

**Diseño y Conformado de un Material Filtrante a Base de Residuos Industriales para  
el Tratamiento de Aguas Contaminadas con Metales Disueltos.**

Andrés Giovanni Rincón Amaya y Laura Fernanda Velasco Ribero

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

John Freddy Palacios

MSc en Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de los materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

A Dios primero que todo, porque, aunque no siempre me encuentre muy apegado a él o a sus enseñanzas, sí sé que siempre está para mí en los momentos difíciles y me da la fortaleza que necesito

A mi Nonita Leonor Vera de Amaya, la persona que más amo en la vida, que aunque no esté presente físicamente en este momento, siempre me dio todo su amor para que creciera como una persona de bien y echado para adelante

A mi Nonito Marcos Fidel Amaya Carrero que fue con quien inicié este camino y que en la ausencia de mi nonita fue el que me dio todo su apoyo día a día incondicionalmente

A mi Mami Luz Mery Amaya Vera que siempre estuvo pendiente de mí, me dio su amor y cariño incondicional y me enseñó la importancia de la familia

A mis Tíos Ana Milena Amaya Vera y Marcos Fidel Amaya Vera que me enseñaron la importancia de la responsabilidad y la disciplina en cada cosa que se quiere realizar en la vida

A mis amigos de la Universidad especialmente a Laura Fernanda Velasco Ribero que me enseñó la importancia de mantener la calma ante las malas situaciones y siempre estuvo dispuesta a escuchar y a atender mis problemas llenándome de confianza y fortaleza.

A los profesores que marcaron realmente mi formación académica y profesional y además me enseñaron la importancia de ser persona primero antes que cualquier otra cosa.

Andrés Rincón

### **Dedicatoria**

Primero que todo a Dios, porque sentí su respaldo, amor y misericordia todo los días y me permitió ver su amor y respuesta en todas las personas que me acompañaron en esta etapa.

A mis padres, porque cada día se sacrificaron y dieron todo de si para formarme, enseñarme y fueron siempre mi apoyo incondicional, creyeron en mí\*1z y me permitieron vivir este sueño.

A mi hermano, por enseñarme el valor de la disciplina, la constancia y a siempre correr un poquito más.

A mi gran amigo y compañero de tesis, Andrés Rincón por acompañarme en esta travesía, aguantarme en cada clase durante toda la carrera y enseñarme a confiar en mí.

A mis amigas, Ada Rozo, María Fernanda Vera y Angie Quitián, por enseñarme que las respuestas de Dios son personas, por escucharme, apoyarme y demostrar que la amistad es desinteresada e incondicional, no la afecta el tiempo, ni la distancia, ni la envidia.

*Laura Velasco*

### **Agradecimientos**

A la planta docente de la escuela de Ingeniería Metalúrgica por su gran esfuerzo y compromiso en nuestra formación tanto personal como profesional,

A todos los técnicos laboratoristas de planta de aceros en especial Javier, ya que nos aportaron entendimiento y acompañamiento durante el desarrollo del proyecto de grado

A nuestro director de tesis Msc Jhon Freddy Palacios por la guía y entendimiento que nos brindó durante el desarrollo del proyecto.

**Tabla de Contenido**

Resumen.....	10
Introducción .....	12
2. Objetivos.....	14
2.1 Objetivo General.....	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3. Marco Teórico.....	15
3.1 Generalidades.....	15
4. Metodología .....	19
4.1 Toma de muestra representativa por medio del método Cono-Muestreo y Muestreo de los residuos a utilizar, Ceniza Volante y Escoria Blanca .....	19
4.2 Diseño de Composiciones.....	21
4.3 Contacto entre las mezclas y el drenaje ácido de mina (DAM).....	22
4.4 Definición de aglomerantes para el proceso de peletización.....	22
4.5 Proceso de Peletización.....	23
4.6 Comportamiento del Material filtrante .....	24
4.6.1. Resistencia a la Caída .....	24
4.6.2. Resistencia al contacto con el agua.....	24
4.6.3 Sinterización .....	24
4.7 Experimentación en el filtro.....	25
5. Análisis y Discusión .....	25
5.1 Caracterización de materiales .....	25

5.1.1 Caracterización Drenaje Acido De Mina.....	25
5.1.2 Caracterización De Los Residuos Industriales .....	27
5.2 Ensayos preliminares sin aglomerante.....	29
5.3 Comportamiento del Material Filtrante .....	33
5.3.1 Resistencia a la caída .....	33
5.3.2 Resistencia al contacto con agua.....	34
5.4 Ensayos de exposición de DAM y los pellets como material filtrante .....	35
5.4.1 Análisis con CMC.....	35
5.4.2 Análisis con Bentonita .....	39
5.4.3 Comparación de Composiciones Elegidas Para Cada Tipo de Aglomerante .....	42
5.4.4 Análisis final de Absorción atómica del drenaje luego del contacto .....	43
5. Conclusiones.....	45
6. Recomendaciones .....	46
Referencias Bibliográficas .....	47

### Lista de Tablas

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Análisis granulométrico de la ceniza volante.....	22
<b>Tabla 2.</b> Análisis granulométrico de la escoria blanca.....	22
<b>Tabla 3.</b> Composiciones utilizadas para el diseño del material filtrante.....	23
<b>Tabla 4.</b> Composiciones utilizadas con cada aglomerante para el diseño del material filtrante.....	26
<b>Tabla 5.</b> Datos de prueba de Absorción atómica tomada al DAM de una bocamina abandonada del municipio de California, Santander.....	29
<b>Tabla 6.</b> Resultados obtenidos por medio Fluorescencia de rayos x de ceniza volante .....	33
<b>Tabla 7.</b> Resultados obtenidos por medio de fluorescencia de rayos x de escoria blanca.....	34
<b>Tabla 8.</b> Datos de pH obtenidos para cada una de las composiciones en contacto con el DAM en diferentes tiempos.....	35
<b>Tabla 9.</b> Datos de conductividad luego contacto entre el DAM y los residuos industriales, sin presencia de aglomerantes.....	38
<b>Tabla 10.</b> Registro de datos obtenidos de la prueba de Resistencia a la caída .....	39
<b>Tabla 11.</b> Registro de tiempo obtenidos en el desarrollo de la prueba de resistencia al contacto con al agua.....	41
<b>Tabla 12.</b> Tabla comparativa de los tiempos obtenidos antes y después de la sinterización.....	42
<b>Tabla 13.</b> Registro de resultados obtenidos en la experimentación en el filtro para cada una de las composiciones.....	51
<b>Tabla 14.</b> Registro comparativo de medición de la conductividad y pH con y sin aglomerante de la muestra 75% CV + 25% EB.....	48

<b>Tabla 15.</b> Registro de los resultados obtenidos en la experimentación en el filtro para cada una de las composiciones con Bentonita.....	<b>52</b>
<b>Tabla 16.</b> Registro comparativo de la medición de la conductividad y pH con y sin aglomerantes de la muestra 50% CV + 50% EB.....	<b>54</b>
<b>Tabla 17.</b> Datos comparativos de pH y conductividad de las muestras 50% CV + 50% EB + 10% Bentonita, 75% CV + 25% EB + 1% CMC.....	<b>56</b>
<b>Tabla 18.</b> Comparación de los resultados del drenaje ácido antes y después del contacto con la muestra seleccionada.....	<b>57</b>
<b>Tabla 19.</b> Límites máximos de concentración permitidos por la legislación colombiana.....	<b>58</b>

### Lista de Figuras

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Registro fotográfico del ensayo realizado .....	54
<b>Figura 2.</b> Caracterización de fases presentes en la ceniza volante .....	54
<b>Figura 3.</b> Caracterización de fases presentes en la escoria Blanca .....	55
<b>Figura 4.</b> Graficas de pH vs Tiempo de los datos obtenido por las pruebas de contacto entre los residuos y DAM .....	55
<b>Figura 5.</b> Registro fotográfico de la prueba a la caída .....	56
<b>Figura 6.</b> evidencia del comportamiento de los Pellets aglomerados con CMC .....	56
<b>Figura 7.</b> Evidencia fotográfica de los Pellets que requirieron proceso de sinterización .....	57
<b>Figura 8.</b> Comparación de los resultados de pH y tiempo recopilados en la tabla anterior .....	57
<b>Figura 9.</b> Comparación de los resultados de conductividad y pH recopilados en la tabla anterior	58
<b>Figura 10.</b> Comparación de los resultados de conductividad y tiempo recopilados en la tabla anterior .....	58
<b>Figura 11.</b> Comparación gráfica de los resultados de conductividad y tiempo recopilados en la tabla anterior .....	59
<b>Figura 12.</b> Datos de pH vs Conductividad de las mejores composiciones de Pellets elegidas durante la prueba .....	59

## Resumen

**Título:** Diseño Y Conformado De Un Material Filtrante A Base De Residuos Industriales Para El Tratamiento De Aguas Contaminadas Con Metales Disueltos.

**Autor:** Andrés Giovanni Rincón Amaya, Laura Fernanda Velasco Ribero

**Palabras Clave:** Drenaje ácido de mina, residuos industriales, ceniza volante, escoria blanca, pH, aglomerante, neutralización.

**Descripción:** Los drenajes ácidos de minas son un gran problema que presenta la industria minera desde hace muchos años e incluso en la actualidad, principalmente debido a que los métodos convencionales de tratamiento activos o pasivos, generalmente no cumplen con los estándares de neutralización necesarios o simplemente producen lixiviados no deseados que con el tiempo terminan afectando en mayor medida el medio ambiente y sobre todo las fuentes hídricas aledañas a los sitios de exploración, esta problemática ha dado paso a diferentes tipos de investigación en donde se busca una forma más económica y eficiente de tratar los DAM. Para dar una solución alternativa a la problemática descrita anteriormente, se dio nacimiento a este proyecto de investigación, en donde se decidió tomar muestras de residuos industriales como la ceniza volante y la escoria blanca, para el tratamiento del agua ácida. En primera instancia se caracterizó la muestra del drenaje por medio de Espectroscopia de Absorción atómica y luego cada uno de los residuos por técnicas de FRX Y FTIR, con el objetivo de posteriormente diseñar muestras intermedias de los residuos que entraran en contacto con el agua ácida y así medir pH y conductividad de las soluciones, para confirmar si el carácter alcalino de los residuos era suficiente para el tratamiento de los DAM, más adelante se buscó realizar un proceso de peletización con bentonita como aglutinante inorgánico y carboximetilcelulosa (CMC) como orgánico, para repetir el proceso anterior, buscando esta vez, identificar que influencia tenían estos durante el proceso neutralización del ácido y la concentración de iones metálicos en la solución. Finalmente, el contacto entre el DAM y los pellets formados generó resultados positivos para el tratamiento del agua y esto se pudo determinar debido a la comparación entre parámetros medibles del mismo, como pH y conductividad.

---

\*\*Diseño Y Conformado De Un Material Filtrante A Base De Residuos Industriales Para El Tratamiento De Aguas Contaminadas Con Metales Disueltos.

\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de ingeniería Metalúrgica Y Ciencia De Los Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Jhon Freddy Palacios. Magister en Ingeniería de Materiales.

### **Abstract**

**Title:** Design and Shaping of a Filtering Material Based on Industrial Wastes for The Treatment of Water Contaminated with Dissolved Metals

**Author(s):** Andrés Giovanni Rincón Amaya, Laura Fernanda Velasco Ribero

**Key Words:** Acid mine drainage, industrial wastes, fly ash, white slag, pH, binder, neutralization

**Description:** Acid mine drainage has been a major problem in the mining industry for many years and even today, mainly because conventional methods of active or passive treatment generally do not meet the necessary standards of neutralization or simply produce unwanted leachates that eventually end up affecting the environment and especially the water sources surrounding the exploration sites, this problem has given way to different types of research where a more economical and efficient way to treat the AMD is sought. In order to provide an alternative solution to the problem described above, this research project was born, where it was decided to take samples of industrial waste such as fly ash and white slag, for the treatment of acid water. In the first instance, the drainage sample was characterized by means of Atomic Absorption Spectroscopy and then each of the wastes by XRF and FTIR techniques, with the objective of subsequently designing intermediate samples of the wastes that would come into contact with the acidic water and thus measure pH and conductivity of the solutions, to confirm if the alkaline character of the wastes was sufficient for the treatment of the DAM, later on, a pelletization process with bentonite as inorganic binder and CMC as organic binder was sought to repeat the previous process, seeking this time, to identify what influence these had during the acid neutralization process and the concentration of metallic ions in the solution. Finally, the contact between the DAM and the pellets formed generated positive results for water treatment and this could be determined due to the comparison between measurable parameters of the same, such as pH and conductivity.

---

\*\*Design and Shaping of a Filtering Material Based on Industrial Wastes for The Treatment of Water Contaminated with Dissolved Metals

\*Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Metallurgical Engineering. Director: Jhon Freddy Palacios. Master in Materials Engineering.

## Introducción

La industria minera genera una gran cantidad de residuos altamente contaminantes a nivel mundial, gran parte de estos se producen colateralmente al proceso minero, con la formación de drenajes ácidos de minas (DAM), estos contienen una gran cantidad de sólidos en suspensión y un alto contenido de sulfato y metales disueltos (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, etc.). Estos elementos en esas concentraciones son nocivos para la actividad biológica, contaminan los cauces, y además esas aguas pueden llegar a dañar la estructura y la cimentación de construcciones. (Lopez Pamo, Aduvire, & Baretino, 2002)

Es de vital importancia la identificación y el tratamiento de los DAM, para disminuir el impacto ambiental que se produzca en las fuentes hídricas aledañas, a la zona que se está afectando, esto cumpliendo con el objetivo número 12 de producción y consumo responsable; de los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por la ONU, (ONU, s.f.) , sin embargo, los métodos convencionales para tratar las aguas contaminadas por DAM son costosos y no obedecen al principio de economía circular y cuidado del medio ambiente que se está planteando a nivel mundial (Cardozo, 2019).

Por lo anterior se plantea el diseño de un dispositivo filtrante a base de residuos generados del proceso de fundición y producción de acero en la industria siderúrgica y de la combustión del carbón en las Termoeléctricas; los utilizados en este caso, son la escoria blanca y la ceniza volante debido al carácter alcalino que poseen, se espera neutralicen la gran acidez de los mismos y permitan, en un proceso posterior, recuperar parte de los metales disueltos en su composición química.

El objetivo era conformar un material filtrante a base de composiciones intermedias entre ceniza volante y escoria blanca que puesto en contacto con un flujo recirculante de DAM, lograra

neutralizar el carácter ácido del agua contaminada, para ello, se decidió realizar un proceso de caracterización con cada uno de los residuos industriales disponibles por medio de técnicas como: Fluorescencia de Rayos X (FRX), Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) y Espectroscopia de Absorción Atómica, para posteriormente realizar la fabricación de pellets de diferentes con dos tipos de aglomerantes diferentes, uno orgánico y uno inorgánico. Luego se realizaron ensayos experimentales donde se midieron pH y conductividad para analizar el cambio con relación al tiempo de exposición.

En síntesis, este proyecto busca plantear una solución alternativa al tratamiento de los drenajes ácidos de mina basado en la economía circular, por medio de un filtro que funciona gracias a residuos industriales de procesos de fundición de acero y combustión de carbón. Se espera que al probar el filtro, se evidencie una disminución significativa en los costos para la industria y la minería, además, de disminuir el impacto ambiental, por medio de la utilización de residuos alcalinos como la ceniza volante y la escoria blanca.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Diseñar y elaborar un material filtrante para el tratamiento de drenajes ácidos de mina DAM empleando residuos industriales.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Diseñar mezclas de residuos industriales y evaluar cómo tales mezclas modifican el pH y la conductividad de un agua ácida proveniente de una bocamina abandonada.

Conformar el material filtrante mediante de peletización, evaluando el efecto del aglomerante utilizado.

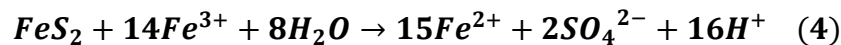
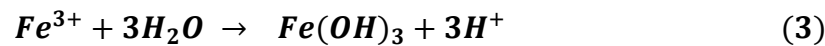
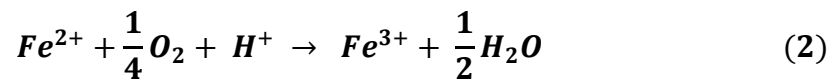
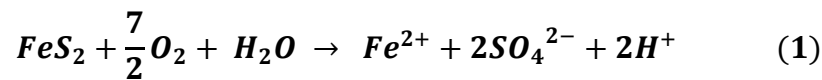
Construir un filtro a nivel de laboratorio para evaluación en continuo del material conformado.

### 3. Marco Teórico

#### 3.1 Generalidades

##### 3.1.1 Drenajes Ácidos de Mina (DAM)

Los DAM se caracterizan por tener un pH bajo (<5.6) y alta acidez, altas concentraciones de sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), metales y metaloides (Fosso-Ankeu, Wolkersdorfer, & Burgess, 2020). El bajo pH que presentan los drenajes en gran medida se debe al proceso de oxidación que atraviesa la pirita en las zonas donde se practica la minería; los factores que más afectan a la generación ácida son el volumen, la concentración, el tamaño de grano y la distribución espacial de la pirita. Las reacciones que intervienen en la oxidación de la pirita pueden ser representadas por las siguientes 4 ecuaciones



En la reacción (1) se aprecia cómo se da la oxidación de la pirita produciendo moléculas de ion ferroso ( $Fe^{+2}$ ), ion sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) y ion hidronio ( $H^+$ ), siendo este último el que genera la acidez en la solución; en la reacción (2) debido al ambiente en el que se producen las exploraciones mineras, con el tiempo los iones ferrosos se someten a una reacción de óxido-reducción en el que se vuelven iones férricos ( $Fe^{3+}$ ), estos últimos reaccionan con las moléculas agua circundantes generando una reacción de hidrolisis que fomenta la formación del hidróxido  $Fe(OH)_3$  reacción

(3) y por ultimo debido a la naturaleza espontanea de la reacción y a la formación de Iones sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) e hidronio ( $H^+$ ) en la reacción (4), se favorece la aparición de sustancias como el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) que disminuyen drásticamente el pH en los drenajes.

La formación del ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y la de otras especies que aparecieron debido a la reacción de oxidación que atraviesa la piritita representa un peligro para la calidad del suelo o cualquier tipo de fuente hídrica que sea aledaña a la zona afectada por la minería, por ello, es necesario tratar los drenajes adecuadamente y a largo plazo para mantener la estabilidad en el ecosistema (Fosso-Ankeu, Wolkersdorfer, & Burgess, 2020).

Existen varios métodos para tratar los DAM, como el uso del carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ), hidróxido de sodio ( $NaOH$ ), bicarbonato de sodio ( $NaHCO_3$ ) o amoníaco anhidro, así como procesos de adsorción con zeolitas, la zeolita fresca, por ejemplo, presenta una alta eficiencia de eliminación de amoníaco de efluentes mineros. Estos productos químicos elevan el pH a niveles aceptables y disminuyen la solubilidad de los metales disueltos pero el coste del tratamiento del DAM suele ser muy elevado (Shirin, Aarif, Christina, & Akhilesh, 2021).

De lo anterior es posible identificar que existen diferentes métodos convencionales para el tratamiento de drenajes ácidos de mina pasivos o activos, que representan un gasto considerable en la industria, por ello diferentes estudios arrojaron que una posible solución económica y beneficiosa por la economía circular es el uso de cenizas volantes debido a que tiene una gran capacidad para aumentar el pH de las aguas afectadas a incluso 10 o 11, lo que mejoraría en gran medida, el carácter alcalino de las mismas y además permitiría una mejor recuperación de los metales de interés que se encuentran en solución.

### ***3.1.2 Ceniza Volante***

Las cenizas volantes consisten en partículas finas predominantemente de forma esférica, solidas o huecas. Se consideran un silicato de ferro aluminio formado por esferas de vidrio de tamaño de partícula muy pequeño que oscila entre 20 y 80  $\mu\text{m}$  con elementos como Si, Al, Fe, Ca, K y Na predominantes dentro de la matriz. Los componentes principales de las cenizas volantes de carbón que prevalece en Sudáfrica son la sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxidos de hierro y óxidos de calcio, con cantidades variables de carbono sin quemar. Las cenizas volantes tienen un alto grado de alcalinidad precisamente debido a la presencia en fracción de cal (M W Gitari, O Etcherbers, D L Key, E Iwuoha, & C Okujeni, 2007).

Por lo anterior, se identifica que en general la composición química de las cenizas volantes, varía dependiendo del tipo de industria en la que se generen, sin embargo, tienen un carácter alcalino fuerte debido a la cantidad de cal con la que cuentan, por ello es importante el estudio del potencial que tienen para el tratamiento de los DAM, teniendo en cuenta parámetros como el tipo de industria, la alcalinidad y el efecto que tiene al estar en contacto con las aguas ácidas.

### ***3.1.3 Escoria Blanca***

En los procesos de fundición, la escoria puede definirse como una fase que contiene elementos inútiles o residuales de un mineral, generalmente formada por óxidos y silicatos metálicos entre otros elementos, los cuales estarán presentes en cualquier operación pirometalúrgica que involucre fundidos (Lovera Dávila, Arias Arce, & Coronado Falcón, 2004).

La composición de la escoria varía según su origen; con lo cual, se obtiene la escoria negra proveniente de los hornos de oxígeno básico y de los hornos de arco eléctrico las denominadas escorias blancas o escorias de cuchara, sin embargo, es importante destacar que se está hablando de escorias básicas las cuales ya han sido objeto de estudio para el tratamiento pasivo de drenajes ácidos de mina (Calleja, 1982).

Las escorias blancas se producen durante la etapa de desulfuración, en procesos de fundición acero, después de la etapa de afino, en hornos eléctricos de cuchara; son reconocidas porque tienen alrededor de un 70% de CaO – MgO (Pérez García, 2019), es decir, que tienen un alto porcentaje de cales en su composición química, esto es debido a que se necesita un ambiente básico que interactúe con los óxidos de hierro producidos durante el ajuste de composición química de los aceros y además, influye en la protección del refractario de las cucharas. Por lo anterior se reconoció el potencial que tienen para el tratamiento de drenajes ácidos de mina y por ello se están realizando diferentes estudios al respecto.

En los primeros trabajos realizados por Ziemkiewicz se observó que diferentes tipos de escoria neutralizan la acidez de los drenajes ácidos de mina lo que presume que esta sería una fuente de alcalinidad (Ziemkiewicz & Skousen, 1999), por otro lado, Masindi comparo las escorias de horno de oxígeno básico (BOF) y de horno de arco sumergido (SAF) para el tratamiento de los DAM y determinó que estos incrementaban el pH de 2 a 9,4 y 9,2 respectivamente, además, observó la eliminación de elementos como el Fe, Al y Mn (Masindi, M.M Ramakokovhu, M.S Osman, & M. Tekere, 2021) Con esto se afirma que las escorias se pueden utilizar para tratar los drenajes ácidos de mina de forma efectiva a largo plazo.

### **3.1.4 Aglomerantes**

**3.1.4.1 Bentonita.** La bentonita es considerada un aglutinante que mineralógicamente es arcilloso con una abundante presencia del grupo de los filosilicatos, reconocida por ser laminada y altamente plástica, está compuesto por dos tetraedros de  $SiO_4$  que encierran una lámina octaédrica de iones  $AlO_4$ . La estructura de capas 2:1 exhibe excelentes propiedades de absorción, ya que las débiles fuerzas de Van Der Waals unen las capas apiladas de unidades básicas simplificando el intercambio catiónico en el espacio entre capas, poseen un tamaño de grano que

generalmente ronda los 0,25 a 0,75  $\mu\text{m}$ , Debido a su favorable capacidad de intercambio catiónico, la bentonita se utiliza principalmente como absorbente de metales pesados y radionúclidos (Terzić, y otros, 2018).

**3.1.4.2 Carboximetilcelulosa (CMC).** El compuesto de Carboximetil celulosa o goma de celulosa es un derivado químico de la celulosa que se utiliza como un espesante natural, derivado de fibras vegetales (Crea tu sabor.com, s.f.) se utiliza como aglomerante y estabilizador en diversos tipos de industria como la alimenticia, farmacéutica y minera debido a las características de transparencia, viscosidad y tolerancia a medios ácidos (Hablemos claro de Alimentos, s.f.); sin embargo, en este caso en particular se utiliza es debido al carácter alcalino, no tóxico y biodegradable que posee el compuesto y a su uso como aglutinante de pellets e inhibidor de selección flotante en la industria minera etw cloud, s.f.). por lo anterior se utilizó el CMC como aglomerante para los pellets, ya que, de acuerdo a la literatura, es posible formar pellets húmedos, secos o calcinados para mejorar las propiedades mecánicas que se requieran.

#### **4. Metodología**

El desarrollo de este trabajo de grado se realizó por medio de 7 etapas; toma de muestra representativa por medio del método cono- muestreo y muestreo de los residuos a utilizar, diseño de composiciones, contacto entre las mezclas y DAM, definición de aglomerantes para el proceso de peletización, proceso de peletización, comportamiento del material filtrante y finalmente experimentación en el filtro, las cuales se encuentran ampliamente descritas a continuación.

##### **4.1 Toma de muestra representativa por medio del método Cono-Muestreo y Muestreo de los residuos a utilizar, Ceniza Volante y Escoria Blanca**

Primero se realizó una inspección visual de ambos residuos disponibles, Escoria Blanca y Ceniza Volante, se observó que la morfología y granulometría entre ellos era muy diferentes,

debido a la diferencia de tamaño en sus partículas irregulares, por lo ello, se decidió realizar un proceso de molienda a partir de molino de bolas durante aproximadamente 30 minutos, con el objetivo de homogenizar los residuos disponibles, para ello se agregaron 18 bolas de acero de diferentes tamaños.

A partir de esta muestra se realizó un análisis de distribución granulométrica, con el fin de conocer el tamaño de partículas disponibles en cada residuo; para esta tarea se utilizaron tamices basados en la norma ASTM E11 de 2022, con diferentes tipos de malla y en conjunto con un agitador tipo Ro – Tap, el proceso se realizó durante 8 minutos con un grupo de tamices ASTM número 70, 100, 140 y 200. Con el fin de homogenizar los tamaños de partícula finos de las muestras de estudio tomadas, se definió como límite pasante la malla N° 70 y como límite retenido la malla N° 100, y con esto, se obtuvo un tamaño de partícula entre 0,212 y 0,150 mm, los resultados de la distribución granulométrica se encuentran recopilados en la tabla 1 y 2.

**Tabla 1.**

*Análisis Granulométrico de la Ceniza Volante*

<b>N° de Malla</b>	<b>Gramos Retenidos</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Retenido Acumulado</b>	<b>% Pasante</b>
<b>70</b>	10.9	5.48	5.48	94.52
<b>100</b>	23.7	11.91	17.39	82.61
<b>140</b>	45.6	22.91	40.30	59.70
<b>200</b>	46.7	23.47	63.77	36.23
<b>Fondo</b>	72.1	36.23	100	-

**Tabla 2.**

*Análisis Granulométrico de la Escoria Blanca*

<b>N° de Malla</b>	<b>Gramos Retenidos</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Retenido Acumulado</b>	<b>% Pasante</b>
<b>70</b>	20.8	10.44	10.44	89.56
<b>100</b>	121.3	660.86	71.30	28.70
<b>140</b>	10.2	5.12	76.42	23.58

<b>200</b>	8.2	4.11	80.53	19.47
<b>Fondo</b>	38.8	19.47	100	-

Los tamaños de partículas finas definidas anteriormente, se toman en consideración debido a la búsqueda de una mayor área superficial proporcionada por un tamaño de partícula más pequeño, con el fin de obtener una mayor cantidad de superficie que reaccione directamente con el drenaje ácido de mina.

#### 4.2 Diseño de Composiciones

Para el diseño de las composiciones se buscó determinar la composición química de cada uno de los residuos utilizados, en este caso se molieron 10 g de cada compuesto hasta que el tamaño de partícula fuera pasante malla 400 según la normativa ASTM E11-22, es decir, un tamaño por debajo de los 0,038 mm de diámetro y posteriormente se sometieron a un análisis elemental cuantitativo por Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Tomando en cuenta lo anterior se determinó un diseño de composiciones que permitieran reconocer la influencia de los residuos tanto individualmente como en muestras intermedias de varios tipos, las cuales se muestran en la siguiente tabla 3

**Tabla 3.**

*Composiciones utilizadas para el diseño del material filtrante*

<b>Composición</b>	<b>%Ceniza Volante</b>	<b>%Escoria Blanca</b>
<b>1</b>	100	0
<b>2</b>	0	100
<b>3</b>	50	50
<b>4</b>	75	25
<b>5</b>	25	75

Nota: los porcentajes de los residuos industriales esta dado en unidades de % peso (wt%)

### **4.3 Contacto entre las mezclas y el drenaje ácido de mina (DAM)**

Con el diseño de composiciones obtenidas en la fase anterior, se planteó un experimento que permitiera conocer el impacto real de los residuos cuando se ponen en contacto con el drenaje ácido de mina (DAM), para ello se utilizaron vasos de precipitado de 100 ml en donde se agregó 12 g aproximadamente de cada una de las composiciones a evaluar y 40 ml de DAM. Se tomaron datos de cada una de las composiciones en 6 tiempos distintos los cuales son 1, 6, 12, 24, 48 horas y una semana, se midieron parámetros correspondientes a pH y conductividad, como se evidencia en la figura 1 (apéndice B), para identificar si se pueden recuperar correctamente los drenajes ácidos disminuyendo o anulando el carácter ácido que poseen y a su vez reconocer la precipitación y aparición de iones metálicos presentes en la solución.

### **4.4 Definición de aglomerantes para el proceso de peletización.**

Para el proceso de peletización se requería de un aglutinante que permitiera la correcta cohesión de las partículas de los residuos, se tuvieron en cuenta dos tipos de aglomerantes para este caso, uno orgánico y uno inorgánico, para evaluar las posibles diferencias en ensayos posteriores con el DAM; teniendo su utilización en antiguas investigaciones para la industria minera en la formación de pellets.

El aglomerante inorgánico seleccionado en este caso es la bentonita, debido a su amplia utilización en la elaboración de pellets de estudio para la industria minera y siderúrgica, gracias a su bajo costo, cohesión y resistencia mecánica que otorga a las mezclas y, además, por su gran capacidad de absorción de metales pesados, por lo que el porcentaje en peso utilizado generalmente para la formación de pellets esta alrededor del 10 %, un valor relativamente alto asociado a los estudios realizados por Wu (Wu, Jin, Zhou, & Du, 2021) .

El aglomerante orgánico utilizado en este caso el compuesto conocido como Carboximetilcelulosa, el cual es conocido como goma de celulosa, debido a sus características orgánicas es utilizado en diversas industrias alimenticias o farmacéuticas, sin embargo, se ha tomado como alternativa en algunas investigaciones mineras para la producción de pellets para estudio de DAM o de relaves, esto es, debido a su carácter principalmente alcalino y biodegradable que posee, además, se han realizado estudios en los que se observa que funciona con un aglutinante eficiente para formar pellets, en los que mejora su resistencia mecánica y cohesión en las mezclas, para determinar el porcentaje peso se realizaron pruebas entre 1% y 5% peso, donde se evaluó la rapidez y facilidad con la que se formaban los pellets directamente en el disco peletizador, esto permitió determinar que la dosis adecuada era 1% en peso (w%)

#### 4.5 Proceso de Peletización

Teniendo en cuenta la elección de los aglomerantes que acompañarían a las composiciones (wt%) que se plantearon en la tabla 4 se obtuvieron los siguientes resultados.

**Tabla 4.**

*Composiciones utilizadas con cada aglomerante para el diseño del material filtrante*

<b>Aglomerante</b>	<b>%Ceniza Volante</b>	<b>%Escoria Blanca</b>
1% Carboximetilcelulosa (CMC)	100	0
	0	100
	50	50
	75	25
	25	75
10% Bentonita	100	0
	0	100
	50	50
	75	25
	25	75

Se tomaron muestras de 500 g de cada una de las composiciones previamente mezcladas hasta percibir un tono homogéneo y se peletizó en un disco peletizador con un ángulo de inclinación en máquina de 39°. Los pellets obtenidos poseían un tamaño aproximado de 1 a 2 cm de diámetro, esto con el fin de aumentar el área de contacto entre estos y el DAM.

## **4.6 Comportamiento del Material filtrante**

### ***4.6.1. Resistencia a la Caída***

Con el fin de evaluar la resistencia mecánica y el efecto del aglomerante utilizado para la formación de los pellets, se realizó una prueba de resistencia a la caída, en la cual se evaluaba el número de veces que el pellet podría caer sin presentar grieta o fractura, para esto se escogieron muestras de aproximadamente el mismo diámetro para cada una de las composiciones y se dejaron caer desde una altura de 1 metro, impactando el suelo de cemento; estudios anteriores han utilizado la prueba de resistencia a la caída para comparar el comportamiento de los pellets con diferentes dosis de aglomerantes (Duan, Yang, Xu, Dong, & Yuan, 2021)

### ***4.6.2. Resistencia al contacto con el agua***

Para evaluar el posible comportamiento de los pellets en contacto con el drenaje, se realizó una prueba preliminar, en la cual se evaluó el comportamiento de los pellets en contacto con agua del grifo con el fin de observar la integridad de estos a lo largo del tiempo, se utilizaron 200 ml de agua en un vaso de precipitado y se agregaron suavemente los pellets de cada una de las composiciones a evaluar y se midió el tiempo en el que se evidenciaban grietas o pérdida de su integridad.

### ***4.6.3 Sinterización***

De acuerdo a las pruebas que se le realizaron anteriormente a los pellets, se decidió aplicar un proceso de sinterización para las muestras que se deshicieron con mayor velocidad, con el fin

mejorar la cohesión de las partículas de los residuos, las mezclas seleccionadas se introdujeron a la mufla la cual se encontraba a una temperatura aproximada de  $25^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ , esto con un fin de evitar el choque térmico, se sinterizó a  $500^{\circ}\text{C}$  durante una hora y posteriormente se apagó la mufla con los pellets aún en su interior para generar un enfriamiento lento dentro de esta. Las mezclas seleccionadas para el proceso de sinterización fueron todas las mezclas aglomeradas con bentonita y la mezcla de ceniza volante aglomerada con CMC.

#### **4.7 Experimentación en el filtro**

Con el fin de simular las posibles condiciones a las que se podría someter el material filtrante, se evaluaron los pellets en un filtro adecuado a partir de una campana de humo, en la cual se agregaron aproximadamente 200 gramos de pellets de cada una de las composiciones y se conectó, por medio de mangueras de 3mm de diámetro a una bomba peristáltica, marca KAMOER; todas las pruebas se realizaron con un flujo ascendente (Chai, y otros, 2020) promedio de 0.9 ml/seg, un tiempo de llenado del filtro de aproximadamente 6.07 minutos y un volumen de DAM de 450 ml el cual fluyo repetidamente durante 2 horas; para la medición de datos experimentales de pH y conductividad se tomaron alícuotas, desde el tiempo 0, es decir en el drenaje sin contacto y posteriormente cada 10 minutos hasta alcanzar la primera hora y una muestra final al completar las 2 horas.

### **5. Análisis y Discusión**

#### **5.1 Caracterización de materiales**

##### ***5.1.1 Caracterización Drenaje Acido De Mina***

Como ya se mencionó anteriormente, la principal reacción que genera la creación del DAM es la oxidación de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), un proceso ampliamente estudiado y peligroso debido a la acidificación del agua de minería y también, porque se libera una gran cantidad de elementos de

traza tóxicos durante el proceso, estos son Ag, As, Bi, Cd, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Ru, Sb, Se, Sn, Te y Zn (Iakovleva, y otros, 2015). Las reacciones teóricamente presentes se pueden describir si se remite a la ecuación (4) en donde finalmente en presencia de oxígeno y un medio acuoso se identifican compuestos dañinos como iones ferrosos ( $Fe^{2+}$ ), sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) e hidronios ( $H^+$ ), sin embargo, la composición química presente en los drenajes varía en cada caso de estudio por lo que como punto de partida se decidió caracterizar la muestra de agua ácida, la cual fue obtenida de forma *in-situ* de la provincia de Soto Norte - Santander

Para el proceso de caracterización del drenaje, se realizó un ensayo de espectroscopia de absorción atómica, con el objetivo de identificar correctamente la composición química de la muestra obtenida de la bocamina abandonada, haciendo énfasis en la determinación de los metales pesados y sulfatos presentes en el agua contaminada, los datos obtenidos se pueden observar en la tabla 5.

**Tabla 5.**

*Datos de prueba de absorción atómica tomada al DAM de una bocamina abandonada en el municipio de California, Santander.*

Parámetro	Al	Cu	Mn	Cr	Cd	Fe	Zn	Sulfatos	pH
<b>Drenaje Acido</b> [mg/L]	2.605	0.701	2.505	0.024	0.002	1.695	0.413	109.340	3.5

En la tabla 5, la muestra de agua ácida obtenida presenta composicionalmente gran parte de los metales y iones sulfatos mencionados anteriormente en la teoría, siendo estos últimos abundantes dentro de la solución, presentando un orden de 109,340 mg/L, por lo que se puede deducir que la principal causa de la formación del agua contaminada es debido esencialmente a la oxidación de la pirita ( $FeS_2$ ).

### **5.1.2 Caracterización De Los Residuos Industriales**

Teniendo en cuenta la información de caracterización proporcionada anteriormente para el drenaje, se decidió realizar un proceso similar, esta vez para las muestras de los residuos que se utilizarían dentro de los ensayos, para ello se sometió a la ceniza volante y a la escoria blanca a un análisis composicional de Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) en donde los datos obtenidos fueron los siguientes:

#### **5.1.2.1 Análisis por Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).**

Para reconocer las fases presentes en cada uno de los residuos de ensayo se decidió aplicar la técnica de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), para ello se empleó un equipo AGILENT CARY 630. Es una técnica espectroscópica poderosa y versátil, que ofrece selectividad y especificidad. Por ello, se ha convertido en una herramienta muy útil para el análisis de innumerables sustancias en muestras complejas, sin la necesidad de tratamientos complejos previos a la muestra (Lopez, 2022).

**5.1.2.1.1 Ceniza Volante.** En la figura 2 (apéndice B) se encuentra la gráfica de caracterización de fases presentes en la ceniza volante generada a partir del equipo AGILENT CARY 630, en ella se logran identificar un pico prominente en la zona de número de onda entre 900 y 1100  $cm^{-1}$ , en donde se refleja la presencia de silicatos y aluminosilicatos y posteriormente entre 880 y 860  $cm^{-1}$  un pequeño doble pico con bandas de vibración que indicarían la presencia de iones carbonato. (Coates, 2000)

**5.1.2.1.2 Escoria Blanca.** En la figura 3 (apéndice B) Se encuentra la gráfica que permite caracterizar las fases inorgánicas presentes en los datos obtenido de a partir del análisis de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), en ella se observan dos picos, el

primero que va aproximadamente desde 1490 – 1410 y entre 880 – 860, lo que indica un comportamiento característico correspondiente a iones de carbonato. (Coates, 2000)

### 5.1.2.2 Análisis por Fluorescencia de rayos X (FRX).

**5.1.2.2.1 Ceniza Volante.** En la tabla 6, se observa la composición química obtenida por medio de FRX, en este caso para la ceniza volante tomada de la central eléctrica de Termotasajero de Norte de Santander, en ella se pueden observar la distribución de las mismas en donde los elementos con mayor presencia en orden descendente son Si, Al, Fe, Ca, K, siendo parte de compuestos oxidantes como el  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ . La ceniza volante en este caso presenta una concentración de cales ( $\text{CaO}$ ) baja, sin embargo, sigue teniendo el carácter básico que es necesario para el tratamiento del drenaje por lo que se requieren una mayor cantidad de pruebas para reconocer el potencial de neutralización de DAM que posee.

**Tabla 6.**

*Resultados obtenidos por medio de Fluorescencia de Rayos X (FRX) de Ceniza Volante*

<i>Elemento</i>	<i>Concentración</i>	<i>Compuesto</i>	<i>Concentración</i>
<b>Si</b>	26.22%	$\text{SiO}_2$	56.09%
<b>Al</b>	15.00%	$\text{Al}_2\text{O}_3$	28.34%
<b>Fe</b>	5.92%	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	8.46%
<b>Ca</b>	1.36%	$\text{CaO}$	1.90%
<b>K</b>	1.23%	$\text{K}_2\text{O}$	1.48%
<b>Ti</b>	0.92%	$\text{TiO}_2$	1.54%
<b>Na</b>	0.26%	$\text{Na}_2\text{O}$	0.35%
<b>S</b>	0.24%	$\text{SO}_3$	0.59%

**5.1.2.2.2 Escoria Blanca.** En la tabla 7 se puede observar la composición química de la escoria blanca por medio de FRX, en ella se puede analizar que existe una gran acumulación de

elementos metálicos como Fe, Ca, Si, Mn y Al, presentes en diferentes compuestos oxidantes como el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  respectivamente, en donde resaltan la presencia de cales como el  $\text{CaO}$  y el  $\text{MgO}$ , debido a que estos teóricamente en presencia del agua ácida y por su condición de alta basicidad, deberían irremediablemente disminuir la concentración de los iones Hidronio ( $\text{H}^+$ ) presentes en la solución aumentando el pH y además generando reacciones que eliminen la presencia del ácido sulfúrico, tomando como punto de partida compuestos como el sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) o el sulfato de Magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ).

**Tabla 7.**

*Resultados obtenidos por medio de Fluorescencia de Rayos X (FRX) de Escoria Blanca*

<i>Elemento</i>	<i>Concentración</i>	<i>Compuesto</i>	<i>Concentración</i>
<b>Fe</b>	25.45%	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	36.38%
<b>Ca</b>	19.2%	$\text{CaO}$	27.37%
<b>Si</b>	8.78%	$\text{SiO}_2$	18.79%
<b>Mg</b>	4.89%	$\text{MgO}$	8.10%
<b>Al</b>	2.21%	$\text{Al}_2\text{O}_3$	4.17%
<b>Mn</b>	1.67%	$\text{MnO}$	2.15%
<b>Cr</b>	0.32%	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0.46%
<b>Ti</b>	0.31%	$\text{TiO}_2$	0.53%

**5.2 Ensayos preliminares sin aglomerante**

Después de llevar a cabo las técnicas de caracterización al drenaje y las muestras, se buscó realizar pruebas en donde entraran en contacto el DAM y los residuos industriales utilizados, para ello, como ya se mencionó anteriormente, se definieron 5 tipos de composiciones distintas con el objetivo de analizar principalmente el cambio en el pH y la conductividad para cada una de las soluciones, los resultados se pueden observar en la tabla 8 y la figura 4 (apéndice B)

**Tabla 8.**

*Datos de pH obtenidos para cada una de las composiciones en contacto con el DAM en diferentes tiempos.*

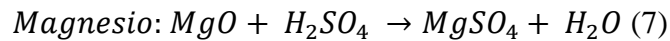
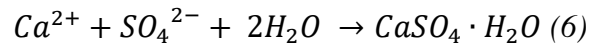
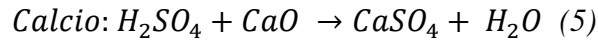
<b>Tiempo / Composición</b>	<b>0.16 h</b>	<b>0.5 h</b>	<b>1 h</b>	<b>6 h</b>	<b>12 h</b>	<b>24 h</b>	<b>48 h</b>	<b>1 semana</b>
<b>100% CV</b>	4.7	6.3	7.8	8	8.1	7.9	8	8
<b>50% CV/50% EB</b>	5	6.5	7.9	7.9	8.5	8.1	8.2	8.1
<b>75% CV/ 25% EB</b>	4.3	6.9	8	7.9	8.3	8	8.1	8
<b>25% CV/ 75% EB</b>	4.8	6.4	8	8	8.3	7.9	8.2	8
<b>100% EB</b>	5	6.3	7.9	8.1	8.2	8.2	8.3	8.2

Notas. Los datos recopilados al interior de la tabla corresponden a unidades de pH

En la figura 4 se describe el comportamiento del pH de cada una de las composiciones puestas a prueba en diferentes tiempos. Como se puede observar todas las curvas presentes en el gráfico tienen una forma similar cuando se superponen las unas sobre las otras, por lo que se adaptaron conveniente a la gráfica conocida de un logaritmo natural puesto en traslación y con una aparente asíntota horizontal correspondiente a un pH igual 8,5, al menos, para los tiempos establecidos durante la prueba, lo que permite analizar que a grandes rasgos cada una de las composiciones planteadas cumple eficientemente con la neutralización del carácter ácido del drenaje.

Si tenemos en cuenta la reacción (4) mencionada en la formación del drenaje, los datos de absorción atómica del agua ácida analizada y los resultados de composición química de los residuos, ya que con esto, se puede reconocer que la reacción predominante en el ensayo es el de la neutralización del ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) debido al contacto con las cales ( $MgO/CaO$ ),

presentes en los datos suministrados por FRX y FTIR para cada uno de los residuos industriales utilizados, generando las siguientes reacciones (Lopez Pamo, Aduvire, & Baretino, 2002):



Las reacciones anteriores previsiblemente se dan en cada una de las soluciones probadas en mayor o menor medida; en ellas se observa un aumento en el pH al disminuir el carácter ácido de la misma cuando se descomponen las moléculas del ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y posteriormente se producen la reacciones en presencia de las cales, obtenidas por composición química de la ceniza volante y la escoria blanca, esto genera un intercambio iónico que produce compuestos como el sulfato de Ca ( $CaSO_4$ ) y el Sulfato de Mg ( $MgSO_4$ ). La formación de los sulfatos anteriormente mencionados, es una clara señal del tratamiento del agua ácida ensayada tomando como referencia el pH aumentado a pocos minutos de realizada la prueba

Adicionalmente a los datos tomados de pH en la solución, se tomaron los datos de conductividad para cada una de las composiciones en los tiempos establecidos anteriormente, en la tabla 9:

**Tabla 9.**

*Datos de conductividad luego del contacto entre el drenaje y los residuos industriales, sin presencia de aglomerantes.*

Conductividad [ $\mu$ S/cm]	0 h	0.16 h	0.5 h	1 h	6 h	12 h	24 h	48 h	1 semana
100% CV	300	480	520	570	618	620	820	860	920
50% CV/50% EB	300	400	420	560	510	600	680	680	680
75% CV/ 25% EB	300	380	460	620	630	720	860	860	900

<b>25% CV/ 75% EB</b>	300	410	490	530	430	580	680	680	690
<b>100% EB</b>	300	450	500	570	550	640	680	690	690

Cuando se observa la tabla 9, se identifica que el dato inicial de conductividad tomado para el drenaje ácido de mina de la bocamina abandonada, sin estar en contacto con los residuos es de 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por lo que la exposición breve o prolongada, dependiendo de los tiempos del ensayo, a las composiciones de ceniza volante y escoria blanca, representan un aumento significativo en la conductividad del mismo ya que oscilan valores de entre 570 a 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en la primera hora de exposición, casi el doble de la inicial, hasta más de 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en composiciones de 100% ceniza volante y 75% ceniza volante y 25% escoria blanca con una exposición de hasta de 1 semana, que, como se verifica en la teoría es una señal del aumento en la concentración de iones metálicos presentes en la solución (Cardosoo Buzzi, Stéphan Viegas, Siqueira Rodriguez, Moura Bernardes, & Soares Tenório, 2013)

De lo anterior se puede deducir, que el aumento en la conductividad presente en el ensayo se debe principalmente a dos razones, la primera que a mayor porcentaje de ceniza en la solución se esperaría una mayor cantidad de iones metálicos que afecten los datos tomados y, la segunda indica que conforme se aumente el tiempo de exposición entre el drenaje y las composiciones de los residuos, mayor será el aumento en la conductividad, debido a la presencia de iones metálicos en la solución

Esto representa un efecto negativo para la prueba, debido a que los iones metálicos presentes en la solución son muy difíciles de precipitar y extraer con procesos posteriores para recuperar los metales pesados presentes en el drenaje, sin embargo, mientras más baja sea la conductividad en la solución se puede esperar que previsiblemente esos metales se encuentren en

la superficie de las partículas de los residuos, por lo que en un posterior trabajo de grado sería adecuado verificar esta información e identificar la viabilidad de extraer dichos metales.

### 5.3 Comportamiento del Material Filtrante

Para evaluar el comportamiento del material filtrante y determinar su resistencia al drenaje ácido de mina se realizaron dos pruebas; inicialmente la prueba de resistencia a la caída y prueba del material filtrante en contacto con agua

#### 5.3.1 Resistencia a la caída

A través de esta prueba, se determinó el efecto del aglomerante utilizado y la resistencia mecánica de los pellets o material filtrante de análisis, por lo que se obtuvieron los siguientes datos que se encuentran recopilados en la tabla 10.

**Tabla 10.**

*Registro de datos obtenidos de la prueba de resistencia a la caída.*

Composición	N° de Caídas	
	CMC	Bentonita
100% CV	1	1
50% CV / 50% EB	7	4
75 % CV / 25% EB	8	3
25% CV / 75% EB	3	6
100% EB	12	10

Los resultados obtenidos a partir de la tabla 10 evidencian que el comportamiento de los pellets aglomerados con CMC poseen mayor resistencia a la caída, figura 5 (apéndice B) a), lo que indica mayor cohesión entre las partículas de los residuos en comparación con los aglomerados con bentonita, b) se evidencia daño causado por la prueba a la caída de un pellet con 75 % ceniza

volante + 25% Escoria blanca + 10% Bentonita, y adicional a esto, permite conocer de manera preliminar el comportamiento de estos en la prueba de contacto con el agua.

### 5.3.2 Resistencia al contacto con agua

La prueba de resistencia al contacto con el agua, permitió conocer de manera preliminar el posible comportamiento de los pellets al contacto con el drenaje ácido de mina, los datos se encuentran recopilados en la tabla 11, donde se evidencia que los aglomerados con CMC poseen un excelente comportamiento en contacto con el agua, se observa que estos mantienen su integridad durante un largo tiempo, indicando así, que un filtro constituido con este material filtrante presentaría una vida útil prometedora.

**Tabla 11.**

*Registro de tiempos obtenidos en el desarrollo de la prueba de resistencia al contacto con agua*

Composición	Tiempo [horas]	
	CMC	Bentonita
100% CV	0.02	Inmediatamente
50% CV / 50% EB	50	0.024
75 % CV / 25% EB	36	0.083
25% CV / 75% EB	58	0.11
100% EB	72	36

Como se observa en la tabla 11, los aglomerados con bentonita presentan una baja resistencia al contacto con el agua, por lo cual, se decide realizar el proceso de sinterización a todas las mezclas que demostraban los tiempos más bajos de permanencia; el proceso de sinterización se realizó a pellets en verde, los cuales fueron ensayados bajo las mismas condiciones, estos demostraron mejorar su resistencia, superando los tiempos obtenidos con CMC; como se observa

en la figura 6 ( apéndice B), estos pellets presentan un comportamiento inusual en comparación con los pellets de CMC, ya que se evidencian columnas de burbujas al momento de sumergirlos.

**Tabla 12.**

*Tabla comparativa de los tiempos obtenidos antes y después de la sinterización*

Composición	Tiempo [horas]	
	Antes de sinterización	Después de sinterización
100% CV	Inmediatamente	10
50% CV / 50% EB	0.024	55
75 % CV / 25% EB	0.083	40
25% CV / 75% EB	0.11	60
100% EB	36	36

## 5.4 Ensayos de exposición de DAM y los pellets como material filtrante

### 5.4.1 Análisis con CMC

Luego de realizar las pruebas de resistencia al contacto con agua para las muestras a las que se les realizó un proceso de sinterización a 500 °C, se obtuvo una resistencia aceptable para el proceso, por lo que se pasó a la siguiente etapa, en este caso, como ya se mencionó anteriormente se procedió con la exposición del drenaje con cada una de las composiciones que se estipularon en la metodología, en donde por medio de una bomba peristáltica y un flujo ascendente de 0.9 ml/seg, se pudieron obtener los siguiente resultados pertenecientes a pH y conductividad

Los resultados de las tabla 13 (apéndice A) a),b), c), d) y e) corresponden a las pruebas realizadas en este caso para las composiciones con el aglutinante orgánico CMC correspondiente al 1% de la composición química, el tiempo del ensayo realizado en este caso es de 2h debido a que según los resultados obtenidos en la tabla 8 observamos que el pH llegaba a un punto de estabilización aproximadamente en la primera hora de ensayo, por lo que, debido a la

espontaneidad de las reacciones se alcanzaba el equilibrio químico rápidamente, lo que nos permitió decidir no gastar tantos recursos en el tiempo de exposición con los pellets.

Con estos datos se buscaba evidenciar la relación que tenía el pH con el tiempo de exposición del drenaje en la columna y así posteriormente observar la relación que tenía el mismo con la conductividad por lo que se obtuvieron la figura 8 (apéndice B).

Las curvas que se presentan en la Figura 8 (apéndice B) muestran un comportamiento similar al obtenido en la Figura 4 (apéndice B), es decir, la forma que muestran está asociada a la gráfica de logaritmo natural en traslación, sin embargo, en este caso se puede observar que conforme aumenta el tiempo de exposición se aumenta también rápidamente el pH sobre todo en las mezclas que presentan 100% EB y 50% EB y 50% CV, llegando a pH incluso de 11.

Alcanzar un pH tan alto en la exposición de los pellets con el drenaje no es beneficioso principalmente a dos razones, la primera que se debe buscar un equilibrio estequiométrico correcto, entre los que materiales que producen ácido y los que consumen ácido, porque cantidades excesivas pueden dar lugar a la formación de lixiviados fuertemente alcalinos (es decir,  $\text{pH} > 10$ ) que aumenta la solubilidad de materiales peligrosos como Al, Cu, Ni, Pb, y Zn. (Park, y otros, 2019) La segunda, que fundamenta la anterior, es que, según la resolución 635 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), no se puede poner un agua tratada con un pH mayor a 9 en contacto con fuentes hídricas presentes en el medio ambiente.

Teniendo en cuenta lo anterior se reconoce que la única muestra que cumple en todo el tiempo del ensayo con los parámetros de seguridad establecidos anteriormente es la de 100% CV + 1% de CMC, sin embargo, es necesario analizar la conductividad de las demás composiciones presentes, debido a si el tiempo de exposición del agua ácida no supera los estándares establecidos, cualquier composición podría servir para tratar el DAM.

Las curvas presentes en la figura 9 (apéndice B) indican que existe una relación directa entre el aumento del pH y el aumento de conductividad en las soluciones analizadas. Los datos de conductividad indican la presencia de iones metálicos en la solución, lo que indica un aumento en este parámetro es perjudicial si se quiere recuperar posteriormente estos metales pesados presentes en el DAM.

Lo que se busca realmente es la obtención de una conductividad lo más baja posible, para realizar un análisis de espectroscopia de absorción atómica al drenaje ensayado e identificar, si perdió parte los metales pesados presentes en su composición química.

Tomando como base lo anterior, a un tiempo de exposición bajo, alrededor de los 20 min la mejor composición obtenida sería la de 75% CV + 25% EB + 1% CMC, que como se observa en la tabla 13 (apéndice A) e), alcanza un pH de 8,6, suficientemente alto para el tratamiento del drenaje por lo cumple con los requisitos de la resolución 631 de 2015, con su pH inferior a 9 y, además, contiene la conductividad más baja de ese rango de exposición en tiempo, el cual es 1030  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

**5.4.1.1 Comparación del Material Filtrante con y sin Aglomerante.** Luego de elegir la mejor composición de pellets con CMC como aglutinante, se decidió realizar una tabla comparativa entre los datos de pH y conductividad de la composición sin aglomerante y con aglomerante, con el fin de determinar la influencia que tuvo la adición del mismo a los resultados obtenidos.

**Tabla 14.**

*Registro comparativo de medición de la conductividad y pH, con y sin aglomerante de la muestra 75% CV + 25% EB*

---

*75% Ceniza Volante + 25% Escoria Blanca*

---

<i>Sin CMC</i>		<i>Con CMC</i>	
<i>pH</i>	<i>Conductividad [<math>\mu\text{S/cm}</math>]</i>	<i>pH</i>	<i>Conductividad [<math>\mu\text{S/cm}</math>]</i>
4,3	380	3,3	300
6,9	460	6,4	920
8	620	8,6	1030
7,9	630	9,3	1180
8,3	720	9,8	1260
8	860	9,9	1620
8,1	860	10	1530
8	890	10,2	1960

Luego de elegir la mejor composición de pellets con CMC como aglutinante, se decidió realizar una tabla comparativa entre los datos de pH y conductividad de la composición sin aglomerante y con aglomerante, con el fin de determinar la influencia que tuvo la adición del mismo a los resultados obtenidos.

Al interpretar los datos presentados en la tabla 14, se nota una clara diferenciación en las muestras tomadas, se puede apreciar que hay un aumento significativo en el pH ya que en las muestras sin aglomerante, alcanzan el equilibrio estequiométrico en un pH alrededor del 8, en contra parte con la adición de CMC en donde el pH final se dispara hasta 10,2 incluso para una muestra que solo obtuvo 2 h de contacto con el medio ácido del drenaje, sin embargo, como ya se mencionó anteriormente si se limita el tiempo de exposición, hasta aproximadamente 20 min, se pueden alcanzar pH que no excedan en gran medida lo anteriormente mencionado.

De igual manera, se aplica con la conductividad, ya que si se comparan los datos sin la adición de aglomerante y con la adición de este, se puede ver un aumento significativo en la cantidad de conductividad presente en la solución pasando de 890 a incluso 1960  $\mu\text{S/cm}$ , en el último dato registrado de la prueba, por lo que se puede deducir que la formación de los pellets y la adición del aglomerante en este caso, limita en gran medida el tiempo de contacto que se debe

tener entre el drenaje y el material filtrante, si se quiere tener una eficiente neutralización del agua ácida tratada.

Cabe resaltar que, en la industria minera en este caso, limitar el tiempo de exposición a unos pocos minutos, no debería representar un problema, debido a que se estaría realizando la operación requerida en el menor tiempo posible, además, de que existiría la posibilidad de plantear investigaciones que permitan utilizar los residuos de los pellets tratados para procesos de construcción o incluso en la recuperación de los metales adheridos a la superficie de los mismos.

#### ***5.4.2 Análisis con Bentonita***

Luego de encontrar la mejor composición con CMC el cual funciona como aglutinante orgánico, se analizó los mismos parámetros, pero en este caso para el aglomerante inorgánico conocido como bentonita, los resultados se encuentran descritos a continuación.

Los resultados de las tablas 15 (apéndice A) a), b), c) y d) Se realizaron en las mismas condiciones que las obtenidas con CMC, pero en este caso el aglutinante para la cohesión de las partículas es la Bentonita, como ya se mencionó anteriormente el porcentaje ideal de aplicación de bentonita para estos casos es de aproximadamente el 10% en composición %p/%p, e igualmente, que en el caso anterior, se buscaba determinar que la relación que cumplen el pH con el tiempo y posteriormente el pH con la conductividad, para identificar cual sería la mejor composición en este caso, con el objetivo de posteriormente compararlas para analizar la influencia del aglomerante en las muestras.

Con estos datos se buscaba evidenciar la relación que tenía el pH con el tiempo de exposición del drenaje en la columna y así posteriormente observar la relación que tenía el mismo con la conductividad por lo que se obtuvieron en la figura 10 (apéndice B)

En la Figura 10 (apéndice B) se observa un comportamiento similar al obtenido en la Figura 4 (apéndice B) por el aglutinante de CMC, por lo que se analiza, sus curvas corresponden a una gráfica similar al logaritmo natural, sin embargo, en este caso podemos observar remarcadas diferencias entre los pH, curiosamente la que menor pH presenta en este caso y la que presenta un mejor equilibrio estequiométrico evitando lixiviados no deseados, es la de 100% CV + 10% bentonita, caso contrario al que se da en la de 100% EB, en donde el pH es disparado hasta un valor de 11.

Con las curvas observadas en la Figura 11 (apéndice B) es posible realizar un análisis rápidamente, sobre cuál es la composición que presenta una menor concentración de iones metálicos en la solución con la medición de la conductividad y en este caso la que presenta un mejor comportamiento es la mezcla compuesta por 50% CV + 50% EB + 10% Bentonita, ya que incluso después de 2 horas de exposición la conductividad en la solución alcanzaba valores de 1300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Teniendo en cuenta los dos parámetros analizados anteriormente la mejor composición en este caso es la de 50% CV + 50% EB + 10% BENTONITA, debido a que si se observa el comportamiento de los datos en la tabla 15 (apéndice A) c), si la exposición del drenaje con el material filtrante es menor a los 15 min obtendría un pH inferior a 9 y además, una conductividad de tan solo 840  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por lo que igual que la composición de CMC analizada anteriormente, cumpliría correctamente con los requisitos establecidos por la prueba.

**5.4.2.1 Comparación del Material Filtrante con y sin Aglomerante.** Luego de escoger la mejor composición con aglutinante de bentonita con base en los parámetros analizados de pH y conductividad, se decidió realizar un análisis similar al obtenido con CMC, en donde se compararán los resultados obtenidos de la composición analizada, con la adición del aglomerante

y sin la adición del mismo, debido a ello se obtuvieron los siguientes resultados recopilados en la tabla 16.

**Tabla 16.**

*Registro comparativo de medición de la conductividad y pH, con y sin aglomerante de la muestra 50% CV + 50% EB*

<i>50% Ceniza Volante + 50% Escoria Blanca</i>			
<i>Sin Bentonita</i>		<i>Con Bentonita</i>	
<i>pH</i>	<i>Conductividad[<math>\mu</math>S/cm]</i>	<i>pH</i>	<i>Conductividad[<math>\mu</math>S/cm]</i>
5	400	3,3	300
6,5	420	7,6	640
7,9	560	9,6	840
7,9	510	9,9	970
8,5	600	9,9	1060
8,1	680	10	1090
8,2	680	10	1113
8,1	700	10,3	1500

En este caso presenta por la tabla 16 la adición del aglutinante de bentonita en los datos de pH, representa un comportamiento similar al obtenido por el CMC, es decir, que puestos en contacto el agua ácida y la composición de los pellets, el aumento en el pH es abrupto y muy rápido ya que en menos de 30 min se llega a pH de 9,6. Lo anterior indica que es necesario limitar de nuevo el tiempo de exposición aproximadamente hasta los 20 min para obtener un pH que cumpla con los estándares expuestos anteriormente.

Caso muy curioso ocurre con la conductividad ya que la adición de aglomerante, representa de nuevo un aumento en la cantidad de iones presentes en la solución, pasando de 700 a 1500  $\mu$ S/cm, sin embargo, si se evidencia que en relación a los datos presentados por la adición de CMC en la tabla 15 (apéndice A) , la conductividad en este caso alcanza valores en comparación mucho menores, por lo que se podría deducir que la adición de bentonita en este caso permitiría

posteriormente una mejor extracción de los metales pesados que se encuentren presentes en los pellets.

Cabe resaltar que de nuevo el limitante de tiempo para el contacto entre el agua ácida y la composición de los pellets con bentonita seleccionados, representa un beneficio en la neutralización de los drenajes debido a que se alcanza el objetivo planteado en el menor tiempo posible, lo que debe disminuir drásticamente el daño a las fuentes hídricas o al medio ambiente aledaño al sitio de exploración, lo que lo postula como una alternativa al tratamiento de DAM en Colombia

#### **5.4.3 Comparación de Composiciones Elegidas Para Cada Tipo de Aglomerante**

Tomando en cuenta los resultados anteriores y de acuerdo a las mejores composiciones obtenidas para cada uno de los aglomerantes se planteó realizar una comparación entre los mismos, determinando cual sería la más recomendada en este estudio para el correcto tratamiento de los DAM que incluso permitiera una posible investigación adicional para la recuperación de los elementos pesados que se encuentren en la superficie de los pellets

**Tabla 17.**

*Datos comparativos de pH y conductividad de las muestras 50% CV + 50% EB + 10% Bentonita, 75% CV + 25% EB + 1% CMC*

<b>50% CENIZA VOLANTE + 50% ESCORIA BLANCA + 10% BENTONITA</b>		<b>75% CENIZA VOLANTE + 25% ESCORIA BLANCA + 1% CMC</b>	
<b>pH</b>	<b>conductividad (<math>\mu S/cm</math>)</b>	<b>pH</b>	<b>conductividad (<math>\mu S/cm</math>)</b>
<b>3,3</b>	300	3,3	300
<b>7,6</b>	640	6,4	920
<b>9,6</b>	840	8,6	1030
<b>9,9</b>	970	9,3	1180
<b>9,9</b>	1060	9,8	1260
<b>10</b>	1090	9,9	1620
<b>10</b>	1113	10	1530
<b>10,3</b>	1500	10,2	1960

Luego de graficar las composiciones seleccionadas en la Figura 12 (apéndice B) se obtuvo que en los pH de interés, es decir, entre 7 y 9 para el tratamiento drenaje ácido, la composición que mejor presentaba un comportamiento con respecto a la conductividad, evitando así la precipitación de metales pesados a medios acuosos que posteriormente provocaran lixiviados tóxicos, es la curva azul correspondiente a la muestra de 50% CV + 50% EB + 10% de Bentonita, sin embargo, para comprobar estos datos se decidió realizar un ensayo de Espectroscopia de absorción atómica al drenaje puesto en contacto con esta muestra y así corroborar lo consignado al realizar la comparación.

#### ***5.4.4 Análisis final de Absorción atómica del drenaje luego del contacto***

Se tomó una muestra del drenaje que estuvo en contacto con la composición de 50% CV + 50% EB + 10% Bentonita durante aproximadamente 25 min, el dato de pH registrado en este caso fue 8,5 y la conductividad de 720  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y posteriormente se realizó la técnica de Espectroscopia de absorción atómica, los resultados fueron comparados con los del drenaje inicial y se consignaron en la tabla 18

**Tabla 18**

*Comparación de los resultados del drenaje ácido antes y después del contacto con la muestra seleccionada*

<b>Elemento</b>	<b>Drenaje ácido [mg/L] antes del contacto</b>	<b>Drenaje ácido [mg/L] Después del contacto</b>	<b>% de Remoción</b>
<b>Al</b>	2,605	-0,065	102,495
<b>Cu</b>	0,701	-0,037	105,282
<b>Mn</b>	2,505	-0,12	104,791
<b>Cr</b>	0,024	0,419	-1645,833
<b>Cd</b>	0,002	-0,035	2433,333
<b>Fe</b>	1,695	0,07	95,869
<b>Zn</b>	0,413	-0,015	103,635
<b>Sulfatos</b>	109,340	625,96	-472,489

$$(\%)Remoción = \frac{Concentración\ Inicial - Concentración\ Final}{Concentración\ Inicial} * 100 \quad (8)$$

Para el análisis consignado en la tabla 18 se hizo uso de la ecuación (8) (Meneses Barroso, Patiño Mantilla, & Betancur, 2018) con el objetivo de obtener el porcentaje de remoción de cada uno de los metales y sulfatos analizados, luego de que se expusiera el drenaje a la muestra escogida. Se observó que los datos negativos de los metales analizados después del contacto correspondían a la ausencia de iones metálicos presentes en la solución, por lo que se puede deducir que los porcentajes de remoción que superan el 100% como los presentes en los metales de Al, Cu, Mn, Cd y Zn indican principalmente que estos fueron removidos por completo del drenaje luego de exponerse al material filtrante.

El caso del Fe es similar al obtenido anteriormente por los elementos ya mencionados, sin embargo, difiere en que su % de remoción es del 95,86% lo que indica que se removió gran parte de los iones de Fe presentes en el agua ácida, pero aún se conserva el 4,14% restante.

Al contrario de los metales analizados anteriormente el porcentaje de remoción del Cr y de los sulfatos es superior al 100% pero con signo negativo, lo que indica que ocurrió el caso contrario, es decir, que obtuvieron una mayor cantidad de iones presentes en el agua contaminada.

### **Tabla 19.**

*Límites máximos de concentración permitidos por la legislación colombiana*

<b>Parámetros</b>	<b>Límites Máximos permisibles</b>
<b>pH</b>	6 a 9 unidades
<b>Sulfatos</b>	1200 mg/L
<b>Fe</b>	2.00 mg / L
<b>Al</b>	5.00 mg/L
<b>Cu</b>	1.00 mg/L
<b>Mn</b>	1.70 mg/L

Lo anterior sería perjudicial si quiere tratar el drenaje ácido de mina del ensayo, sin embargo, si se observan los datos consignados en la tabla 19 (Barón Torres & Laverde Catano, 2013), (Contreras Gomez, Sierra Cardenas, & Laverde Cataño, 2018) (Jimenez , Moreno Jerez, Carreño, & Universidad industrial de Santander, 2012) (Pena Ortiz, Wolff Carreño, Perez Vega, & Universidad Industrial de Santander, 2009), se pueden identificar que el límite máximo permisible de concentración para los sulfatos según la legislación colombiana es de 1200 mg/L y la concentración obtenida del drenaje ensayado luego de estar expuesto al material filtrante elegido es de solo 625,96 mg/L. (Ramirez Pita, Lopez Isaza, Ardila Montero, & Universidad Industrial de Santander, 2012)

Lo anterior indicaría que gran parte de los metales pesados presentes en el drenaje inicialmente, fueron removidos por completo luego de exponerse al material filtrante elegido y que, además, el aumento en la concentración de los iones de sulfato presentes no representa un peligro latente para el medio ambiente.

## **5. Conclusiones**

Primeramente, se puede concluir que la exposición del DAM con las composiciones de los residuos planteados, aumenta el pH a valores entre 7,9 y 8,5 y la conductividad luego de la primera hora de exposición entre 570 y 920  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , esto se debe principalmente a su carácter alcalino y al aumento de iones metálicos en la solución.

Comparando los datos obtenidos en los ensayos con aglomerantes y sin aglomerantes se concluyó, que la adición de los mismos aumentaban el pH abruptamente a valores de 10 o 11 y que la conductividad a pesar de que también aumentaba, presentaba valores mucho menores con la adición de bentonita que con la adición de CMC.

Se adecuó una columna perteneciente a una cámara de gases con el fin de simular un filtro de tratamiento de DAM a nivel industrial en el laboratorio, por medio del cual se evaluó el comportamiento de los pellets al entrar en contacto con el fluido recirculante del agua ácida; luego de las pruebas realizadas, el material filtrante que demostró los mejores resultados para el tratamiento del drenaje fue la composición con 50% CV + 50% EB + 10% de Bentonita, principalmente por el pH entre 7.6 y 9 que se alcanza a tiempos de exposición cortos aproximadamente entre 20 y 25 minutos y la remoción de gran variedad de elementos metálicos presentes en el agua contaminada.

## **6. Recomendaciones**

Se recomendaría realizar una investigación posterior a este trabajo de grado, tomando las composiciones de pellets ensayadas con el DAM, para realizar una caracterización profunda a la superficie de los mismos con base en técnicas como SEM o TEM y así analizar la viabilidad de extraer los elementos metálicos atrapados luego de las pruebas con el filtro, de no representar viabilidad alguna, se recomendaría tomar las muestras y recrear un forma de utilizar los materiales en procesos estructurales.

### Referencias Bibliográficas

- Barón Torres, & Laverde Catano, D. (2013). Caracterización del drenaje ácido generado en una mina de oro y propuesta técnica de remediación.
- Calleja, J. (1982). Escorias y Cementos Siderúrgicos. *Materiales de Construcción*.
- Cardoso Buzzi, D., Stéphan Viegas, L., Siqueira Rodriguez, M. A., Moura Bernardes, A., & Soares Tenório, J. (2013). *Water recovery from acid mine drainage by electro dialysis*. Minerals Engineering.
- Chai, Y., Pufeng- Qin, Zang, J., Wu, Z., Li, T., Xu, W., & Haibo, S. (2020). Experimental study and application of dolomite aeration oxidation filter bed for the treatment of acid mine drainage. *Minerals Engineering*, Volumen 157.
- Coates, J. (2000). Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. En John Wiley and Sons Ltda, *Encyclopedia of Analytical Chemistry* (págs. 10815 - 10837). R.A. Meyers.
- Contreras Gomez, Sierra Cardenas, D., & Laverde Cataño, D. (2018). Propuesta para el cierre de un drenaje ácido de una mina abandonada, ubicada en el municipio de California departamento de Santander.
- Crea tu sabor.com.* (s.f.). Obtenido de *Crea tu sabor.com*:  
<https://creatusabor.com/blog/recetas/cmc-que-es-y-para-que-se-utiliza>
- Duan, Q., Yang, Y., Xu, R., Dong, Y., & Yuan, Z. (2021). Efecto del aglutinante HS en la reducción de la cantidad de bentonita en los gránulos oxidados. *Actas complementarias de la 150.ª reunión anual y exposición de TMS 2021. Serie Minerales, Metales y Materiales.*, (págs. 50 - 59).

*etw cloud*. (s.f.). Obtenido de etw cloud: <https://mx.etwinternational.com/2-2-cmc-for-mining-104223.html>

Fosso-Ankeu, E., Wolkersdorfer, C., & Burgess, J. (2020). *Recovery of Byproducts from Acid Mine Drainage Treatment*. John Wiley & Sons.

*Hablemos claro de Alimentos*. (s.f.). Obtenido de Hablemos Claro de Alimentos: <https://hablemosclaro.org/carboximetilcelulosa-cmc/>

Jimenez , J., Moreno Jerez, R., Carreño, E. W., & Universidad industrial de Santander. (2012). Mejoramiento del actual tratamiento activo y propuesta de un metodo pasivo para el manejo de drenajes en el distrito minero auroargentifero vetas california Santander. Santander, Escuela de Ingenieria Quimica, Colombia.

lakovleva, E., Mäkilä, E., Salonen, J., Sitarz, M., Wang, S., & Sillanpää, M. (2015). *Acid mine drainage (AMD) treatment: Neutralization and toxic elements removal with unmodified and modified limestone*. Ecological Engineering.

Lopez Pamo, E., Aduvire, O., & Baretino, D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*, 3 - 21.

Lopez, K. (02 de Agosto de 2022). *TECNOSOLUCIONES*. Obtenido de TECNOSOLUCIONES: <https://tecnosolucionescr.net/blog/635-espectroscopia-infrarroja-por-transformada-de-fourier-y-sus-aplicaciones-en-la-industria>

Lovera Dávila, D., Arias Arce, V., & Coronado Falcón, R. (2004). La Valoración de las Escorias Metalúrgicas como recursos industriales. *Instituto de Investigación FIMMG*, 26 - 30.

M W Gitari, L., O Etcherbers, D L Key, E Iwuoha, & C Okujeni. (2007). Treatment of Acid Mine Drainage with Fly Ash: Removal of major contaminant and trace elements. *Journal of Environmental Science, Part A*, 1729 - 1747.

Masindi, V., M.M Ramakokovhu, M.S Osman, & M. Tekere. (2021). Advanced Application of BOF and SAf Slags for the treatment of acid Mine Drainage (AMD): A comparative study. *Material Today PROCEEDINGS*, 934 - 941.

Meneses Barroso, Y. M., Patiño Mantilla, P. A., & Betancur, J. F. (23 de Agosto de 2018). *REMOCIÓN DE CROMO EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES MEDIANTE EL USO DE BIOMASA DE SPIRULINA SP, SEDIMENTACIÓN PRIMARIA Y PRECIPITACIÓN QUÍMICA*. Obtenido de *REMOCIÓN DE CROMO EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES MEDIANTE EL USO DE BIOMASA DE SPIRULINA SP, SEDIMENTACIÓN PRIMARIA Y PRECIPITACIÓN QUÍMICA*: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2326/3791><https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2326/3791#info>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.). Resolución 631 de 2015.

ONU. (s.f.). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo*. Obtenido de Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>

Pena Ortiz, Wolff Carreño, E., Perez Vega, W., & Universidad Industrial de Santander. (2009). Manejo de drenajes ácidos de mina (DAM). Escuela de Ingeniería Química, Santander, Colombia.

Pérez García, F. (mayo de 2019). Utilización de residuos siderúrgicos para el diseño y dosificación de diferentes tipos de material cementante en estructuras sostenibles. Málaga.

Ramirez Pita, Lopez Isaza, Ardila Montero, R. G., & Universidad Industrial de Santander. (2012). Simulación de la respuesta hidrogeoquímica de drenajes ácidos de mina, incrementando el

pH usando CaO (cal) como agente alcalino en el distrito minero Vetas-California Santander. Escuela de Ingenieria Metalurgica, Santander, Colombia.

Segun Ankiyemi, M. G. (2018). *Coal Fly Ash Beneficiation. Treatment of Acid Mine Drainage with Coal Fly Ash*. Segun Akinyemi.

Shirin, S., Aarif, J., Christina, E., & Akhilesh, K. (2021). Assessment of Characteristics of Acid Mine Drainage Treated with Fly Ash. *Applied Sciences*.

Terzić, A., Pezo, L., Mijatović, N., Stojanović, J., Kragović, M., Miličić, L., & Andrić, L. (2018). The effect of alternations in mineral additives (zeolite, bentonite, fly ash) on physico-chemical behavior of Portland cement based binders. *Construction and Building Materials*, 199 - 210.

Wu, H.-L., Jin, F., Zhou, A.-n., & Du, Y.-J. (2021). *The engineering properties and reaction mechanism of MgO-activated slag cement-clayey sand-bentonite (MSB) cutoff wall backfills*. *Construction and Building Materials*.

Ziemkiewicz, P., & Skousen, J. (1999). Steel Slag in Acid Mine Drainage Treatment and Control.

## APENDICE A

Tabla 13.

*Registro de los resultados obtenidos en la experimentación en el filtro para cada una de las composiciones con CMC*

<b>100 % ESCORIA BLANCA + 1% CMC</b>			
<b>#Prueba</b>	<b>Tiempo (Min)</b>	<b>pH</b>	<b>Conductividad (<math>\mu\text{s/cm}</math>)</b>
0	0	3,3	310
1	10	5,9	690
2	20	9,3	850
3	30	10	1070
4	40	10,4	1150
5	50	10,6	1250
6	60	10,4	1230
7	120	11	2090

<b>50% CENIZA VOLANTE + 50% ESCORIA BLANCA + 1% CMC</b>			
<b>#Prueba</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>pH</b>	<b>Conductividad (<math>\mu\text{s/cm}</math>)</b>
0	0	3,3	310
1	10	7,9	1000
2	20	9,5	1220
3	30	10,1	1520
4	40	10,2	1740
5	50	10,3	1850
6	60	10,4	1850
7	120	10,6	2340

<b>25% CENIZA VOLANTE + 75% ESCORIA BLANCA + 1% CMC</b>			
<b>#Prueba</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>pH</b>	<b>Conductividad (<math>\mu\text{s/cm}</math>)</b>
0	0	3,3	290
1	10	4,8	730
2	20	7,7	950
3	30	9,4	1160
4	40	9,8	1340
5	50	10,2	1470

6	60	10,3	1560
7	120	10,6	2050

d) **100% CENIZA VOLANTE + 1% CMC**

#Prueba	tiempo (min)	pH	conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )
0	0	3,3	300
1	10	6,2	960
2	20	6,5	1130
3	30	7,3	1320
4	40	7,6	1480
5	50	8,2	1570
6	60	8	1670
7	120	8	1720

e) **75% CENIZA VOLANTE + 25% ESCORIA BLANCA + 1% CMC**

#Prueba	Tiempo (min)	pH	Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )
0	0	3,3	300
1	10	6,4	920
2	20	8,6	1030
3	30	9,3	1180
4	40	9,8	1260
5	50	9,9	1620
6	60	10	1530
7	120	10,2	1960

Nota: a) 100% EB + 1% CMC, b) 50% CV + 50% EB + 1% CMC, c) 25% CV + 75% EB + 1% CMC, d) 100% CV + 1% CMC, e) 75% CV + 25% EB + 1% CM

**Tablas 15.**

*Registro de los resultados obtenidos en la experimentación en el filtro para cada una de las composiciones con bentonita*

a) <b>100% ESCORIA BLANCA + 10% BENTONITA</b>			
#Prueba	tiempo (min)	pH	conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )

0	0	3,3	300
1	10	10,2	560
2	20	10,5	730
3	30	10,8	840
4	40	10,8	940
5	50	10,8	1000
6	60	10,7	1080
7	120	11	1340

b) **25% CENIZA VOLANTE + 75% ESCORIA BLANCA + 10% BENTONITA**

#Prueba	tiempo (min)	pH	conductividad ( $\mu S/cm$ )
0	0	3,2	280
1	10	9,5	560
2	20	9,8	710
3	30	10,1	800
4	40	10	850
5	50	10,1	960
6	60	10,2	1030
7	120	10,3	1300

c) **50% CENIZA VOLANTE + 50% ESCORIA BLANCA + 10% BENTONITA**

#Prueba	tiempo (min)	pH	conductividad ( $\mu S/cm$ )
0	0	3,3	300
1	10	7,6	640
2	20	9,6	840
3	30	9,9	970
4	40	9,9	1060
5	50	10	1090
6	60	10	1113
7	120	10,3	1500

d) **100% CENIZA VOLANTE + 10% BENTONITA**

#Prueba	tiempo (min)	pH	conductividad ( $\mu S/cm$ )
0	0	3,3	330
1	10	8,9	1230
2	20	8,7	1360
3	30	9	1580
4	40	9	1560
5	50	9	1580
6	60	9	1660
7	120	9,2	1940

e)

75% CENIZA VOLANTE + 25% ESCORIA BLANCA + 10% BENTONITA			
#Prueba	tiempo (min)	pH	conductividad ( $\mu S/cm$ )
0	0	3,3	300
1	10	8.2	680
2	20	9.4	900
3	30	9,8	1070
4	40	9.8	1250
5	50	9,6	1330
6	60	10	1410
7	120	10,4	1600

Nota: Datos de pH y conductividad de a) 100% EB + 10% Bentonita, b) 50% CV + 50% EB + 10% Bentonita, c) 25% CV + 75% EB + 10% Bentonita, d) 100% CV + 10% Bentonita, e) 75% CV + 25% EB + 10% Bentonita

## APENDICE B

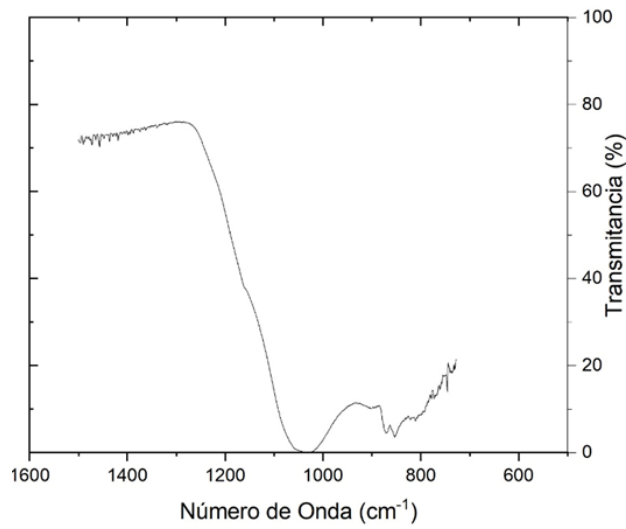
### Figura 1.

*Registro fotográfico del ensayo realizado*



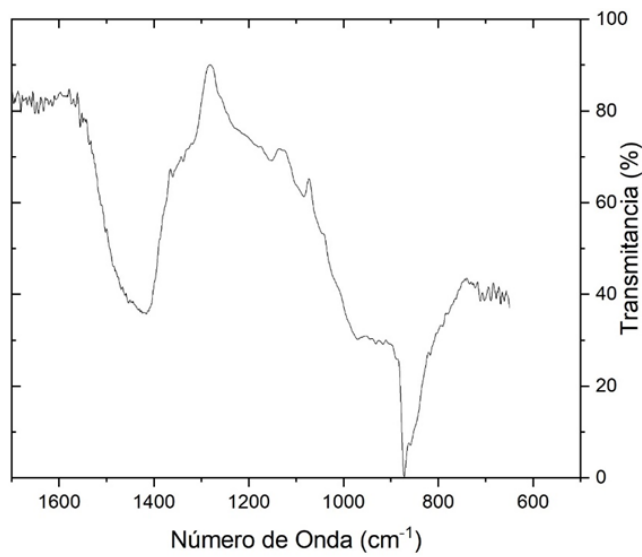
### Figura 2

*Caracterización de fases presentes en la Ceniza Volante*



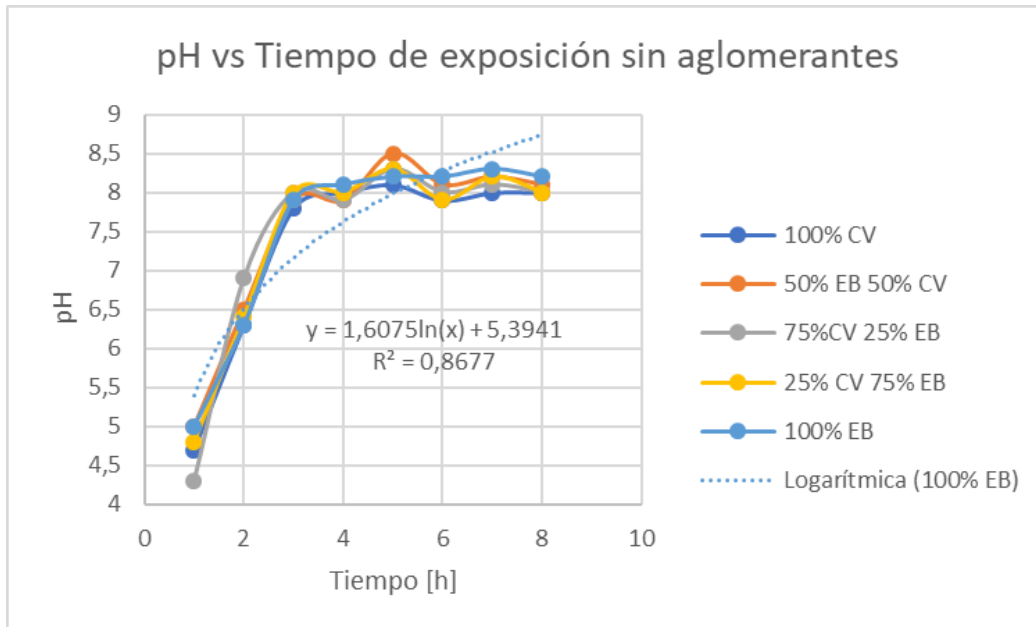
**Figura 3**

*Caracterización de fases presentes en la Escoria Blanca*



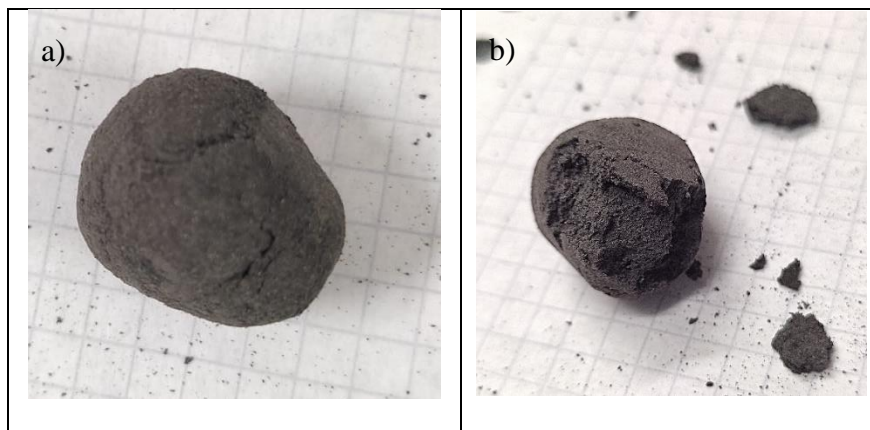
**Figura 4.**

*Gráfica de pH vs Tiempo de los datos obtenidos por las pruebas de contacto entre los residuos y el DAM.*



**Figura 5.**

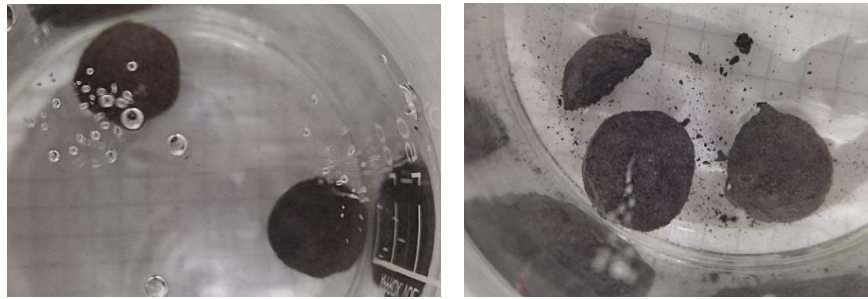
*Registro fotográfico de la prueba a la caída*



Nota. a) Pellet con composición 75% Ceniza volante + 25% Escoria Blanca + 1% CMC y b) 75% Ceniza Volante + 25 % Escoria Blanca + 10 % Bentonita

**Figura 6**

Evidencia del Comportamiento de los pellets aglomerados con CMC



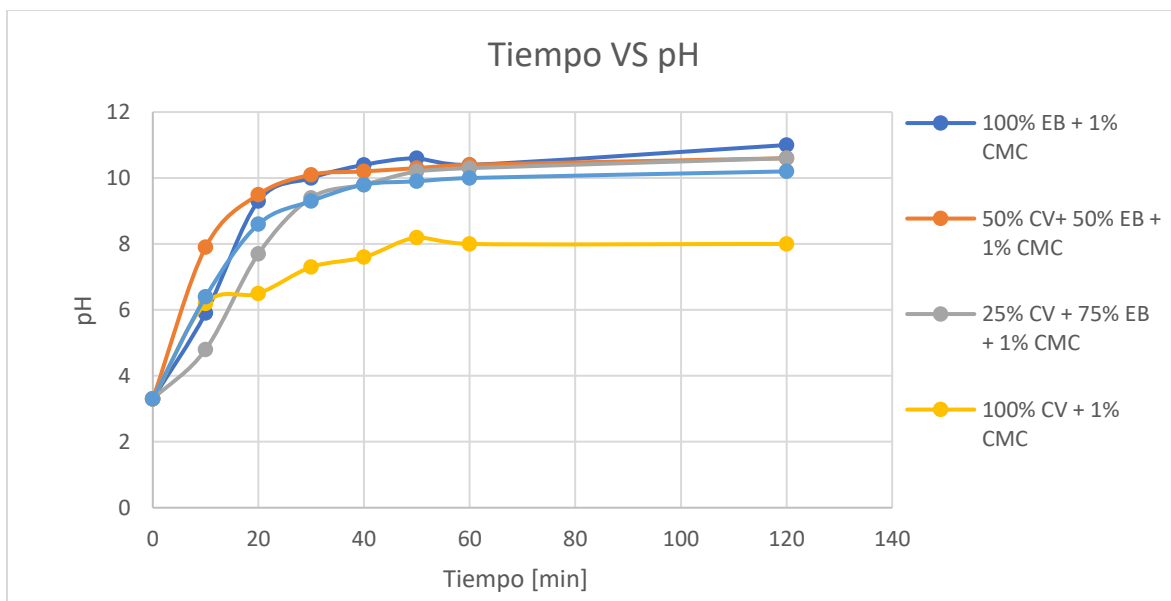
**Figura 7**

Evidencia fotográfica de los pellets que requirieron proceso de sinterización



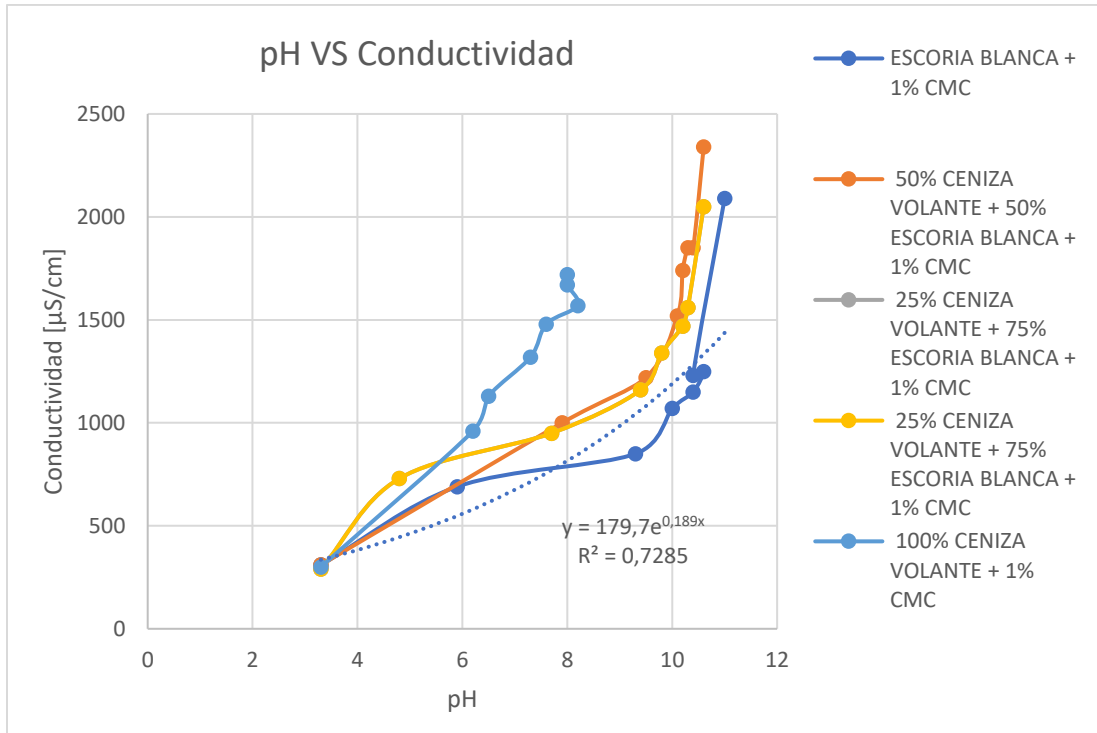
**Figura 8.**

Comparación de los resultados de pH y tiempo recopilados en la tabla 8



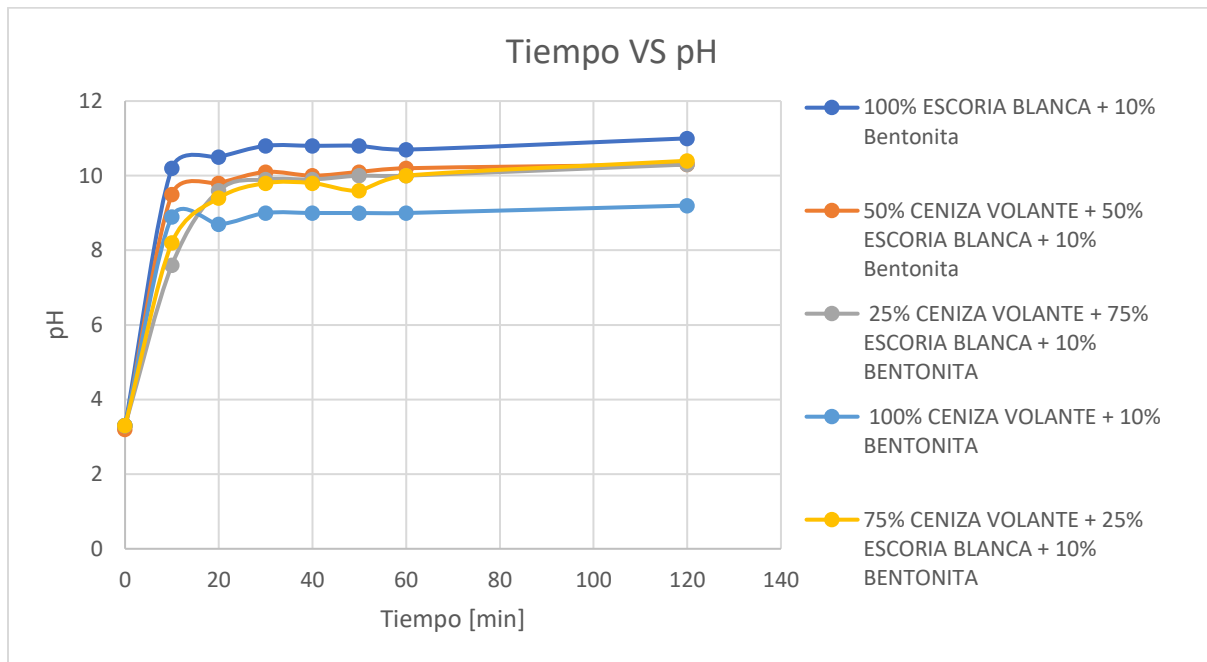
**Figura 9.**

*Comparación de los resultados de conductividad y pH recopilados en la tabla 13*



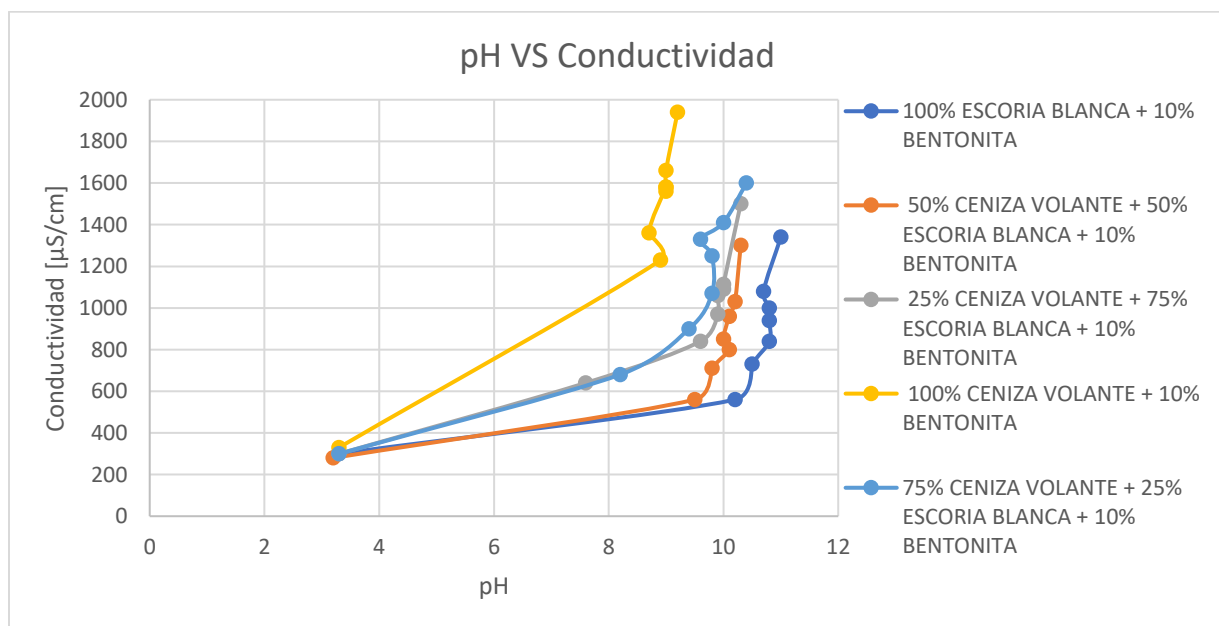
**Figura 10**

*Comparación de los resultados de conductividad y tiempo recopilados en la tabla 15*



**Figura 11.**

*Comparación de los resultados de conductividad y tiempo recopilados en la tabla 15*



**Figura 12**

*Datos de pH VS conductividad de las dos mejores composiciones de pellets elegidas durante la prueba*

