 minutos se alcanza la mayor remoción descrita anteriormente; por otro lado se puntualiza que aunque sea posible alcanzar remociones similares con un tiempo mínimo de centrifugado de un minuto combinado con dosificaciones menores a 900 mg/L de agente coagulante, el resultado será menos probable que con la combinación recomendada de 800mg/L de coagulante y 3 minutos de centrifugado.



Gráfica 16. Porcentaje de remoción vs dosificación de coagulante y tiempo de centrifugado.

#### 4.2 Validación técnica y económica del sistema de centrifugado

El proceso de centrifugación se ha utilizado en la industria desde finales del siglo XIX especialmente en procesos de deshidratación de lodos en minería, tratamiento de agua residual, separación de fases de mezclas en industrias alimenticias como extracción de aceites, entre otros [39]–[41].

De acuerdo con Brañes y Osorio [40], la utilización del equipos centrífugos en el tratamiento de aguas provenientes de procesos industriales y con alta carga de sólidos en suspensión extiende la vida útil de los equipos instalados posteriores al decantador o centrifuga, esto debido a la eliminación de sólidos de tamaños microscópicos [23], asimismo, al hacer uso de la fuerza de gravedad para acelerar el proceso de separación de sólidos en medios acuosos, las industrias que implementen dichos equipos mejorarán su estatus frente al cumplimiento de la normativa ambiental nacional e internacional de acuerdo al sector industrial en el que se instale.

La elaboración e instalación de equipos industriales regularmente tienen costos elevados, en el caso de los procesos de centrifugado o de decantación no son la excepción ya que estos tienen costos superiores a los 50.000 dólares lo que en pesos colombianos puede representar \$184'755.935,56 [42], siendo por tanto una

inversión demasiado elevada para industrias pequeñas o en el caso particular del relleno sanitario El Ojito una inviabilidad ya que este, aunque tiene elevadas producción de lixiviados, ya se encuentra en un periodo de cierre final.

Por otro lado, el sitio donde se prevé la instalación del equipo no cuenta con el suministro del servicio de energía eléctrica la cual es fundamental para que el equipo pueda funcionar.

Sin embargo, cabe mencionar la posibilidad de construcción de equipos adaptados al sitio, tomando esto como ejemplo la construcción de un prototipo de separación de polímeros en rellenos sanitarios en la ciudad de Bogotá desarrollado por Santiago y profundizado por Jiménez [42], [43], este se compone de un equipo de flujo horizontal con un tornillo interno el cual se encarga de la separación de las partículas logrando remociones de hasta el 75% de polímeros de tamaños mínimos de 3,55 mm los cuales finalmente se extraen en forma de hojuelas.

## **5 CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

Los procesos de depuración de aguas residuales son complejos por cuanto a la composición particular de cada líquido objetivo, en el estudio de remoción de la turbiedad presente en el lixiviado proveniente del relleno sanitario El Ojito de la ciudad de Popayán se determinaron dos nuevas dosificaciones para la aplicación de sulfato de aluminio teniendo en cuenta las temporadas de altas y bajas precipitaciones propias de la zona tropical en la que se localiza el sitio de estudio; dicho cálculo ha de permitir un mejor rendimiento en cuanto a la eliminación de agentes contaminantes que en el momento están causando serias afectaciones al medio ambiente inmediatamente aledaño al punto de vertimiento sobre el río Cauca.

Por otro lado, combinar el proceso de coagulación – floculación convencional con el proceso de centrifugado a escala laboratorio mostró resultados positivos, llegando a remociones superiores al 80% en tiempos menores a 4 minutos tanto para temporadas de altas precipitaciones como en bajas.

Si bien la decantación o centrifugado como sistema de tratamiento alternativo para separar el estado sólido del líquido en un fluido no es viable su implementación en el relleno sanitario El Ojito puesto que se debe realizar inversiones demasiado elevadas las cuales no son viables puesto que el lugar se encuentra en proceso de cierre final y no cuenta con un financiamiento adecuado que la soporte.

### **5.2 Recomendaciones**

El presente trabajo evaluó el proceso de centrifugado con una máquina de laboratorio la cual no cuenta con la posibilidad de variar la velocidad de agitación, por tanto, es recomendable que para trabajos futuros en los que se relacione el proceso de centrifugado o de decantación en lixiviados maduros se tenga la posibilidad de crear un prototipo o en su defecto utilizar una máquina centrífuga en la que se pueda graduar la velocidad de agitación.

En segunda instancia y teniendo en cuenta que como variables del proyecto se tuvo en cuenta únicamente la remoción de turbiedad, asumiendo de manera teórica la remoción de otros contaminantes, es viable que proyectos relacionados en lixiviados maduros evalúen la presencia de contaminantes antes y después de aplicado el proceso aquí propuesto, teniendo como sustento que, la resolución 631 de marzo de 2015 en su Artículo 14 plantea el análisis y reporte de sustancias presentes en vertimientos dirigidos a cuerpos de agua superficial como: metales, metaloides; iones de cloruros, sulfatos; fenoles, entre otros [9].

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Röben, "Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales," pp. 1–151, 2002.
- [2] R. Marín Galvín, *Procesos Físicoquímicos en Depuración de Aguas*, Segunda ed. Madrid, 2013.
- [3] P. Torres-Lozada, L. Barba-Ho, C. Ojeda, J. Martínez, and Y. Castaño, "Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición físico-química y su potencial de toxicidad," *Rev. U.D.C.A Actual. Divulg. Científica*, vol. 17, no. 1, pp. 245–255, 2014.
- [4] N. L. Campillo Valencia and E. Murillo Caicedo, "Valoración financiera del daño ambiental causado a la quebrada El Venado por los vertimientos de lixiviados, generados por la disposición final de los residuos sólidos en el botadero a cielo abierto del distrito de Buenaventura.," Universidad del Valle, 2018.
- [5] W. Colmenares and K. Santos, "Generación y manejo de gases en sitios de disposición final," *IngenieriaQuimica.org*, pp. 1–33, 2008.
- [6] E. Giraldo, "Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios: Avances Recientes," *Rev. Ing.*, vol. 0, no. 14, p. 44, 2014.
- [7] M. de J. Corena luna, "Sistemas de tratamiento para lixiviados generados en rellenos sanitarios," 2008.
- [8] R. I. Méndez Novelo, E. Sandoval Cachón, M. R. Sauri Riancho, and E. R. Castillo Borges, "Influencia del material de cubierta en la composición de los lixiviados de un relleno sanitario," *Ingeniería*, vol. 6, no. 2, pp. 7–12, 2002.
- [9] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, *Resolucion 631 DE 2015*. Colombia, 2015.
- [10] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, *Decreto 1076 de 2015*. Colombia, 2015, p. 653.
- [11] V. R. García Ortiz, L. Márquez Benavidez, and J. M. Sánchez Yañez, "Evaluación de la fitotoxicidad de un lixiviado de Relleno Sanitario sobre *Phaseolus vulgaris* L y supervivencia de microorganismos de importancia sanitaria," *Selva Andin. Res. Soc.*, vol. 6, no. 2, pp. 51–63, 2015.
- [12] Y. A. Cárdenas, "Tratamiento de Agua: Coagulación Floculación," *Analytica Chimica Acta*, vol. 704, no. 1–2. pp. 98–109, Oct-2011.
- [13] R. I. M. Novelo, E. R. C. Borges, M. R. S. Riancho, C. A. Q. Franco, G. G. Vallejos, and B. J. Cisneros, "Comparación de cuatro tratamientos físicoquímicos de lixiviados," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 25, no. 3, pp. 133–145, 2009.
- [14] K. Sutherland, "Centrifuge focus: Solids removal - The options," *Filtr. Sep.*, vol. 42, no. 6, pp. 16–20, Jul. 2005.
- [15] K. Sutherland, "Filtration and separation technology: What's new with centrifuges?," *Filtr. Sep.*, vol. 46, no. 3, pp. 30–32, 2009.
- [16] R. M. Novelo *et al.*, "Tratamiento físicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario," *Ingeniería*, vol. 8, no. 2, pp. 155–163, 2004.



- [17] A. C. Cárdenas Sánchez, "Evaluación del desempeño de humedales construidos con plantas nativas tropicales para el tratamiento de lixiviado de rellenos sanitarios," Universidad de Sevilla, 2012.
- [18] A. G. Martínez-Lopez *et al.*, "Alternativas actuales del manejo de lixiviados," *Av. en Quim.*, vol. 9, no. 1, pp. 37–47, 2014.
- [19] Y. F. Chuquitarqui de la Cruz and M. E. Velásquez Huanca, "Diseño y construcción de un reactor anaerobio de flujo ascendente (R.A.F.A) para el tratamiento de aguas residuales urbanas de la ciudad de Puno," Universidad Nacional del Altiplano, 2017.
- [20] A. Barrenchea Martel, "Coagulación," in *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría. Tomo I*, Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2004, pp. 152–224.
- [21] H. M. Salas Olivares, "Estudio comparativo de un coagulante natural frente a coagulantes químicos," Universitat Politècnica de Catalunya, 2016.
- [22] C. Romero, R. Solórzano, O. Abreu, L. Brizuela, and Z. Pérez, "Síntesis de un polímero inorgánico de aluminio y su uso para clarificación de agua," *Rev. Ing. UC*, vol. 14, no. 3, pp. 16–23, 2007.
- [23] H. Montero, *Centrifugación - Métodos*. 2011.
- [24] I. R. Paulo Geymar and B. P. Germán Darío, "Estudio de factibilidad de un proceso fisicoquímico para la remoción de carga orgánica, color y turbiedad en aguas residuales de una central de sacrificio," Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- [25] L. Metcalf, H. P. Eddy, and G. Tchobanoglous, *Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse*, vol. 4. McGraw-Hill New York, 1979.
- [26] R. I. Méndez Novelo, J. A. Pietrogiovanna Bronca, B. Santos Ocampo, M. R. Sauri Riancho, G. Giacomán Vallejos, and E. R. Castillo Borges, "Determinación de la dosis óptima de reactivo Fenton en un tratamiento de lixiviados por Fenton-adsorción," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 26, no. 3, pp. 211–220, 2010.
- [27] C. J. Medina Valderrama, E. M. Montero del Águila, and L. E. Cruz Pino, "Optimización el proceso fenton en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios," *Rev. la Soc. Química del Perú*, vol. 82, pp. 454–466, 2016.
- [28] R. I. Méndez Novelo, R. B. García Reyes, E. R. Castillo Borges, and M. R. Sauri Riancho, "Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton," *Ing. e Investig.*, vol. 30, no. 1, pp. 80–85, 2010.
- [29] R. I. Méndez Novelo, E. Medina Hernández, C. Quintal Franco, E. R. Castillo Borges, and M. R. Sauri Riancho, "Tratamiento de lixiviados con carbón activado," *Ingeniería*, vol. 6, no. 3, pp. 19–27, 2002.
- [30] J. R. Laines Canepa, J. A. Goñi Arévalo, R. H. Adams Schroeder, and W. Camacho Chiu, "Mezclas con potencial coagulante para tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario," *Interciencia*, vol. 33, pp. 22–28, 2008.
- [31] I. Herández, R. O. González, F. Sandoval, J. L. Galván, and R. E. Contreras, "Evaluación de cal, sulfato e hidroxocloruro de aluminio en la coagulación-floculación de lixiviado en el relleno sanitario de Poza Rica, Veracruz," *Av. en*

- Ciencias e Ing.*, vol. 4, no. 3, pp. 1–10, 2013.
- [32] G. Ramachandran, P. C. Raynor, D. Leith, C. Hill, and C. Hill, "Collection Efficiency and Pressure Drop for a Rotary-Flow Cyclone ELLINGROTARY-FLOWCYCLONES," no. October, 1994.
- [33] M. F. Bustos Castro, "Uso del óxido de grafeno como floculante para el tratamiento en el lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana," Universidad de La Salle, 2018.
- [34] J. D. Pérez Aristizábal, "Aplicación y evaluación de un reactor de contactores biológicos rotativos (RBC o biodiscos) a escala laboratorio como tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de La Pradera," Universidad de Medellín, 2010.
- [35] A. Mendoza, "Planta de Tratamiento de Lixiviados - Parque Ambiental Los Pocitos," in *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, 2009, pp. 1–5.
- [36] A. Álvarez Contreras and J. H. Suárez Gelvez, "Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario 'El Guayabal' de la ciudad San José de Cúcuta," *Ing. y Desarro.*, no. 20, pp. 95–105, 2006.
- [37] "2130 Turbidity," in *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*, 2017.
- [38] Y. Lorenzo Acosta, "Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación," *ICIDCA Sobre los Deriv. la Caña Azúcar*, vol. 40, no. 2, pp. 10–17, 2006.
- [39] R. Álvarez, M. Corral, and E. P. Vergara, "Análisis del tratamiento de lodos en la ETAP 'Río Iregua' de Logroño," 2012.
- [40] H. Brañes and C. Osorio, "Nuevas aplicaciones de equipos centrífugos en minería," *Rev. Agunkuyâa*, vol. 8, no. 2, pp. 49–56, 2018.
- [41] K. Rackerseder, "Uso novedoso del Decanter/Tricanter ® en la industria del aceite de palma," *Palmas*, vol. 34, no. Especial, pp. 47–55, 2013.
- [42] D. F. Santiago Garzón, "Técnica de separación de polímeros por centrifugación," Universidad de Los Andes, 2003.
- [43] A. Jiménez Núñez, "Sistema de realimentación de agua en la separación centrífuga de polímeros," Universidad de Los Andes, 2004.