

Remoción de cromo y cadmio en aguas residuales mediante materiales  
geopoliméricos a base de piedra pómez

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Química

Jaznemaleth Grillo Garavito

Directora

Ángela Marcela Montaña, Química, Ph.D.

Codirectora

Claudia González Cuervo, Física, Ph.D.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Bucaramanga-Colombia

2019

**Dedicatoria**

Este trabajo se lo dedico a Dios,

A mis padres,

A mis hermanos

Y a mi pequeña sobrina Ana.

### **Agradecimientos**

Primero a Dios porque a pesar de mí, nunca me abandonó.

A mis padres, mi madre por ser siempre amorosa, dedicada y justa, a mi padre por darme la oportunidad y por confiar en mí hasta el final, y aunque no estará su cuerpo presente, sé muy bien que nunca me ha dejado sola y que siempre va a caminar junto a mí. A mis hermanos por estar siempre, por ser mis muros de apoyo incondicional y tenderme su mano sin juzgar y sin esperar nada a cambio. A mi sobrina Ana Isabel por levantarme en las mañanas con canciones, besos, pitos, platillazos, mordidas y todas esas cosas que me hacen más fácil empezar el día.

A la profe Ángela y la profe Claudia, nunca me alcanzaran las palabras de agradecimiento. Son lo máximo.

A aquellas personas que, en algún momento puntual durante todo este tiempo, con una sonrisa, una palabra o con su compañía me hicieron pensar que si se puede. A mis amigos, especialmente a Giss por sus regaños, a Manu por sus largas e interminables charlas, a Angie por su paciencia, a Karo y Kate por acompañarme durante largas noches de traspasos, en los momentos más difíciles y en la distancia, a todos y cada uno, gracias porque a su lado aprendí que la vida es más fácil si se comparte la alegría.

A la escuela de química, y al laboratorio de Química ambiental por su apoyo. Al laboratorio instrumental de análisis químico y al laboratorio químico de consultas industriales por su colaboración.

**Tabla de Contenido**

1. Introducción .....	15
2. Objetivos.....	17
2.1. Objetivo General .....	17
2.2. Objetivos específicos.....	17
3. Marco Teórico.....	18
3.1. Silicatos .....	18
3.1.2. Propiedades de los silicatos. ....	19
3.2. Piedra pómez.....	20
3.3. Geopolímeros.....	21
3.3.1. Aplicaciones de los geopolímeros.....	21
3.3.1. Geopolímeros como adsorbentes .....	23
3.4. Tratamiento químico de los residuos: .....	24
3.2. Cromo .....	24
3.2.1. Riesgos.....	25
3.2.2. Efectos cancerígenos .....	25
3.3. Cadmio .....	25
3.3.1. Toxicidad aguda .....	26
3.3.2. Toxicidad crónica .....	27
3.3.3. Cadmio y cáncer.....	27
3.4. Normatividad en Colombia .....	27

# GEOPOLÍMERO DE PUMITA PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS

	7
3.5. Isotherma de adsorción de Langmuir .....	28
3.6. Isotherma de adsorción de Freundlich .....	29
4. Parte experimental.....	30
4.1. Síntesis del geopolímero: .....	30
4.2. Caracterización estructural de los geopolímeros obtenidos .....	31
4.2.1. Espectroscopia electrónica de barrido (SEM).....	31
4.2.2. Espectroscopia infrarroja (FTIR) .....	32
4.2.3. Difracción de rayos X (DRX) .....	32
4.3. Pruebas de sorción.....	32
4.3.1. Tiempo de contacto .....	33
4.3.2. Dosis de sorbente .....	34
4.3.3. Variación del pH .....	35
4.3.4. Pruebas de sorción en residuos industriales.....	35
4.4. Lavado del material.....	36
4.5. Caracterización después de las pruebas de sorción.....	36
5. Resultados.....	37
5.1 Caracterización de la Piedra pómez y el geopolímero .....	37
5.1.1. SEM piedra pómez y geopolímero sintetizado .....	37
5.1.2. FTIR piedra pómez y geopolímero sintetizado.....	38
5.1.3. DRX de la piedra pómez y el geopolímero sintetizado.....	39
5.2. Pruebas de sorción.....	41
5.2.1. Determinación de parámetros para la remoción de cromo .....	41
5.2.1.1. Variación del tiempo de contacto para remoción de cromo: .....	41
5.2.1.2. Variación de la dosis de geopolímero para remoción de cromo .....	46

# GEOPOLÍMERO DE PUMITA PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS

	8
5.2.1.3. Variación del pH para la remoción de cromo .....	47
5.2.2. Determinación de parámetros para la remoción de cadmio.....	48
5.2.2.1. Variación del tiempo de contacto para remoción de cadmio .....	49
5.2.2.2. Variación la dosis de geopolímero para remoción de cadmio .....	52
5.2.2.3. Variación del pH para la remoción de cadmio.....	53
5.2.3. Pruebas de sorción en residuos de la industria.....	55
5.2.3.1. Remoción en residuos provenientes de una curtiembre .....	55
5.2.3.2. Remoción en residuos provenientes del LQCI .....	57
5.3. Determinación de las isothermas de sorción .....	58
5.3.1. Isothermas de adsorción cadmio.....	60
5.3.2. Isothermas de adsorción cromo .....	63
5.4. Caracterización de los materiales después de las pruebas de adsorción .....	64
5.4.1. DRX de la piedra pómez y el geopolímero .....	64
6. Conclusiones.....	67
7. Recomendaciones .....	68
8. Divulgación de resultados .....	69
Referencias bibliográficas .....	70

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Clasificación de las estructuras de los polisialitos con sus respectivas aplicaciones .....	22
Tabla 2. Valores máximos permitidos para vertimientos en Colombia .....	28
Tabla 3. Proporción de los reactivos empleados en la síntesis del geopolímero .....	30
Tabla 4. Parámetros iniciales para evaluación del tiempo de contacto .....	41
Tabla 5. Parámetros iniciales para evaluación de la dosis de geopolímero .....	46
Tabla 6. Parámetros iniciales para la evaluación del pH de la solución .....	47
Tabla 7. Parámetros iniciales constantes de PP y GPP para remoción de cadmio .....	49
Tabla 8. Parámetros iniciales para la evaluación de la dosis de sorbente .....	52
Tabla 9. Parámetros iniciales para la evaluación del pH de la solución .....	53
Tabla 10. Parámetros para prueba de sorción de cromo en residuos curtiembre .....	55
Tabla 11. Parámetros para prueba de sorción de cadmio en residuos industriales .....	57
Tabla 12. Variables empleadas en el estudio .....	59
Tabla 13. Parámetros de modelos ajustados en adsorción de cadmio .....	62
Tabla 14. Parámetros de modelos ajustados en adsorción de cromo .....	63

**Lista de Figuras**

Figura 1. Disposición espacial en un tetraedro de silicio .....	18
Figura 2. Minerales filosilicados del grupo 2:1:1 .....	20
Figura 3. Micrografías a 1000X a) Piedra pómez y b) Geopolímero de piedra pómez .....	37
Figura 4. IR piedra pómez y geopolímero.....	39
Figura 5. Difractogramas Piedra pómez (PP) y Geopolímero (GPP).....	40
Figura 6. Evaluación del tiempo de contacto para la remoción de cromo con geopolímero	42
Figura 7. Evaluación de la capacidad de remoción de cromo con geopolímero .....	43
Figura 8. Evaluación del tiempo de contacto para la remoción de cromo con piedra pómez .....	44
Figura 9. Evaluación de la capacidad de remoción de cromo con piedra pómez.....	45
Figura 10. Evaluación de la dosis de geopolímero para la remoción de cromo .....	46
Figura 11. Evaluación del pH para la remoción de cromo.....	48
Figura 12. Evaluación del tiempo de contacto para la remoción de cadmio con geopolímero .....	49
Figura 13. Evaluación de la capacidad de remoción de cadmio con geopolímero.....	50
Figura 14. Evaluación del tiempo de contacto para la remoción de cadmio con piedra pómez. .....	51
Figura 15. Evaluación de la capacidad de remoción de cadmio con piedra pómez .....	51
Figura 16. Variación de la dosis de geopolímero para evaluar la eficiencia en la remoción de cadmio. ....	53
Figura 17. Evaluación del pH en la remoción de cadmio. ....	54

Figura 18. Porcentaje de efectividad en la remoción de cromo en muestras de curtiembre	56
Figura 19. Porcentaje de efectividad en la remoción de cadmio en residuos industriales ..	58
Figura 20. Porcentaje de efectividad en la remoción de cadmio .....	60
Figura 21. Porcentaje de efectividad en la remoción de cromo .....	60
Figura 22. Isotherma adsorción de Freundlich para cadmio .....	61
Figura 23. Isotherma adsorción de Langmuir para cadmio.....	61
Figura 24. Isotherma adsorción de Freundlich para Cromo.....	63
Figura 25. Isotherma adsorción de Langmuir para Cromo .....	63
Figura 26. Difractograma geopolímero antes y después de remoción.....	65
Figura 27. Difractograma piedra pómez antes y después de remoción .....	65

**Lista de apéndices**

Apéndice A. Variación del tiempo de contacto para remoción de cromo con geopolímero	75
Apéndice B. Variación del tiempo de contacto para remoción de cromo con piedra pómez .....	76
Apéndice C. Variación de la dosis de geopolímero para remoción de cromo .....	76
Apéndice D. Variación de la dosis de geopolímero para remoción de cromo .....	77
Apéndice E. Variación del tiempo de contacto para remoción de cadmio con geopolímero .....	77
Apéndice F. Variación del tiempo de contacto para remoción de cadmio con piedra pómez .....	78
Apéndice G. Variación la dosis de geopolímero para remoción de cadmio .....	79
Apéndice H. Variación del pH para la remoción de cadmio .....	79

**RESUMEN**

**Título:** Remoción de cromo y cadmio en aguas residuales mediante materiales geopoliméricos a base de piedra pómez\*

**Autor:** Jaznemaleth Grillo Garavito\*\*

**Palabras clave:** Geopolímero, geopolimerización, pumita, adsorción, isoterma, DRX, SEM, Absorción atómica,

**Resumen:** Este trabajo considera el uso de un material geopolimérico a base de piedra pómez, para capturar iones de cromo y cadmio presentes en las aguas residuales y así reducir su concentración en el recurso hídrico para reducir la exposición de la población a enfermedades asociadas con la acumulación de metales en el cuerpo. La síntesis del geopolímero comenzó a partir de la activación alcalina de piedra pómez con silicato de sodio comercial, el uso de arena: piedra pómez en una proporción de 1: 1 y 31 horas de reacción. La caracterización morfológica y cristalográfica del material geopolimérico y su precursor se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopia infrarroja (IR) con transformada de Fourier y difracción de rayos X (DRX). Para evaluar el proceso de sorción, se realizó un estudio del tiempo de contacto, dosis de geopolímero, y pH inicial en soluciones patrón de Cloruro de cromo y sulfato de cadmio. La concentración de los metales se determinó usando espectroscopia de absorción atómica. Después se realizó la determinación de las isotermas de sorción empleando los modelos de Freundlich y Langmuir. Finalmente se hicieron ensayos de remoción en muestras de origen industrial. Posterior a los ensayos de sorción se caracterizó nuevamente el geopolímero mediante DRX y espectrometría de dispersión de rayos X (EDS).

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Directora: Ángela Marcela Montaña Angarita, PhD Química. Codirectora: Claudia Paulina González Cuervo, PhD Ciencias-Física.

**ABSTRACT**

**Title:** Removal of chromium and cadmium in wastewater using geopolymeric materials based on pumice stone\*

**Author:** Jaznemileth Grillo Garavito\*\*

**Keywords:** Geopolymer, geopolymerization, pumice, adsorption, isothermal, DRX, SEM, Atomic Absorption,

**Abstract:** This work considers the use of a geopolymeric material based on pumice stone, to capture chromium and cadmium ions present in wastewater and thus reduce its concentration in the water resource to reduce the population's exposure to diseases associated with accumulation of metals in the body. The synthesis of the geopolymer began from the alkaline activation of pumice with commercial sodium silicate, the use of sand: pumice in a ratio of 1: 1 and 31 hours of reaction. The morphological and crystallographic characterization of the geopolymeric material and its precursor was performed by scanning electron microscopy (SEM), infrared (IR) spectroscopy with Fourier transform and X-ray diffraction (XRD). To evaluate the sorption process, a study of contact time, geopolymer dose, and initial pH in standard solutions of Chromium Chloride and Cadmium Sulfate was performed. The metal concentration was determined using atomic absorption spectroscopy. The determination of the sorption isotherms was then carried out using the Freundlich and Langmuir models. Finally, removal tests were carried out on samples of industrial origin. After the sorption tests, the geopolymer was again characterized by DRX and X-ray dispersion spectrometry (EDS).

---

\* Bachelor thesis

\*\* Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Directora: Ángela Marcela Montaña Angarita, PhD Química. Codirectora: Claudia Paulina González Cuervo, PhD Ciencias-Física.

## 1. Introducción

En varias zonas de Colombia es preocupante la baja disponibilidad de agua y es por esta razón que su uso se ve restringido, esto ocurre en gran parte porque en las actividades industriales y mineras se generan residuos sólidos, material orgánico y material vegetal que son vertidos en las fuentes hídricas, de las cuales no existen a día de hoy, cifras actualizadas que brinden información real de la composición y la cantidad de residuos que terminan en lagunas, lagos, ciénagas y ríos. En la mayoría de industrias del país, como la orfebrería y el curtido de pieles, se generan residuos contaminantes que principalmente por su cercanía o a causa de lluvias y erosión son arrastrados a mares y ríos, ocasionando altos costos ambientales y económicos; encontrándose dentro de estos residuos comúnmente altas concentraciones de metales pesados. (Reyes, Vergara, Torres, Díaz, & González, 2016)

A esta problemática se suma que los organismos de control colombianos como son el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MINAMBIENTE) y Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), realizan poco seguimiento a los vertidos que se generan en las empresas, y conceden a las mismas, licencias ambientales en la mayoría de ocasiones sin reparar en los daños que se pueden provocar a la naturaleza ya que comúnmente, no son informadas sobre los valores reales de las concentraciones de subproductos, todo esto para evitar ser sancionadas. (Artuz, Martinez, & Morales, 2008)

Los metales pesados corresponden a una de las formas de contaminación más peligrosa del medio ambiente y pertenecen a aquellos cationes que poseen un número atómico mayor a 23, estos metales no son biodegradables, se amontonan en forma de compuestos orgánicos durante mucho tiempo o se disuelven en forma iónica y debido a que no se degradan, (Sánchez & Sharon, 2016) entran a formar parte de las vertientes hídricas que terminan en el consumo animal y humano de esta manera se absorben con mayor facilidad en los organismos generando consecuencias que afectan su salud e incluso pueden producir la muerte.

Estos antecedentes han generado un aumento en el interés por el estudio de materiales adsorbentes como lo son los geopolímeros los cuales ayudan en la remoción y eliminación de metales, tintes y otros contaminantes en aguas residuales, gracias a su eficiencia, baja rentabilidad y ecología. Estos estudios han arrojado resultados bastante interesantes ya que se han obtenido altos porcentajes de eliminación de diferentes sustancias en aguas de desecho. Un ejemplo es en el caso de adsorción y fotodegradación de tintes, donde según los reportes se ha logrado hasta un 98% de eficiencia. (Siyal et al., 2018)

En busca de diferentes materiales, para la creación de nuevos geopolímeros que cuenten con mejoras en sus propiedades físicas y químicas las cuales ayuden en la limpieza de todo tipo de residuos presentes en aguas de desecho, surge la idea de sintetizar geopolímeros a partir de piedra pómez como materia prima, ya que este mineral es altamente poroso, propiedad que es aprovechada en el geopolímero para capturar iones metálicos, además tiene una composición mayoritariamente de sílice y de alúmina, convirtiéndose en una fuente perfecta de aluminosilicatos para la síntesis de geopolímeros. La piedra pómez además de ofrecer una gran ventaja morfológica y química, también brinda una ventaja económica, ya que es una puzolana natural de bajo costo.

Sin duda, estas razones son suficientes para pensar que con estos materiales se pueden obtener grandes resultados que permitan disminuir de gran manera el impacto en el medio ambiente ocasionado por los vertimientos de las industrias a las fuentes hídricas. Objetivos

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo General**

Sintetizar y caracterizar geopolímeros a base de piedra pómez para la remoción de metales de aguas residuales de la industria.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar estructural, química y morfológicamente la materia prima
- Sintetizar geopolímeros a base de piedra pómez
- Caracterizar estructural, química y morfológicamente los geopolímeros obtenidos
- Evaluar el potencial de los geopolímeros obtenidos para la remoción de Cromo y Cadmio en aguas residuales.

### 3. Marco Teórico

#### 3.1. Silicatos

Los silicatos están considerados como la clase de mineral más importante puesto que abundan en la tierra en grandes proporciones, estando cerca del 90% de la corteza terrestre constituida por minerales que son silicatos. De cada 100 átomos en la tierra, 60 son de oxígeno, más de 20 son de silicio y de 6 a 7 de aluminio.(Dana & Hurlbut, 1969)

Los silicatos tienen como unidad fundamental un tetraedro de silicio ( $\text{SiO}_4$ )<sup>-4</sup>, cada unidad está formada por cuatro átomos de oxígeno ( $\text{O}^{2-}$ ) coordinados por un átomo de silicio ( $\text{Si}^{+4}$ ), donde cada átomo de oxígeno es un vértice del tetraedro regular Figura 1 . (Besoain, 1985).

Todos los silicatos contienen unidades tetraédricas  $\text{SiO}_4$  que pueden unirse compartiendo vértices, pero nunca compartiendo aristas o caras.(Douglas, McDaniel, & Alexander, 1994)

Los oxígenos del vértice de los tetraedros son compartidos con los tetraedros formando un plano común de oxígeno dentro de la estructura. En el plano compartido, 2/3 de los iones-oxígeno son compartidos entre Si y Al. El otro 1/3 tiene su carga satisfecha con iones  $\text{H}^+$  para formar grupos OH Figura 2. (Adams, 1995)



Figura 1. Disposición espacial en un tetraedro de silicio.(Ibañez, Moreno, & Gisbert, 2011)

Los silicatos proporcionan una interesante serie de tipos estructurales que muestran mayor variedad que la encontrada ordinariamente para los compuestos de otros elementos. La causa fundamental de variación de composición de los minerales es la sustitución isomorfa de un ion por otro. La extensión de la sustitución isomorfa de iones de la misma carga está determinada por los tamaños relativos de los iones. Si los tamaños son muy parecidos (dentro del 15%) puede producirse una sustitución isomorfa completa. Los minerales silicatos tienen varias características esenciales que deben recordarse. Cuando hay presentes otros iones (iones de metales alcalinos o alcalinotérreos) en la estructura, por lo general comparten oxígenos de los grupos  $\text{SiO}_4$  para dar una configuración octaédrica alrededor del catión. El aluminio puede reemplazar al silicio en los tetraedros  $\text{SiO}_4$ , lo que requiere la adición de otro catión o la sustitución de uno por otro de mayor carga para mantener el equilibrio de cargas. El aluminio puede ocupar también sitios octaédricos. (Douglas et al., 1994)

**3.1.2. Propiedades de los silicatos:** Debido a su estructura una de las propiedades más importantes que poseen los silicatos es el tipo de enlace interlaminar que pueden llegar a crear, este tiene un efecto significativo sobre las propiedades físicas y químicas de los silicatos laminares.

El enlace dentro de las unidades laminares es más fuerte que entre laminas adyacentes; cuando el mineral es sometido a estrés físico o térmico ocurren fracturas a lo largo del plano basal entre unidades laminares. Esta es la razón de las formas de hojuelas que presentan macroscópicamente los cristales de silicatos laminares. A medida que el enlace interlaminar es más fuerte más crece el cristal en la dimensión antes de fracturarse. Así el tamaño de los cristales de los silicatos laminares es una consecuencia directa de la fuerza de enlace interlaminar. La dureza, así como la expansión del mineral es una función de la fuerza de enlace interlaminar. De la misma manera, la cantidad de superficie accesible a moléculas polares está relacionada a la energía del enlace interlaminar. La superficie específica de los silicatos laminares está relacionada a sus propiedades de expansión y puede ser externa o interna + externa. La superficie externa se refiere a las caras y bordes del cristal; pero la superficie interna solamente al área de las caras del plano basal. El espaciado basal de los silicatos laminares está determinado por: 1) El número de capas O-OH por unidad

estructural en la dimensión y 2) La presencia de iones o moléculas polares en el plano basal.  
(Adams, 1995)

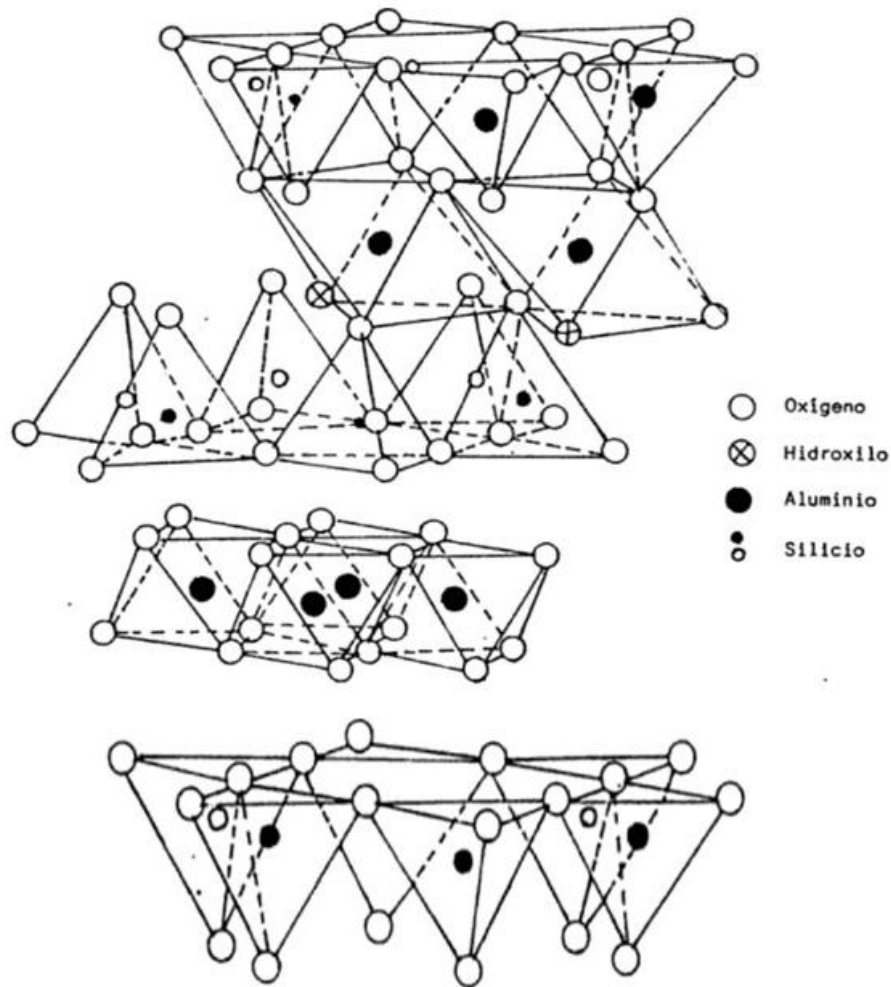


Figura 2. Minerales filosilicados del grupo 2:1:1 ((Adams, 1995)

### 3.2. Piedra pómez

Conocida también con el nombre de pumita, es un aluminosilicato de origen volcánico el cual posee un contenido de sílice superior al 50%, su estructura principalmente está compuesta de partículas vítreas, debido a su origen, la piedra pómez presenta dentro de su estructura una gran cantidad de poros y presentan una alta resistencia en temperaturas

elevadas, es por esto que comúnmente es utilizada en la industria de la construcción para la fabricación de morteros, destinados a mejorar las condiciones térmicas de las construcciones(Nordberg, 2012)

La piedra pómez se obtiene por la solidificación de las escorias bajo una presión de agua de 2 hasta 2,5 atm y por aumento de 4 a 5 veces su volumen. La piedra pómez se puede fabricar con una granulometría de 0 hasta 30 mm. La densidad debería estar comprendida entre 500 y 750 kg/m<sup>3</sup>. (Margarida, 1984)

### 3.3. Geopolímeros

El termino Geopolímero se introdujo en 1979 para la designación química de polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos procedentes de la reacción química conocida como geopolimerización. (Chang, Raymond & College, 2002)(IAPI, 2018)(Joseph Davidovits & France, 2018)

La estructura de los geopolímeros está conformada por una red polimérica de silicatos (Si-O-Al) constituida por tetraedros de SiO<sub>4</sub> y AlO<sub>4</sub> enlazados alternadamente con átomos de oxígeno. El aluminio Al<sup>3+</sup> al tener un número de coordinación de cuatro con relación al oxígeno crea un desbalance de carga negativa y, por lo tanto, la presencia de cationes como el K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup> son esenciales para mantener la neutralidad en la matriz. (Joseph Davidovits & France, 2018)

**3.3.1. Aplicaciones de los geopolímeros:** Dependiendo de la relación Si:Al obtenido en el gel polimérico se puede dar la aplicación del material geopolimérico, tal y como se muestra en la Tabla 1

Tabla 1. *Clasificación de las estructuras de los polisialitos con sus respectivas aplicaciones*

<b>Clasificación</b>	<b>Estructura del monómero</b>	<b>Aplicación</b>
Polisialato (PS) Si-Al =1:1	Mn- (Si-O-Al-O-)n	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aislamiento térmico</li> <li>• Resistencia al fuego</li> </ul>
Polisialato siloxo (PSS ) Si-Al =2:1	Mn- (Si-O-Al-O-Si-O-)n	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Refractarios para fundición de aluminio</li> <li>• Cementos de alto rendimiento</li> <li>• Residuos tóxicos</li> </ul>
Polisialato disiloxo (PSDS) Si-Al =3:1	Mn- (Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)n	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compuestos resistentes al fuego</li> <li>• Materiales útiles para su uso en el rango de temperatura 650-1000°C</li> </ul>

Fuente: (J. Davidovits, 1991)

**3.3.1. Geopolímeros como adsorbentes:** Según la elección de la materia prima, es decir del aluminosilicato empleado en su síntesis y de las condiciones en que se producen los geopolímeros (temperatura, concentración alcalina, contenido de sílice y otros), dependen sus propiedades y presentan diferentes grados de porosidad y de afinidad por ciertos metales. Un ejemplo son los geopolímeros a base de ceniza volante que son los más empleados para remoción de metales ya que como son residuos obtenidos durante combustión son relativamente fáciles de conseguir y no representan un alto costo, además el uso de geopolímeros en base a ceniza volante ha permitido obtener porcentajes de remoción de hasta el 93% de  $\text{Cu}^{2+}$  (Al-Harahsheh, Al Zboon, Al-Makhadmeh, Hararah, & Mahasneh, 2015) lo cual ha incentivado aún más la exploración de este campo empleando otros materiales que brinden mayor porosidad y de esta forma obtener mayor eficiencia en remoción (Duan, Yan, Zhou, & Ren, 2016). Otro ejemplo en el estudio de adsorción con geopolímeros, es el de geopolímeros a base de metacaolín, donde se ha observado que el material es selectivo para cada ion, es decir, que presenta preferencias por iones determinados cuando ocurre la adsorción siendo el  $\text{Pb}^{2+}$  el de mayor preferencia seguido por  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  y el  $\text{Cr}^{3+}$  el ion de menor preferencia (Cheng, Lee, Ko, Ueng, & Yang, 2012).

Las investigaciones que se han llevado a cabo en la remoción de metales por sorción con geopolímeros, incluyen diferentes variables que permiten garantizar la efectividad del proceso, algunas de estas variables que se han considerado son temperatura, tiempos de contacto, pH, dosis de geopolímero, concentración inicial de metal, entre otras. (Al-Harahsheh et al., 2015) Como modelo de la importancia de estos parámetros se ha encontrado que, a baja alcalinidad, hay más especies positivas disponibles en la solución en la cual se desea hacer la remoción, estas especies compiten con los iones positivos presentes en los sitios activos en la superficie del geopolímero, así que un aumento en el pH, lleva a un mejor acceso de iones positivos hacia los sitios activos (Al-Harahsheh et al., 2015) .

Con respecto a los efectos que producen el tiempo de contacto o la dosis de geopolímero, se ha encontrado que los geopolímeros presentan valores óptimos donde ocurren saturaciones que evitan que se adsorban más iones y de esta forma se llegue a un equilibrio. También cuando la concentración inicial de iones aumenta, los sitios accesibles se ocupan

inmediatamente para adsorberlos, por lo tanto, una gran parte de los iones permanecen en la solución sin ser absorbidos por el sorbente (Gündoğan, Acemioğlu, & Alma, 2004)

### **3.4. Tratamiento químico de los residuos:**

El tratamiento químico de los residuos industriales tiene por objeto la detoxificación de estos, y es empleado como único proceso de tratamiento, o bien para reducir la toxicidad de un agente específico previo a su transporte, incineración y enteramiento. Existen varios métodos para el tratamiento de sustancias tóxicas estos son: precipitación-coagulación, neutralización, reducción y oxidación. Algunos tratamientos físicos como evaporación, destilación, filtración, evaporación. Estos métodos pretenden la transformación del agente nocivo en otra sustancia menos tóxica (Kausar et al., 2018).

Para elegir el tratamiento o procedimiento adecuado para el aprovechamiento o la correcta disposición final de los residuos generados en los laboratorios, se deben considerar algunos aspectos como: (Mera A et al, 2007)

- Volumen de los residuos generados
- Periodicidad de generación
- Posibilidad de recuperación
- Costo del tratamiento
- Tiempo máximo de almacenamiento

### **3.2. Cromo**

El cromo elemental (Cr) no se encuentra como tal en la naturaleza; el único mineral de cromo importante es la espinela, cromita o piedra de cromo hierro, que es cromito ferroso ( $\text{FeOCr}_2\text{O}_3$ ) y está ampliamente distribuida en la corteza terrestre. Además de ácido crómico, este mineral contiene cantidades variables de otras sustancias. La aplicación más importante

del cromo puro es el cromado de una gran variedad de equipos, como piezas de automóvil y equipos eléctricos. También es ampliamente utilizado en aleaciones con hierro y níquel para formar acero inoxidable, y con níquel, titanio, niobio, cobalto, cobre y otros metales para formar aleaciones con fines específicos.(Nordberg, 2012)

**3.2.1. Riesgos:** Los compuestos con cromo en estado de oxidación Cr (III) son considerablemente menos peligrosos que los compuestos de Cr (VI). Los compuestos de Cr(III) no se absorben fácilmente en el aparato digestivo y pueden combinarse con proteínas de las capas superficiales de la piel, formando complejos estables. Los compuestos de cromo en estado de oxidación Cr(VI) se absorben rápidamente después de la ingestión o la inhalación.(Nordberg, 2012)

**3.2.2. Efectos cancerígenos:** Debido al acomplejamiento que puede realizar el metal, los cromatos de zinc y calcio parecen ser los más cancerígenos y se cuentan entre los cancerígenos más potentes en humanos. También se ha descrito una mayor incidencia de cáncer de pulmón en personas expuestas a cromatos de plomo y a humos de trióxidos de cromo.(Nordberg, 2012)

### 3.3. Cadmio

El cadmio es muy resistente a la corrosión y se utiliza para su electrodeposición en otros metales, especialmente el acero y el hierro. Los tornillos, las tuercas de seguridad y diversas partes de los aviones y vehículos de motor están tratados con cadmio con el fin de protegerlos de la corrosión. Los compuestos de cadmio se utilizan también como pigmentos y estabilizadores de plásticos y en ciertas aleaciones. Las baterías pequeñas, portátiles y

recargables de cadmio que se utilizan, por ejemplo, en los teléfonos móviles representan un uso del cadmio cada vez mayor.

El cadmio puede representar un peligro para el medio ambiente y en muchos países se han adoptado medidas legislativas para reducir su uso y la consiguiente dispersión ambiental de cadmio.(Nordberg, 2012)

**3.3.1. Toxicidad aguda:** La ingestión de bebidas contaminadas con cadmio en concentraciones superiores a 15 mg Cd/l produce síntomas de intoxicación alimentaria. Los síntomas son: náuseas, vómitos, dolor abdominal y, en ocasiones, diarrea. En los animales, la administración parenteral de cadmio en dosis superiores a 2 mg Cd/kg de peso corporal produce necrosis testicular. Sin embargo, no se ha descrito este tipo de efectos en el hombre.(Nordberg, 2012)

**3.3.2. Toxicidad crónica:** Los cambios asociados con la intoxicación crónica por cadmio pueden ser locales, en cuyo caso se afectan las vías respiratorias, o sistémicos, debidos a la absorción de cadmio. En las personas expuestas a niveles elevados de cadmio se encuentra frecuentemente una ligera anemia hipocrómica que podría deberse, por una parte, a un incremento de la destrucción de los hematíes y, por otra, a un déficit de hierro. Asimismo, en los casos de exposición a concentraciones muy elevadas de cadmio, pueden observarse manchas amarillas en los cuellos de las piezas dentarias y pérdida del sentido del olfato (anosmia). Se ha descrito que la exposición a concentraciones de aproximadamente 0,2 mg Cd/m<sup>3</sup> durante más de 20 años puede producir ciertos efectos pulmonares. En los casos de exposición de larga duración a niveles bajos de cadmio, los riñones son los órganos críticos, es decir, los primeros afectados. El cadmio se acumula en la corteza renal. Se calcula que las concentraciones superiores a 200 µg Cd/g de peso en fresco producen disfunción de los túbulos renales y disminución de la reabsorción de las proteínas de la orina. Hay que señalar que las lesiones renales inducidas por cadmio son irreversibles y pueden seguir progresando incluso después de que cesa la exposición.(Nordberg, 2012)

**3.3.3. Cadmio y cáncer:** En 1993, la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) evaluó el riesgo de cáncer derivado de la exposición al cadmio y concluyó que debía considerarse cancerígeno para el hombre. Puesto que los resultados de los estudios epidemiológicos adicionales son relativamente contradictorios, la posible carcinogenicidad del cadmio aún no está clara. Sin embargo, está claro que el cadmio posee propiedades cancerígenas en los experimentos con animales(Nordberg, 2012)

#### **3.4. Normatividad en Colombia**

En Colombia mediante la resolución n° 0883, del 18 de mayo de 2018, el Ministerio del medio ambiente y desarrollo sostenible, estableció los parámetros y los valores límites

máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Tabla 2 (Minambiente, n.d.).

Tabla 2. *Valores máximos permitidos para vertimientos en Colombia.* (Minambiente, n.d.)

Industria	Valores máximos permitidos	
	Cromo	Cadmio
Elaboración de alimentos y bebidas	0.5	0.05
Fabricación de papel y cartón	0.5	0.05
Fabricación de productos textiles	0.5	0.02
Fabricación de artículos de piel y curtido	1.5	
Fabricación de sustancias y productos químicos	0.5	0.05
Fabricación de ácidos inorgánicos y sus sales	0.5	0.1
Fabricación de plásticos	0.5	0.1
Fabricación de productos farmacéuticos		0.1
Fabricación de vidrio		0.1
Fabricación de cerámicos	1.0	0.1
Fabricación de artículos de hormigón, cemento y yeso		0.1
Fabricación de pilas, baterías y acumuladores	0.5	0.05
Fabricación de equipos eléctricos e iluminación	0.5	0.05

### 3.5. Isoterma de adsorción de Langmuir

La isoterma de Langmuir es uno de los modelos más utilizados para estudiar el proceso de adsorción. Las suposiciones de este modelo incluyen: la superficie adsorbente está en

contacto con el adsorbato presente en la solución, la superficie del adsorbente contiene una serie de sitios activos sobre los que adsorba el adsorbido y, finalmente, la adsorción comprende la unión de un solo elemento molecular monocapa en la superficie de adsorbato. (Gupta & Ali, 2004) La forma más comúnmente utilizada de este modelo viene dada por la siguiente ecuación (1):

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m} \quad (1)$$

donde  $K_L$  es constante en relación con el calor de adsorción y  $q_m$  es la máxima capacidad de adsorción de monocapa.

### 3.6. Isoterma de adsorción de Freundlich

La isoterma de Freundlich es un modelo empírico utilizado para describir la adsorción en sistemas acuosos. Implica una superficie de adsorción heterogénea y sitios activos con diferentes energías. La expresión matemática de este modelo se muestra en la siguiente ecuación (2): (Manohar, Noeline, & Anirudhan, 2006)

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2)$$

donde  $q_e$  es la masa de adsorbato por unidad de masa de adsorbente en equilibrio,  $C_e$  es la concentración de equilibrio del adsorbato en solución,  $K_F$  es la constante para un adsorbido y adsorbente dado en una temperatura especificada.

#### 4. Parte experimental

##### 4.1. Síntesis del geopolímero:

Para este trabajo se utilizó piedra pómez proveniente de la empresa Geopómez ubicada en el municipio de Sabaneta-Antioquia, Colombia.

La piedra pómez adquirida fue triturada, molida y tamizada a un tamaño de partícula de 125  $\mu\text{m}$ , con el objetivo de obtener materia prima de tamaño homogéneo; seguido a esto, la materia prima se caracterizó mediante las técnicas de difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y espectroscopia infrarroja.

La síntesis del geopolímero se realizó empleando como fuente de aluminosilicatos, piedra pómez, arena, y alúmina marca Merck con una pureza del 90% identificado con número CAS 1344-28-1 y silicato de sodio de grado comercial, con concentración 1.8 M, como solución alcalina activante. Las proporciones empleadas para cada uno de los reactivos empleados se encuentran en la Tabla 3; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Con base en las condiciones establecidas en trabajos anteriores desarrollados en el grupo de investigación LQOBio (C. P. González, Montaña, González, & Ríos, 2014), la síntesis se llevó a cabo manteniendo una relación 1:1 de arena respecto a la piedra pómez y se llevó la reacción de geopolimerización a  $80\pm 5$  °C durante un tiempo de 31 horas. En la Tabla 3 se suministran las cantidades empleadas de cada reactivo.

Tabla 3. *Proporción de los reactivos empleados en la síntesis del geopolímero*

Reactivo	Proporción
Arena	45 g
Piedra pómez	45 g

Alúmina	0,39 g
Silicato de sodio	129,9 mL

---

Los geopolímeros obtenidos se molturaron y se pasaron por un tamiz con malla de 125  $\mu\text{m}$  para ser caracterizados y usados posteriormente en las pruebas de sorción.

## 4.2. Caracterización estructural de los geopolímeros obtenidos

Después de obtener los geopolímeros, se procedió a realizar la caracterización estructural de estos y de su precursor con el fin de comprobar que se haya llevado a cabo el proceso de geopolimerización. Los análisis que se realizaron son:

**4.2.1. Espectroscopia electrónica de barrido (SEM):** El principio básico de un equipo de SEM consiste en la generación de un haz de electrones de alta energía (electrones incidentes EI), un grupo de lentes enfocan el haz y este impacta la superficie de la muestra generando como respuesta la salida de electrones que son detectados con dispositivos EverhartThornley y SED (Solid State Detector) y lo convierten en una señal digital que genera una imagen. (Clavijo, 2013). La piedra pómez y el geopolímero fueron analizados en un microscopio MIRA3 Tescan con detector EDX Bruker, ubicado en la universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga.

**4.2.2. Espectroscopia infrarroja (FTIR):** Este método estudia la emisión o absorción de energía radiante que se genera cuando interactúan la materia y la radiación electromagnética, según la frecuencia empleada las moléculas pueden rotar o vibrar (Desarrollo, De, Transformada, & Cemento, 2012). Las muestras fueron medidas en transmitancia versus número de onda ( $cm^{-1}$ ) en el equipo Bruker Tensor 2 que se encuentra en el laboratorio de instrumentación química ubicado en la escuela de química, de la Universidad Industrial de Santander.

**4.2.3. Difracción de rayos X (DRX):** Esta técnica permite identificar la estructura cristalina de un material, es decir si es amorfo, cristalino o ambos. El principio general consiste en hacer incidir un haz de rayos X sobre la materia, cuando los rayos son dispersados por el entorno, se crean interferencias entre los rayos produciendo el fenómeno de difracción (Skoog, James Holler, & Nieman, 2001). Las fases cristalinas fueron estudiadas en un difractómetro de polvo marca Bruker modelo D8 ADVANCE, con geometría DaVinci, usando un portamuestras de polimetilmetacrilato (PMMA), una radiación de cobre ( $Cu K\alpha \lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) y un detector lineal LynxEye; los datos se registraron con un paso de  $0,02035^\circ (2\theta)$  entre  $3,5^\circ - 70,0^\circ (2\theta)$ , operando con un voltaje de 40 kV y una corriente de 40 mA. Este equipo se encuentra en el laboratorio de rayos X de la Universidad Industrial de Santander ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará (PTG).

### **4.3. Pruebas de sorción**

Posterior a la caracterización estructural se llevaron a cabo las pruebas de sorción con el geopolímero y su precursor (piedra pómez), para esto se realizó la variación de tres parámetros con el fin de determinar las condiciones óptimas de adsorción de los metales estudiados. Para todas las pruebas se prepararon: una solución problema de 2 mg/L de sulfato de cadmio y una solución de 3 mg/L de cloruro de cromo. A las soluciones finales se les realizó la medición de cada uno de los metales mediante espectrometría de absorción atómica (AAS). La AAS es una técnica muy empleada en la determinación de elementos para muestras analíticas debido a su sensibilidad. El principio de su funcionamiento es dejar pasar

un haz que atraviesa la muestra en forma de gas, esta llega a un monocromador que selecciona la radiación, luego pasa a un detector para ser procesada y finalmente arrojar la lectura (Gallegos, Vega, & Noriega, 2012).

Para garantizar que el procedimiento de preparación de las soluciones y de las muestras y de su medición no se vea afectado por la acumulación de metales en los recipientes empleados, todo el material usado en los ensayos de sorción fue lavado empleando el método establecido por el IDEAM para la determinación de metales pesados en agua por absorción atómica.(Gaitan, 2017).

La preparación de las curvas de calibración utilizadas para determinar la concentración de cadmio y cromo mediante el método de AAS en las muestras se realizó siguiendo el procedimiento establecido por el Standard Methods for the examination of water and wastewater ((APHA), 2017).

**4.3.1. Tiempo de contacto:** Para las pruebas de tiempo de contacto se pesaron 0,05 g de cada uno de los materiales sorbentes por separado, en frascos ámbar. Después a cada frasco se le adicionaron 25 mL de solución de sulfato de cadmio y se dejó en agitación constante con velocidad de 200 rpm durante los tiempos de 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 y 27 horas. Este procedimiento se repitió cambiando la solución de sulfato de cadmio por la solución de cloruro de cromo. Luego de cumplir el tiempo de contacto se filtró cada muestra y se recolectaron los filtrados por separado en frascos ámbar. Con el fin de realizar la medición de la concentración final de los metales presentes empleando la técnica de AAS, a cada solución del filtrado recogido se disminuyó el pH a 2.0 adicionando una gota de ácido nítrico al 65% para eliminar las interferencias producidas por altas concentraciones de silicatos.

**4.3.2. Dosis de sorbente:** En la determinación de la dosis optima de sorbente se pesaron 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0 g de sorbente por separado en frascos ámbar. A cada frasco se les adicionó 25 mL de la solución de sulfato de cadmio y se dejaron en agitación constante durante tres horas y a una velocidad de agitación de 200 rpm. El procedimiento se repitió cambiando la solución de sulfato de cadmio por la solución de cloruro de cromo. Para realizar la medición de la concentración final de los metales presentes empleando la técnica de AAS, a cada solución del filtrado recogido se disminuyó el pH a 2.0 adicionando una gota de ácido nítrico al 65% para eliminar las interferencias producidas por altas concentraciones de silicatos.

**4.3.3. Variación del pH:** Para determinar el valor de pH adecuado se prepararon cuatro soluciones de cloruro de cromo y cuatro soluciones de sulfato de cadmio de pH 2, 3, 4, 5 y 6, el ajuste del pH se realizó empleando NaOH 0.1 M y HNO<sub>3</sub> al 0.5%. Después se pesaron 0.05 g de sorbente en recipientes separados y se adicionaron 25 mL de solución de cloruro de cromo a pH 2, el proceso se repitió con cada una de las soluciones de diferentes pH. Luego se pesaron 0.2 g de sorbente y se adicionaron 25 mL de solución de sulfato de cadmio a pH 2, este procedimiento se repitió con cada una de las soluciones de diferentes pH. El procedimiento se repitió cambiando la solución de sulfato de cadmio por la solución de cloruro de cromo. Para realizar la medición de la concentración final de los metales presentes empleando la técnica de AAS, a cada solución del filtrado recogido se disminuyó el pH a 2.0 adicionando una gota de ácido nítrico al 65% para eliminar las interferencias producidas por altas concentraciones de silicatos.

**4.3.4. Pruebas de sorción en residuos industriales:** Las pruebas de sorción se realizaron en diferentes muestras para cada uno de los metales. Para la determinación de cromo absorbido se emplearon residuos provenientes de la empresa de curtido de pieles Curtioriente ubicada en Chimita-Girón. Debido a que la concentración del residuo proveniente de la curtiembre estaba muy por encima de la concentración empleada en la determinación de los parámetros iniciales, se realizaron diferentes diluciones con el fin de encontrar una donde la concentración de cromo no fuese superior a 4 mg/L. En la determinación de cadmio absorbido se emplearon residuos facilitados por el laboratorio químico de consultas industriales de la Universidad Industrial de Santander (LQCI). La concentración de cadmio de los residuos del LQCI era de 2,51 mg/g. Después se pesaron 0,2 g de sorbente, se adicionaron 25 mL del residuo de la curtiembre y se dejó en contacto durante un tiempo de 9 horas con agitación constante de 200 rpm. El proceso se repitió con el residuo proveniente del LQCI, pero solo se empleando un tiempo de 3 horas. Para realizar la medición de la concentración final de los metales presentes empleando la técnica de AAS, a cada solución del filtrado recogido se disminuyó el pH a 2.0 adicionando una gota de ácido nítrico al 65% para eliminar las interferencias producidas por altas concentraciones de silicatos.

#### **4.4. Lavado del material**

El procedimiento de limpieza del material de vidrio del laboratorio, implica algunas operaciones que podrían resultar peligrosas si no se siguen las normas de seguridad; además la manipulación de objetos de vidrio, por si sola, ya representa un riesgo que debe manejarse convenientemente. (Reyes et al., 2016)

El material proveniente de los análisis de metales pesados (plomo, cadmio, níquel, cromo, cobre, zinc, aluminio, manganeso, hierro) viales y botellas plásticas se lavan con detergente neutro al 5%. Para preparar 30 litros de solución de detergente, adicionar en los recipientes correspondientes 28.5 litros de agua de la llave y 1500 mL del detergente neutro, homogenizar perfectamente. (Vanegas & Dueñas, 2017) Sumergir el material a lavar, dejar de 30 a 60 minutos (cambiar el detergente según el uso). Frotar vigorosamente con un churrusco adecuado el material. Enjuagar con abundante agua del grifo para asegurar la eliminación de trazas de detergente, ya que éste incide en la determinación del análisis. Dejar escurrir en las gradillas respectivas

Sumergir el material escurrido en una solución de  $\text{HNO}_3$  al 5% por un tiempo mínimo de 30 minutos (remover la solución de  $\text{HNO}_3$  según el uso y se deja en él por una hora. No dejar el material de vidrio de borosilicato por más tiempo en ácido para evitar el deterioro del vidrio. Para preparar una solución de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) al 5% adicionar en el recipiente correspondiente 28.5 litros de agua de la llave y 1500 mL de ácido nítrico al 65%. Homogenizar perfectamente, usar para ello guantes de nitrilo largos, gafas de seguridad, respirador con cartuchos para vapores ácidos, de ser necesario usar careta y delantal plástico. (Vanegas & Dueñas, 2017)

#### **4.5. Caracterización después de las pruebas de sorción**

Después de realizar las pruebas de sorción se realizó una caracterización estructural de los materiales sorbentes mediante DRX descrita en el numeral 4.2.

## 5. Resultados

Después de realizar las pruebas de sorción y la caracterización de los materiales sorbentes se obtuvieron los siguientes resultados.

### 5.1 Caracterización de la Piedra pómez y el geopolímero

Una vez sintetizado el geopolímero, se realizó una caracterización para ver el cambio estructural de este, respecto a su precursor la piedra pómez.

#### 5.1.1. SEM piedra pómez y geopolímero sintetizado

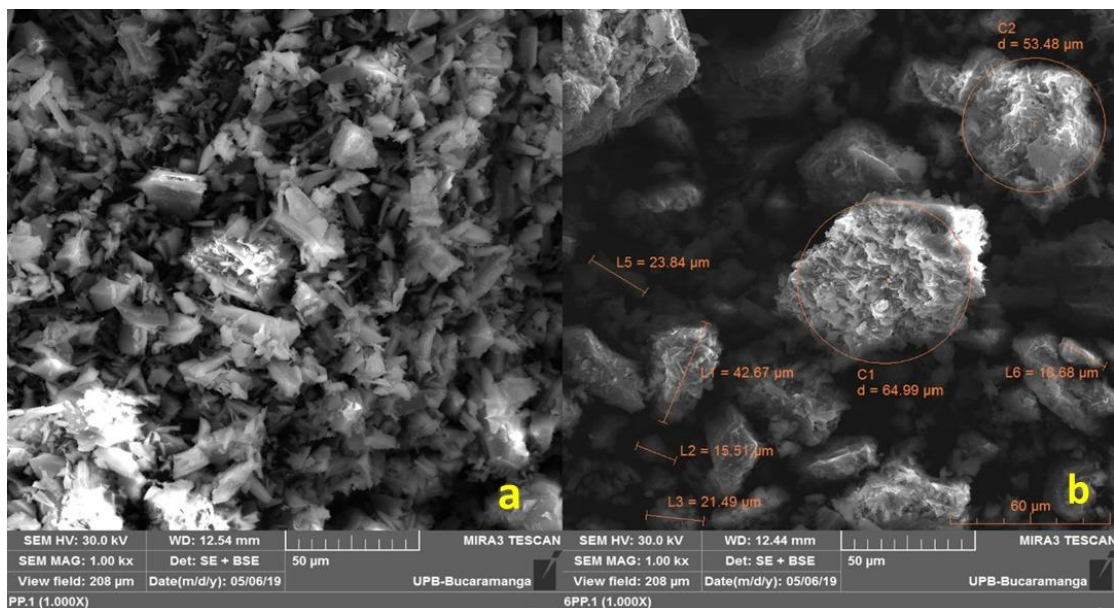


Figura 3. Micrografías a 1000X a) Piedra pómez y b) Geopolímero de piedra pómez

Las micrografías mostradas en la Figura 3. Micrografías a 1000X a) Piedra pómez y b) Geopolímero de piedra pómez Figura 3 corresponden a la materia prima (piedra pómez) y al geopolímero. La piedra pómez muestra una morfología cristalina, donde pequeñas partículas alargadas se distribuyen en la superficie de manera uniforme. Mientras tanto, en el geopolímero se puede ver la formación de algunos aglomerados, quizás como producto de la reorganización en tetraedros de  $\text{SiO}_4$  y  $\text{AlO}_4$  unidos alternativamente con átomos de oxígeno. Esta modificación estructural ocurrió durante la síntesis (A. K. González, Montaña, González, & Santos, 2017). También hay pequeñas partículas que dan una apariencia amorfa, atribuidas muy probablemente al proceso de geopolimerización, porque la activación alcalina no ocurre de manera uniforme.

**5.1.2. FTIR piedra pómez y geopolímero sintetizado:** En el espectro de color rojo correspondiente a la piedra pómez se observa en el rango de los  $1000 \text{ cm}^{-1}$  una banda de gran amplitud, producto de las vibraciones de los enlaces Si-O y Al-O (Burciaga-Díaz, Escalante-García, & Magallanes-Rivera, 2015), esta banda también se observa en el geopolímero sintetizado a un número de onda un poco menor, este corrimiento es ocasionado por las tensiones que se dan en los enlaces Si-O-Al como resultado del reordenamiento de los tetraedros en el proceso de geopolimerización.

Además, en el geopolímero se observa una banda en  $1460 \text{ cm}^{-1}$  atribuida a carbonatos, también se evidencia en  $1687 \text{ cm}^{-1}$  una banda correspondiente a las vibraciones Si-OH (Márquez et al., 2012), este enlace al igual que la formación de los carbonatos se dan en la geopolimerización, es por esto que estas bandas no se evidencian en la piedra pómez.

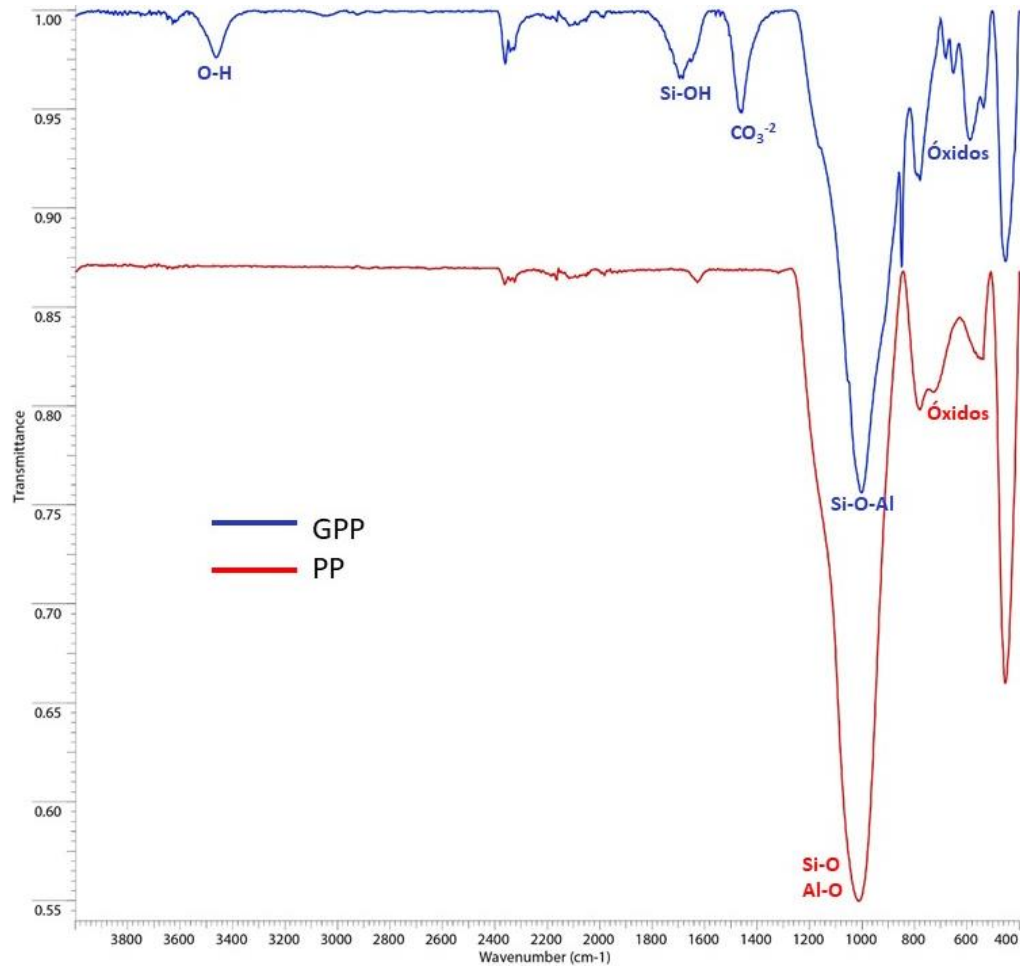


Figura 4. IR piedra pómez y geopolímero

**5.1.3. DRX de la piedra pómez y el geopolímero sintetizado:** Como caracterización final se realizó la toma de datos de difracción de rayos X, para determinar las fases cristalinas presentes en cada uno de los materiales y a su vez determinar si hubo cambio estructural en la síntesis.

Mediante la difracción de rayos x se determinó la composición mineralógica de la piedra pómez y se observó el cambio de cristalinidad una vez realizada la geopolymerización.

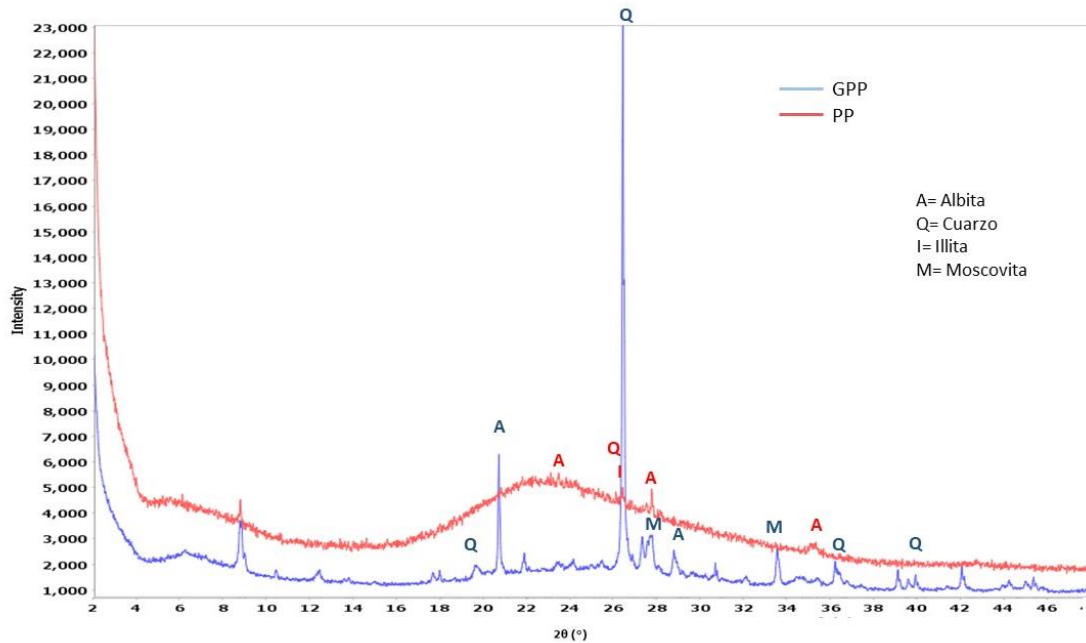


Figura 5. Difractogramas Piedra pómez (PP) y Geopolímero (GPP)

Las fases mineralógicas de las muestras se analizan por difracción de rayos X utilizando la base de datos PDF-4 + (ICDD Dr S K 2017). En la Figura 5 se puede ver en el rango  $2\theta$  entre  $25^\circ$  y  $30^\circ$ , la aparición de dos picos correspondientes a la albita (A) y el cuarzo (Q), minerales naturales formados principalmente por sílice y aluminio, también se encontró la presencia de óxido de hierro (I) ( $36^\circ$ ). Para el geopolímero, se evidencian fases cristalinas correspondientes a diferentes variedades macrocristalinas de cuarzo (Q) ( $21^\circ$ ,  $37^\circ$  y  $39^\circ$ ), también aparecen nuevas señales de albita (A) ( $28^\circ$  y  $23^\circ$ ). También existe la presencia de carbonato de sodio (CS), formado durante el proceso de geopolimerización (Ge et al., 2015; Messaoud, Hamdi, & Srasra, 2018). La piedra pómez presenta una estructura amorfa y bastante diferenciable con respecto al geopolímero el cual presenta una estructura cristalina, lo que permite establecer que el proceso de geopolimerización se ha producido con eficacia, cabe resaltar que este aumento de cristalinidad en el geopolímero es atribuido a su vez a la presencia de la arena agregada al momento de la síntesis, presentando esta una gran cantidad de cuarzo como fase cristalina.

## 5.2. Pruebas de sorción

Se realizó una curva de calibración para cada uno de los metales analizados que fue empleada para determinar la concentración final e inicial de las muestras. La preparación de estas curvas se hizo siguiendo el procedimiento establecido por el IDEAM para la determinación de metales pesados por AAS (Gaitan, 2017).

**5.2.1. Determinación de parámetros para la remoción de cromo:** Para determinar las condiciones a las cuales el geopolímero de piedra pómez remueve la mayor cantidad de cromo se evaluaron las siguientes condiciones.

### 5.2.1.1. Variación del tiempo de contacto para remoción de cromo:

Tabla 4. *Parámetros iniciales para evaluación del tiempo de contacto*

Parámetro	Valor
Dosis de piedra pómez	0,05 g
Dosis de geopolímero	0,05 g
Concentración CrCl <sub>3</sub>	3 mg/L
pH	4

Para evaluar el tiempo de contacto se utilizaron tiempos en intervalos de 3 horas y después se calculó el porcentaje de eficiencia de remoción y la capacidad de remoción del sorbente.

En la determinación del porcentaje de eficiencia en la remoción se empleó la siguiente ecuación (3):

$$\% \text{ Eficiencia de remoción} = \frac{[C_o - C_e]}{C_o} \times 100 \quad (3)$$

Donde  $C_o$  = concentración inicial

$C_e$  = concentración final

Como ejemplo, se muestra el cálculo realizado para los valores obtenidos en el tiempo de 3 horas, donde la concentración inicial obtenida mediante la curva fue de 2,9 mg/L y la concentración final es de 1,35 mg/L

$$\% \text{ eficiencia remoción Cromo} = \frac{2,9 - 1,35}{2,9} \times 100 = 53,40\%$$

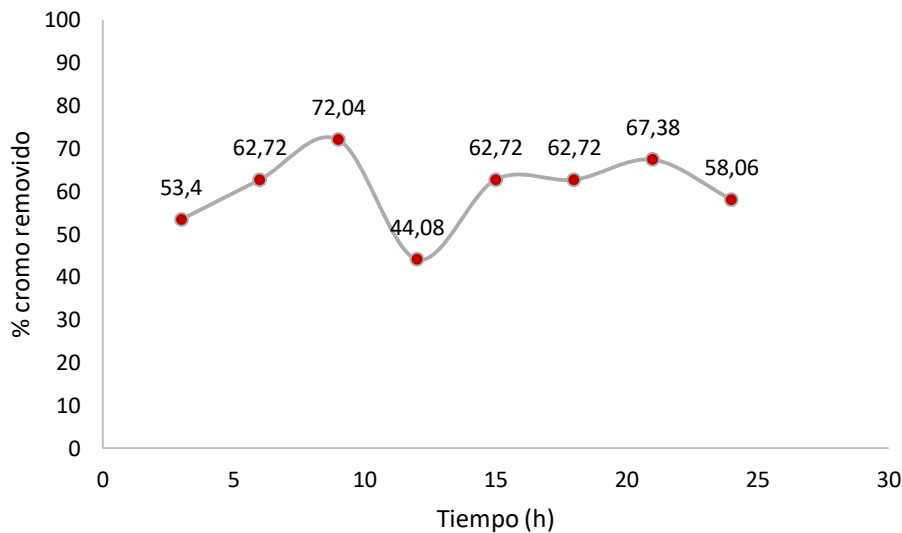


Figura 6. Evaluación del tiempo de contacto para la remoción de cromo con geopolímero

Se realizó una variación del tiempo de contacto de 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 y 24 horas manteniendo la dosis de geopolímero en 0,05 g y la concentración del cloruro de cromo de 3 mg/L, obteniendo que el mejor porcentaje de eficiencia de remoción con el geopolímero es en un tiempo de 9 horas con un 72,04 %, seguido por un tiempo de 21 horas con el 67,58%.

La capacidad de remoción permite determinar los miligramos de cromo por gramo de geopolímero que se encuentran en el equilibrio (Al-Zboon, Al-Harashsheh, & Hani, 2011).

Después de evaluar el porcentaje de efectividad de remoción, se determinó la capacidad de remoción mediante la siguiente ecuación (4):

$$\text{Capacidad de remoción } (q) = [C_0 - C_e] \frac{V}{m} \quad (4)$$

Donde V= volumen de sorbato (L)

m= masa del sorbente (g)

Como ejemplo se, se muestra el cálculo realizado para los valores obtenidos en el tiempo de 3 horas, donde la concentración inicial obtenida mediante la curva fue de 2,9 mg/L y la concentración final es de 1,35 mg/L.

$$(q) = [2,9 - 1,35] \frac{0,025}{0,05}$$

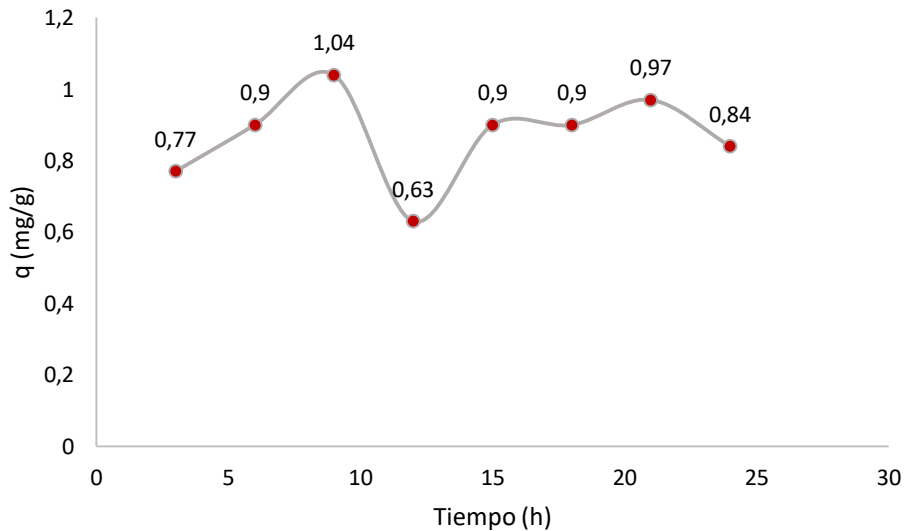
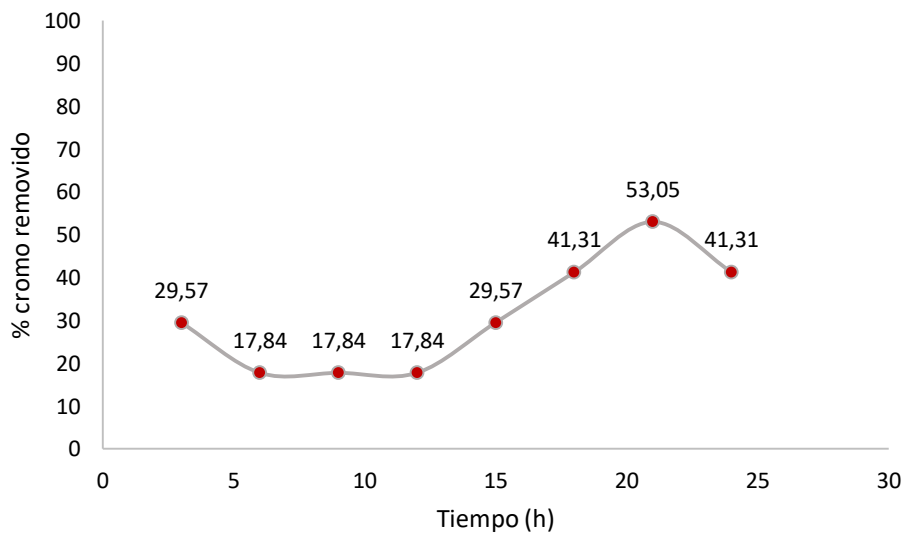


Figura 7. Evaluación de la capacidad de remoción de cromo con geopolímero

En la Figura 7 se puede observar que el geopolímero logra una capacidad de remoción de hasta 1,04 mg/g de cromo, este máximo se obtiene en un tiempo de 9 horas. El valor máximo de capacidad de remoción (1,04 mg/g) es el doble del menor valor de capacidad (0,63 mg/g), este dato confirma la determinación del tiempo necesario para la remoción de cromo y permite establecer el tiempo de 9 horas como el parámetro óptimo.



*Figura 8.* Evaluación del tiempo de contacto para la remoción de cromo con piedra pómez

Para realizar la evaluación de tiempo de contacto con piedra pómez, se realizaron muestras con tiempos de 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 y 24 horas, empleando una dosis inicial de 0,05 g. Se encontró que el porcentaje máximo de adsorción ocurre en un tiempo de 21 horas con un valor de 53,05 %, seguido por un porcentaje de 41,31% para los tiempos de 18 y 24 horas.

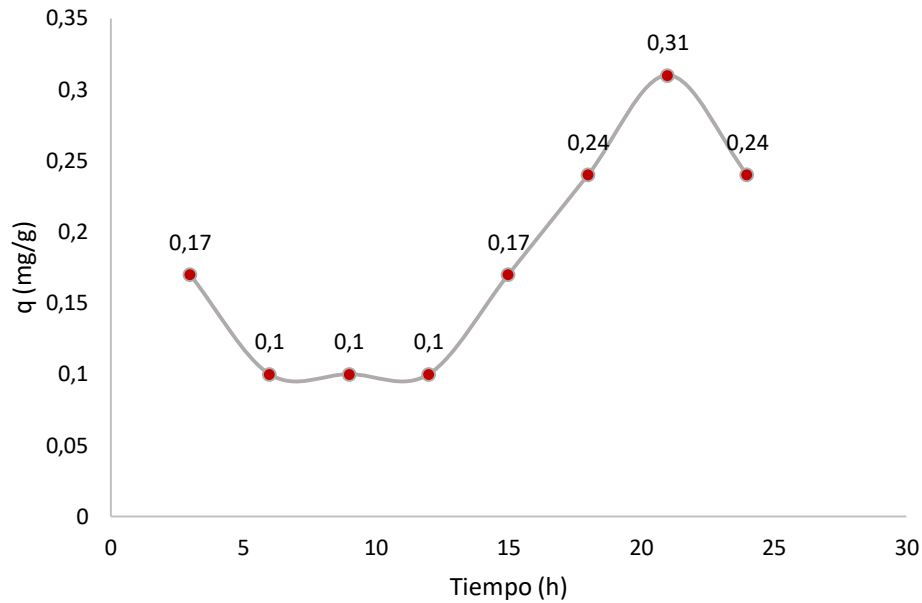


Figura 9. Evaluación de la capacidad de remoción de cromo con piedra pómez

En la Figura 9 se observa que la capacidad máxima de remoción de la piedra pómez es de 0,31 mg/g. Este valor es considerablemente bajo cuando se compara con la capacidad de remoción obtenida para el geopolímero sintetizado, ya que supone una tercera parte del valor máximo del geopolímero.

El estudio del tiempo de contacto permite no solamente establecer el tiempo óptimo para lograr un alto porcentaje de remoción, sino también inferir que el geopolímero posee mejores propiedades estructurales que su aluminosilicato precursor las cuales le confieren mejor capacidad de remoción.

**5.2.1.2. Variación de la dosis de geopolímero para remoción de cromo:** Después de establecer que el tiempo de contacto óptimo para la remoción con geopolímero es de 9 horas se procedió a realizar la evaluación de la dosis de sorbente. Para este estudio se emplearon como parámetros constantes el tiempo, el pH y la concentración del cloruro de cromo como se muestran en la *Tabla 5*

Tabla 5. *Parámetros iniciales para evaluación de la dosis de geopolímero*

Constantes	Cantidad
Tiempo de contacto	9 horas
pH inicial	4
Concentración CrCl <sub>3</sub>	3 mg/L

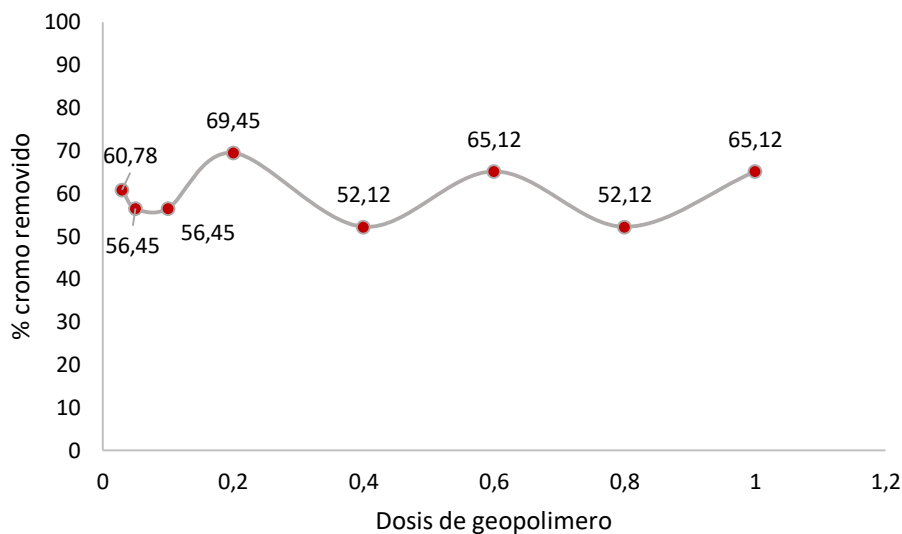


Figura 10. Evaluación de la dosis de geopolímero para la remoción de cromo

Para realizar la evaluación de la dosis de geopolímero se emplearon cantidades de 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, y 1.0 g, con agitación constante de 200 rpm durante un tiempo de 9 horas. Los porcentajes de remoción obtenidos se consignaron en la Figura 10 allí se observa

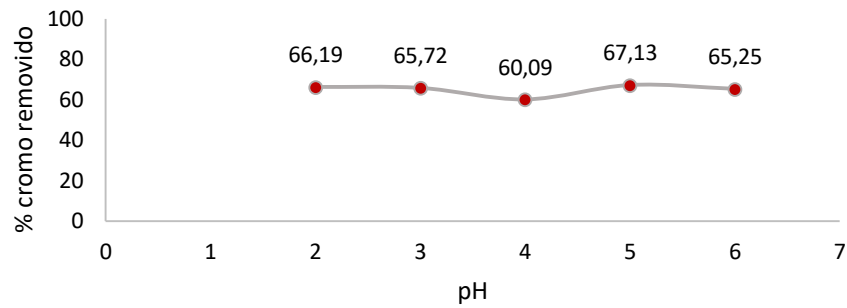
que, a una dosis de 0,2 g, se obtiene un porcentaje de 69,45%, seguido por el valor de 65,12% correspondiente a dosis de 0,6 g y 1,0 g.

Se advierte en la Figura 10 que el cambio en la cantidad de geopolímero usado en la adsorción presenta una variación constante entre los datos, donde la diferencia máxima entre el mayor y el menor porcentaje de efectividad es de 17,33%. Si se considera esta diferencia porcentual por sí sola, se puede reconocer como alta, pero cuando se comparan todos los datos en conjunto y se observa el incremento en la dosis, no hay un cambio sustancial en el porcentaje de cromo adsorbido, que permita apreciar un efecto considerable en la adsorción.

**5.2.1.3. Variación del pH para la remoción de cromo:** Después de obtener el segundo parámetro óptimo para la remoción correspondiente a la dosis de geopolímero, se procedió a realizar la evaluación de la variable de pH de la solución de cloruro de cromo. Para este estudio se emplearon como parámetros constantes el tiempo, la dosis de geopolímero y la concentración del cloruro de cromo como se muestran en la *Tabla 6*

Tabla 6. *Parámetros iniciales para la evaluación del pH de la solución*

<b>Constantes</b>	<b>Cantidad</b>
Tiempo de contacto	9 horas
Dosis geopolímero	0,2 g
Concentración CrCl <sub>3</sub>	3 mg/L



*Figura 11.* Evaluación del pH para la remoción de cromo

Para el estudio del pH óptimo se prepararon soluciones de pH 2, 3, 4, 5 y 6 manteniendo constante los parámetros mencionados al inicio. En la Figura 11 se observa que el mayor porcentaje de remoción es de 67,13% y el menor es de 60,09% a pH 4 y 5 respectivamente, es decir, la diferencia entre estos porcentajes es de solamente un 7,04%, esta variación no es suficiente para considerar el pH inicial como una variable determinante en el proceso de remoción.

Para poder entender mejor tal comportamiento debe considerarse el hecho de que cuando entra en contacto el geopolímero con la solución, el pH cambia dramáticamente hasta 9-10, en consecuencia, la efectividad de remoción no se ve afectada por el pH inicial.

**5.2.2. Determinación de parámetros para la remoción de cadmio:** Para determinar las condiciones a las cuales el geopolímero de piedra pómez remueve la mayor cantidad de cadmio se evaluaron las siguientes condiciones

**5.2.2.1. Variación del tiempo de contacto para remoción de cadmio:** Para evaluar la remoción de cadmio a medida que aumentaba el tiempo de contacto entre adsorbato y adsorbente, se dejaron como variables fijas la dosis de geopolímero, el pH inicial de la solución y la concentración del sulfato de cadmio consignados en la *Tabla 7*

Tabla 7. *Parámetros iniciales constantes de PP y GPP para remoción de cadmio*

Constantes	Cantidad
Dosis de piedra pómez	0,05 g
Dosis de geopolímero	0,05 g
Concentración CdSO <sub>4</sub>	2 mg/L

Una vez fijados los demás parámetros, se varió el tiempo de contacto entre el adsorbato y adsorbente, luego de realizar la toma de la absorbancia de la solución final se evaluó el porcentaje de eficiencia de remoción (Ecuación 3), siendo estos porcentajes los presentados en la Figura 12.

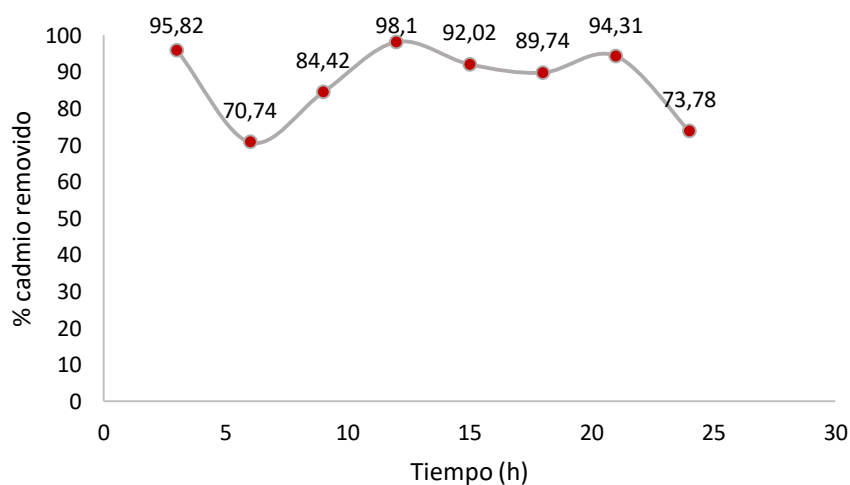
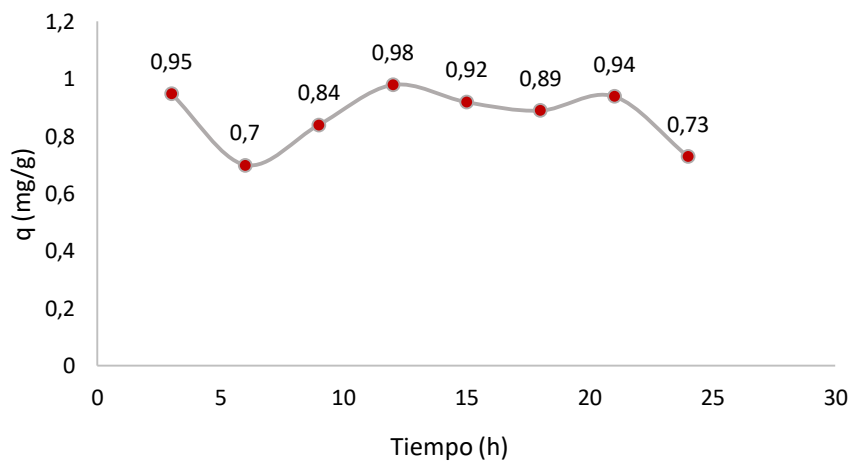


Figura 12. Evaluación del tiempo de contacto para la remoción de cadmio con geopolímero

Al graficar el porcentaje removido de cadmio vs el tiempo en horas, se observa que el mayor porcentaje de remoción se presenta a 12 horas siendo este de 98,1%, sin embargo, se observa que a 3 horas el porcentaje de remoción es de 95,82%, el cual puede considerarse como óptimo debido a que presenta una alta remoción en un tiempo de contacto muy corto, siendo este proceso muy viable para aplicarse en la industria, espacio en el cual el factor tiempo es de vital importancia; a su vez también se observa un buen comportamiento en cuanto a remoción en las siguientes horas, siendo el mínimo de remoción a 6 horas con 70,74% luego de encontrarse saturado el geopolímero. Este mismo fenómeno se observa nuevamente a las 24 horas, tiempo en el cual la remoción disminuye considerablemente a 73,78% luego de presentar un máximo de remoción.



*Figura 13.* Evaluación de la capacidad de remoción de cadmio con geopolímero

En la Figura 13 se puede observar que el geopolímero logra una capacidad de remoción (Ecuación 4) de hasta 0,98 mg/g de cadmio, este máximo se obtiene en un tiempo de 3 horas. La capacidad mínima de remoción corresponde a 0,7 mg/g. Estos datos confirman la determinación del tiempo necesario para la remoción de cadmio y permite establecer el tiempo de 3 horas como el parámetro óptimo.

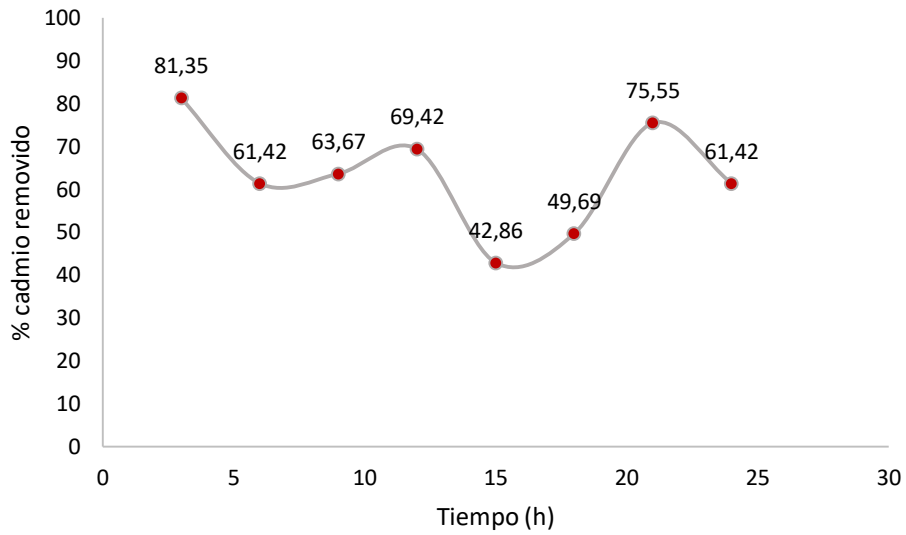


Figura 14. Evaluación del tiempo de contacto para la remoción de cadmio con piedra pómez.

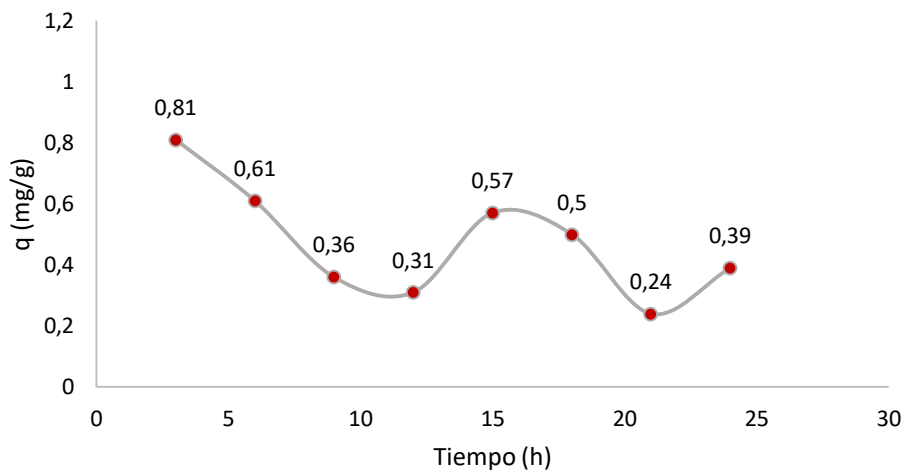


Figura 15. Evaluación de la capacidad de remoción de cadmio con piedra pómez

En el caso del geopolímero se puede observar que logra obtener hasta un 98% de eficiencia en la remoción en un tiempo de 12 horas, seguido de un 95% en un tiempo de 3 horas, al comparar estos resultados con los obtenidos empleando como absorbente piedra pómez, se

observa que el máximo porcentaje de remoción obtenido fue de 81% en un tiempo de 3 horas, siendo el geopolímero superior hasta en un 17%. Considerando este tiempo, la capacidad de remoción exhibida por el geopolímero es de 0,95 mg/g en comparación con el de la piedra pómez que es de 0,81 mg/g. Estos resultados nos indican que en general el geopolímero posee mejores cualidades para la remoción de cadmio si se compara con su precursor, la piedra pómez.

Dado que el porcentaje de efectividad y la capacidad de remoción presentada por el geopolímero son más altas que las presentadas por la piedra pómez, se confirma que el proceso de geopolimerización mejora las propiedades del material inicial gracias a las redes tridimensionales formadas por los tetraedros que permiten el alojamiento de los cationes de cadmio y conceden mayor adsorción.

**5.2.2.2. Variación la dosis de geopolímero para remoción de cadmio:** Debido a que ya se ha definido 3 horas como el tiempo óptimo para la remoción y que el geopolímero es superior que su precursor, se procedió a realizar la evaluación de la variable de dosis de sorbente empleando geopolímero. Para este estudio se emplearon como parámetros constantes el tiempo, el pH y la concentración del sulfato de cadmio como se muestra en la *Tabla 8*.

Tabla 8. *Parámetros iniciales para la evaluación de la dosis de sorbente*

Constantes	Cantidad
Tiempo de contacto	3 horas
pH inicial	4
Concentración CdSO <sub>4</sub>	2 mg/L

En la determinación de esta variable se varió la dosis de geopolímero con cantidades que van desde 0,05 g hasta 1,0 g.

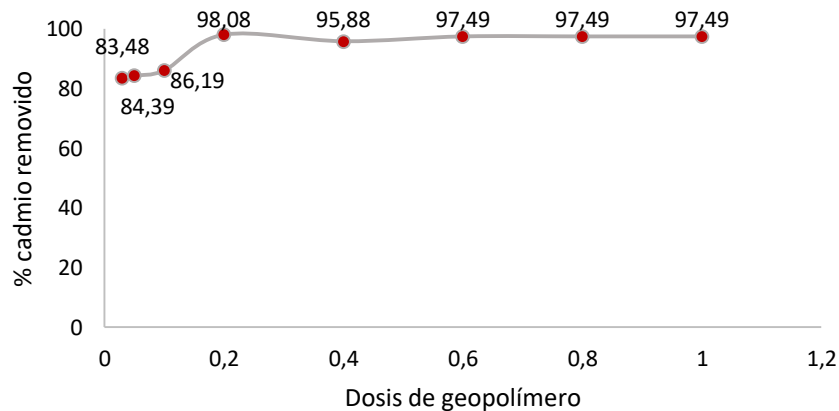


Figura 16. Variación de la dosis de geopolímero para evaluar la eficiencia en la remoción de cadmio.

Debido a que se determinó que el mejor tiempo de contacto es de 3 horas y que el geopolímero es mejor adsorbente que su precursor, estos dos parámetros se mantuvieron constantes para realizar la variación de la dosis de geopolímero de 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 hasta 1.0 g, de esta forma se encontró que a medida que aumenta la dosis se observa un aumento en el porcentaje de remoción de cadmio. El valor máximo de remoción se obtiene en una dosis de 0,2 g. Por encima de este valor, el proceso empieza a llegar al equilibrio y el porcentaje de remoción permanece constante, esto puede ocurrir debido a que el geopolímero llega a un punto de saturación donde logra alcanzar un máximo de remoción independiente de la dosis de adsorbente empleado, claro está, considerando que este máximo es de un 97%.

**5.2.2.3. Variación del pH para la remoción de cadmio:** Definidos el tiempo de contacto y la dosis de geopolímero óptimos para la remoción se procedió a realizar la evaluación de la variable pH empleando geopolímero. Para este estudio se emplearon como parámetros constantes el tiempo, la dosis de sorbente y la concentración del sulfato de cadmio como se muestra en *Tabla 9*.

Tabla 9. *Parámetros iniciales para la evaluación del pH de la solución*

Constantes	Cantidad
------------	----------

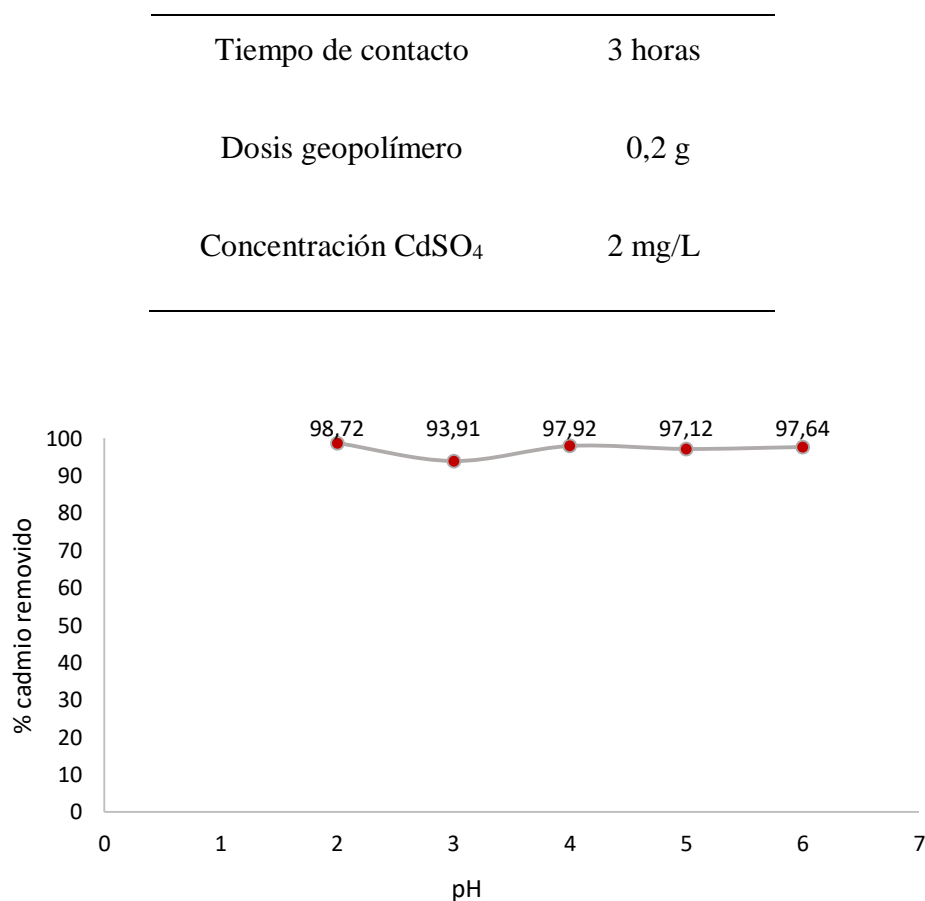


Figura 17. Evaluación del pH en la remoción de cadmio.

Para la evaluación del pH se tomaron en cuenta los resultados obtenidos en la determinación de los parámetros de tiempo de contacto y dosis de sorbente, de esta forma se modificó el pH de la solución de sulfato de cadmio empleando ácido nítrico al 0.5 % e hidróxido de sodio 0.1 M según se requería, así se obtuvieron 5 soluciones a pH 2, 3, 4, 5 y 6.

En la evaluación del pH se encontró que el menor porcentaje de efectividad de remoción corresponde a un pH 3 con un porcentaje de 93.91%, mientras que para los otros valores de pH no existe una diferencia considerable en el porcentaje de adsorción, ya que la diferencia máxima es un 1%. Este resultado indica que el pH inicial no afecta la adsorción de cationes de cadmio en el material geopolimérico, es decir, aunque exista una cantidad más alta de H<sup>+</sup> libres en la solución, no hay competencia para situarse en la superficie del material.

También debe considerarse que cuando entran en contacto la solución de sulfato de cadmio y el geopolímero, esta solución pasa a pH 9-10, sin importar el pH inicial de la solución. Este hecho también puede ser una razón por la cual el pH inicial de la solución no interfiere en la adsorción de cationes de cadmio.

Además, se encontró que el uso de geopolímero para la adsorción de cadmio es un 23,76% más efectivo que para cromo. Este efecto puede deberse a que al aumentar el pH de la solución con la inclusión del geopolímero, el cromo se precipita como hidróxido de cromo dado su bajo producto de solubilidad y de esta forma quedan menos cationes disponibles en la solución para ser adsorbidos por el sorbente.

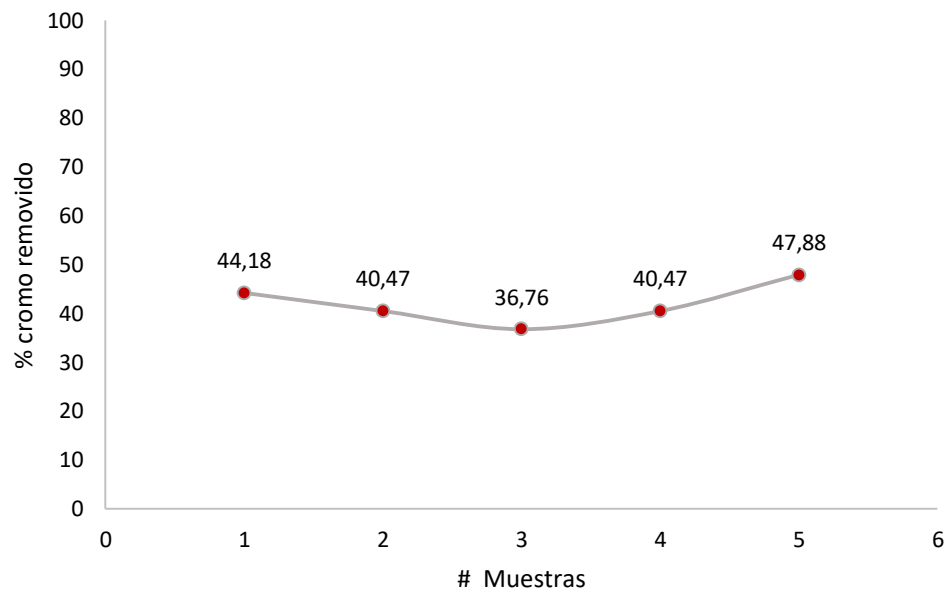
### 5.2.3. Pruebas de sorción en residuos de la industria

**5.2.3.1. Remoción en residuos provenientes de una curtiembre:** Definidos los parámetros óptimos para la remoción de cromo, se emplearon muestras provenientes de una curtiembre para realizar pruebas piloto que permitan determinar la efectividad del geopolímero para la remoción de cromo en residuos provenientes de esta industria. Los parámetros empleados se consignan en la *Tabla 10*.

Tabla 10. *Parámetros para prueba de sorción de cromo en residuos curtiembre*

Parámetro	Cantidad
Dosis de geopolímero	0,2 g
Tiempo de contacto	9 horas
pH	4
Concentración muestra	3,81 mg/g
Velocidad de agitación	200 rpm

La concentración inicial es producto de realizar diferentes diluciones de la muestra inicial debido a que su concentración era demasiado alta y realizar ensayos a esta concentración resultaba muy agresivo con el medio ambiente. Los datos obtenidos se presentan en la Figura 18.



*Figura 18.* Porcentaje de efectividad en la remoción de cromo en muestras de curtiembre

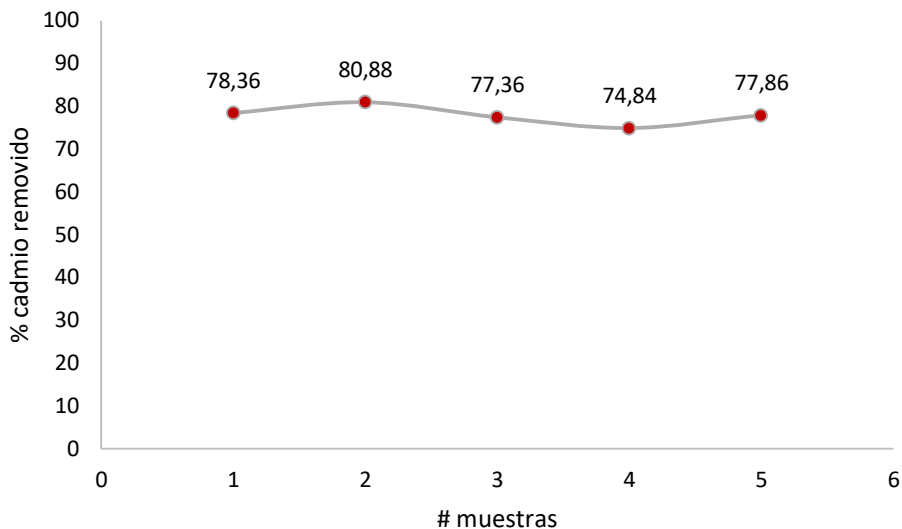
En la Figura 18 se observó que el geopolímero posee una capacidad máxima de remoción del 47,88% en este tipo de muestras, se pueden considerar satisfactorios pues realizar la remoción de este tipo de metales en la industria curtiembre supone un logro.

**5.2.3.2. Remoción en residuos provenientes del LQCI:** Después de definir los parámetros óptimos para la remoción de cadmio, se emplearon muestras provenientes del LQCI para realizar pruebas piloto que permitan determinar la efectividad del geopolímero para la remoción de cadmio en residuos provenientes de la industria.

En la Tabla 11 se presentan los parámetros utilizados en el estudio de remoción en las muestras de origen industrial.

Tabla 11. *Parámetros para prueba de sorción de cadmio en residuos industriales*

<b>Constantes</b>	<b>Cantidad</b>
Dosis de geopolímero	0,2 g
Tiempo de contacto	3 horas
pH	2
Concentración muestra	2,51 mg/g
Velocidad de agitación	200 rpm



*Figura 19.* Porcentaje de efectividad en la remoción de cadmio en residuos industriales

En la Figura 19 se observa que el geopolímero posee una capacidad máxima de remoción del 80,88% en este tipo de muestras y el valor mínimo es de 74,84%, es importante considerar que estos residuos contienen también otros metales como hierro, níquel y cobalto que pueden entrar en competencia con el cadmio y esta sea una razón por la cual no se consiguen porcentajes de remoción más cercano a los obtenidos empleando la solución de sulfato de cadmio.

De igual forma estos resultados resultan ser muy satisfactorios ya que representan un alto valor de remoción que resulta ser de gran importancia en la mitigación del impacto ambiental en las fuentes hídricas.

### **5.3. Determinación de las isotermas de sorción**

Después de realizar las pruebas de sorción, se procedió a realizar el estudio cinético para cada uno de los metales haciendo uso de las isotermas de sorción, las cuales determinan la relación entre adsorbato-adsorbente.

Este estudio se realizó en un experimento donde se empleó una muestra única a la cual se le agregaron 0,8 g de sorbato a cada 200 mL de solución y luego cada 30 minutos y en el

transcurso de 3 horas se tomaron alícuotas de 25 mL de la solución, se filtró y se ajustó pH para medir concentración del metal presente mediante AAS.

En la Tabla 12 se muestran las cantidades empleadas para el estudio de las isothermas de Freundlich y de Langmuir

Tabla 12. *Variables empleadas en el estudio*

<b>Constantes</b>	<b>Cantidad</b>
Dosis de geopolímero	0,8 g
Volumen de solución	200 mL
Tiempo de contacto	3 horas
Velocidad de agitación	200 rpm
Concentración solución CdSO <sub>4</sub>	1,85 mg/L
Concentración solución CrCl <sub>3</sub>	2,94 mg/L

Cada solución se puso en contacto con el geopolímero por separado y con agitación constante de 200 rpm. Después de realizar la medición de la concentración residual de los metales presentes en las alícuotas tomadas se calculó de la efectividad de sorción ( Figura 20Figura 21)

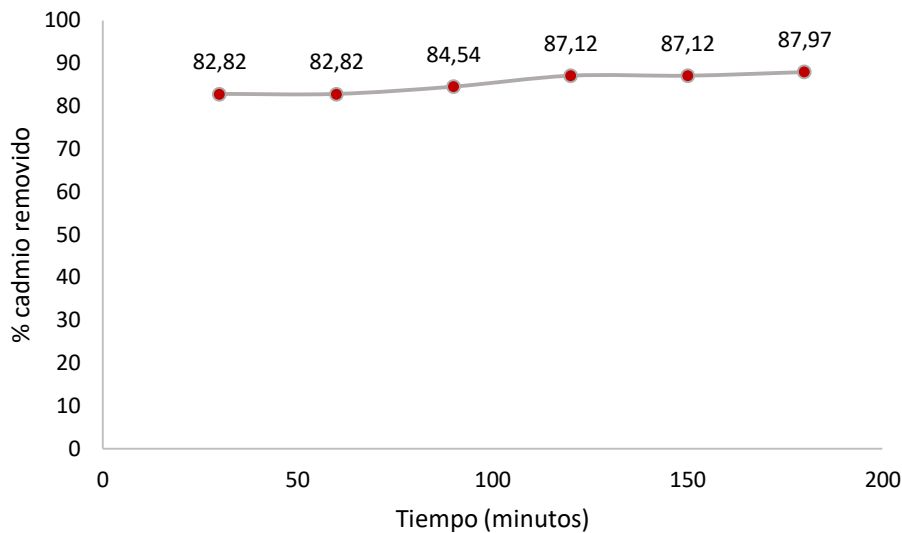


Figura 20. Porcentaje de efectividad en la remoción de cadmio

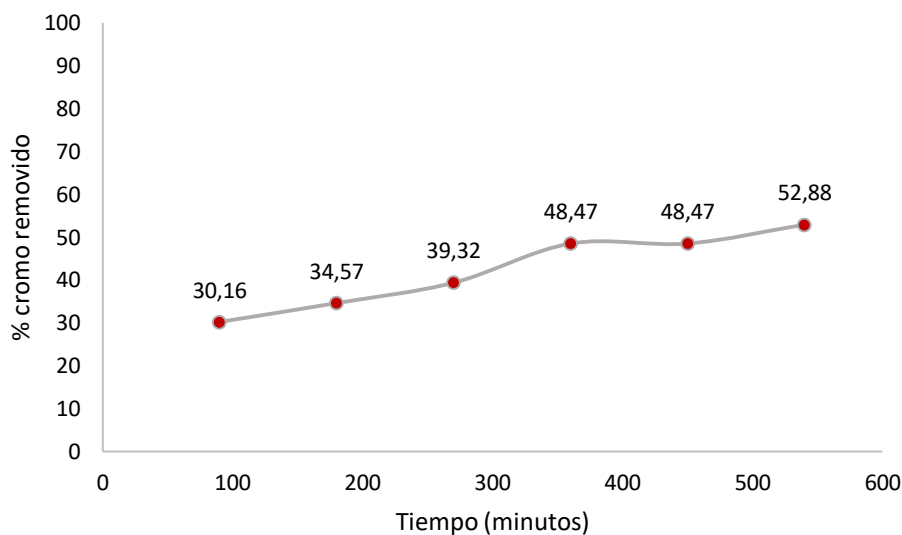


Figura 21. Porcentaje de efectividad en la remoción de cromo

**5.3.1. Isotermas de adsorción cadmio:** Con los datos de la Figura 20, se procedió a realizar el modelamiento de las isotermas de Langmuir y de Freundlich empleando las ecuaciones 1 y 2.

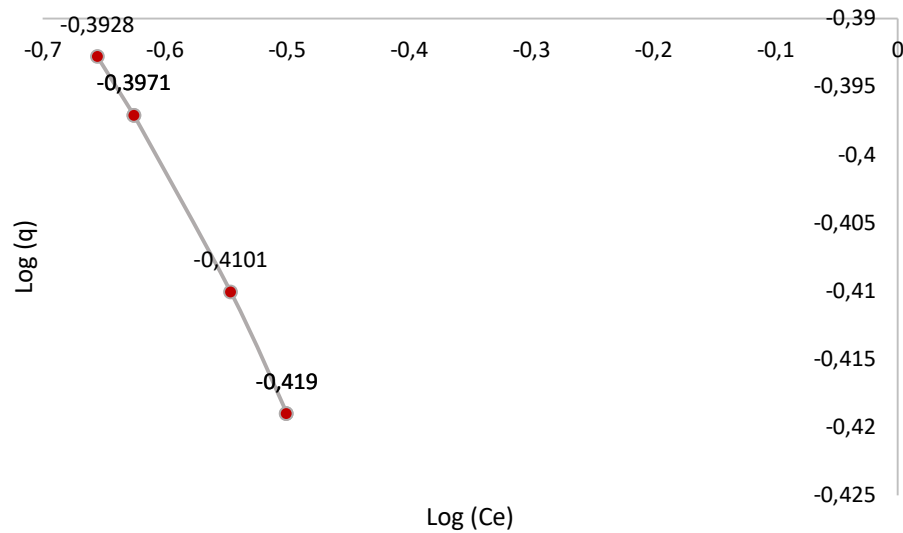


Figura 22. Isotherma adsorción de Freundlich para cadmio

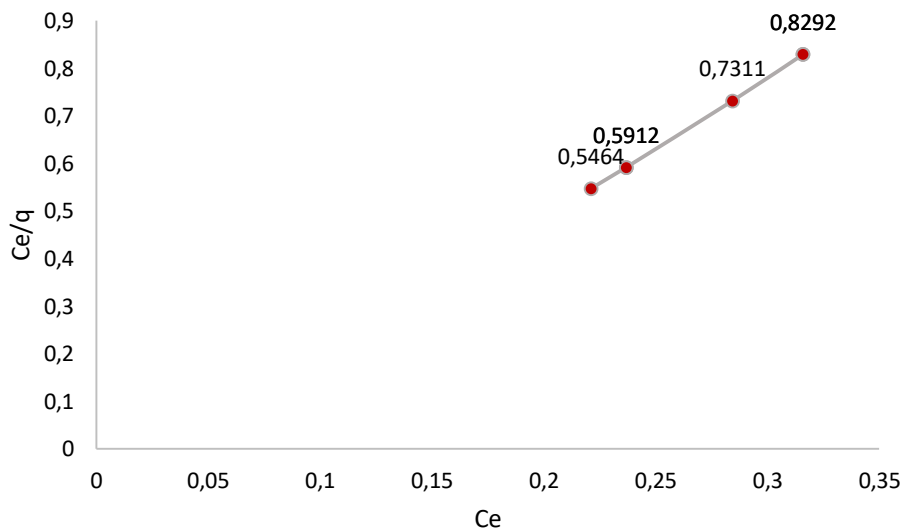


Figura 23. Isotherma adsorción de Langmuir para cadmio

Tabla 13. Parámetros de modelos ajustados en adsorción de cadmio

	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>K</b>	<b>n</b>
<b>Freundlich</b>	0,9981	0,313	-5,844
<b>Langmuir</b>	0,9998	0,3341	

En la Tabla 13 se observa aunque la correlación ( $R^2$ ) obtenida para las isothermas de Langmuir y de Freundlich tienen valores próximos, el valor obtenido para Langmuir se aproxima más a 1. Este resultado indica que el proceso de adsorción de cadmio se ajusta a este modelo en las condiciones estudiadas. Además, se encontró que la constante  $K_L < 1$ , lo cual le da la característica de favorable al proceso de sorción.

Debido a que el modelo de Langmuir es el que mejor se ajusta al proceso de sorción de cadmio en el geopolímero sintetizado, esto puede sugerir que ocurre un intercambio iónico entre el material sorbente y la solución, además sugiere que el proceso no ocurre en sitios activos idénticos en el geopolímero.

**5.3.2. Isotermas de adsorción cromo:** Con los datos de la Figura 21 se procedió a realizar el modelamiento de las isotermas de Langmuir y de Freundlich empleando las ecuaciones 1 y 2.

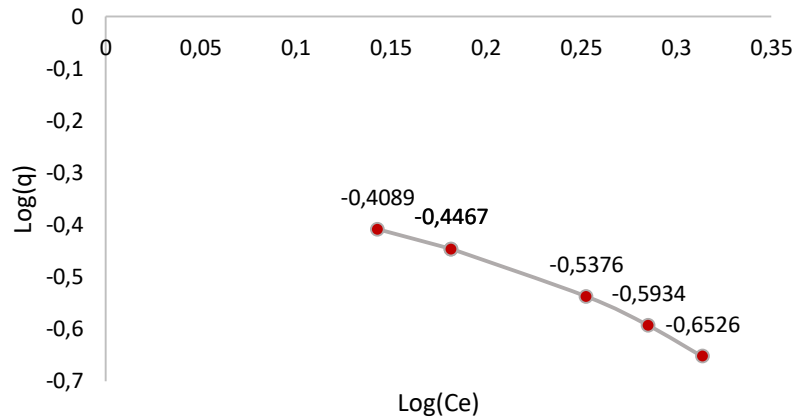


Figura 24. Isoterma adsorción de Freundlich para Cromo

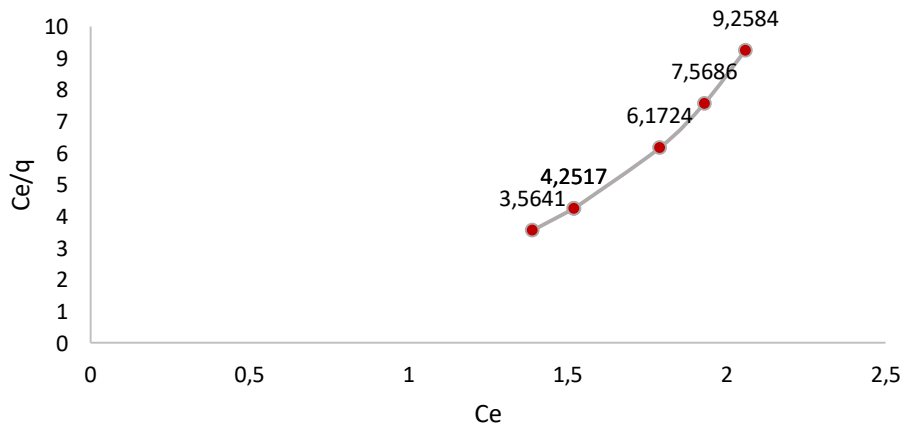


Figura 25. Isoterma adsorción de Langmuir para Cromo

Tabla 14. Parámetros de modelos ajustados en adsorción de cromo

$R^2$	K	n
-------	---	---

<b>Freundlich</b>	0,9863	0,313	-5,844
<b>Langmuir</b>	0,9836	0,1128	-

Los parámetros obtenidos para los modelos ajustados de las isotermas de Langmuir y de Freundlich se consignaron en la Tabla 14 donde se observa que los valores para la correlación ( $R^2$ ) de ambos modelos son cercanos, no obstante el valor calculado para el modelo de Freundlich es más próximo a 1, lo cual sugiere que el proceso de adsorción de cromo empleando el geopolímero sintetizado se ajusta a este modelo.

Dado que el modelo de Freundlich sería el que describe el proceso de adsorción de cromo en el geopolímero sintetizado se infiere que este proceso ocurre de forma heterogénea en el material y que el sorbato se une al sorbente mediante fuerzas de Van der Waals.

#### **5.4. Caracterización de los materiales después de las pruebas de adsorción**

**5.4.1. DRX de la piedra pómez y el geopolímero:** En la Figura 26 se muestran los difractogramas correspondientes al geopolímero sintetizado inicialmente (azul), al geopolímero después de adsorber cadmio (magenta) y al geopolímero después de adsorber cromo (verde), allí se puede observar que ocurre la pérdida de intensidad de algunos picos, o su desaparición después de la adsorción como el pico ubicado en  $34^\circ$  correspondiente a la moscovita y el ubicado en  $29^\circ$  de la albita que aparecen en el geopolímero inicialmente. Este mínimo cambio indica pérdida de cristalinidad, es decir los cationes metálicos desordenaron la red, generando una pequeña ganancia de amorficidad en el material.

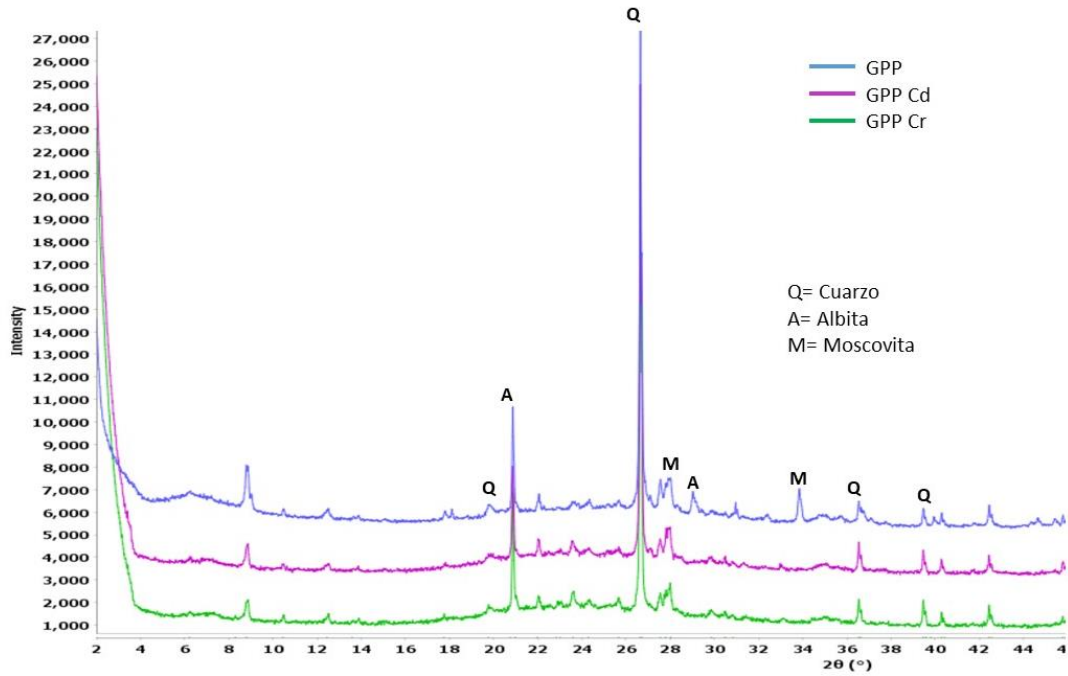


Figura 26. Difractograma geopolímero antes y después de remoción

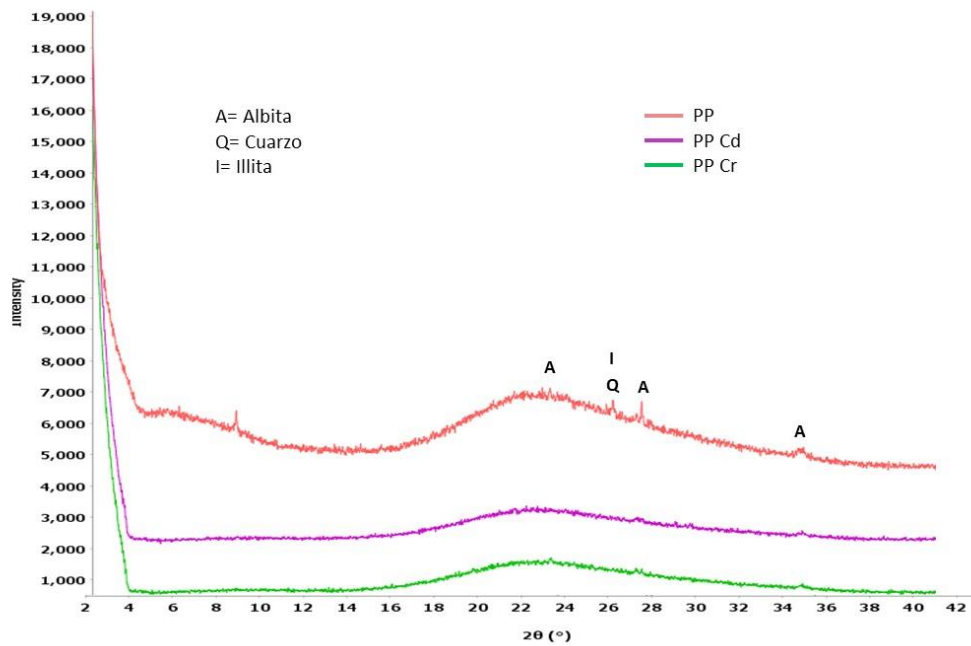


Figura 27. Difractograma piedra pómez antes y después de remoción

La Figura 27 corresponde a los difractogramas de la piedra pómez (rojo), la piedra pómez después de absorber cadmio (magenta) y la piedra pómez después de adsorber cromo, allí se aprecia que en el difractograma de la piedra pómez aparecen los picos que permiten identificarla, al compararse con los obtenidos para la piedra pómez después de realizar la adsorción de cromo y cadmio, se observa que ocurre la pérdida de la intensidad de algunos picos después de adsorber, como el de la albita cerca de  $28^\circ$  y en  $35^\circ$ , incluso al igual como ocurre con el geopolímero, otros picos como el del cuarzo en  $26^\circ$  dejan de aparecer.

## 6. Conclusiones

El geopolímero sintetizado empleando como precursor piedra pómez, posee mayor porosidad producto de la reestructuración de los átomos de silicio, oxígeno y aluminio que ocurre en el proceso de geopolimerización

El geopolímero obtenido presenta mayor efectividad en el porcentaje de remoción en comparación con su aluminosilicato precursor, esta efectividad logra ser para el caso de remoción de cromo de hasta un 19% y para el de remoción de cadmio de hasta 17% superior que para la piedra pómez

Mediante el estudio de las isotermas de sorción se encontró que el proceso de adsorción de cromo se ajusta al modelo de Freundlich y el proceso de adsorción de cadmio se ajusta al modelo de Langmuir.

Debido a su fácil síntesis, a su bajo costo y a su efectividad en la adsorción de iones cromo y cadmio, el geopolímero obtenido resulta ser una buena alternativa para ayudar en la remoción de estos metales provenientes de los residuos que se generan en las industrias y de esta forma contribuir a la disminución de la contaminación en las vertientes hídricas.

## **7. Recomendaciones**

Realizar un análisis a las muestras provenientes de la curtiembre que brinden información sobre la naturaleza de los diferentes contaminantes que se encuentran disueltos en ellas.

Para futuras investigaciones se recomienda realizar un estudio para la desorción de los metales contaminantes en el geopolímero.

Realizar la toma de datos de difracción de rayos X con un paso inferior 0,2 grados para obtener mejor resolución de los picos de los difractogramas.

## **8. Divulgación de resultados**

5<sup>TH</sup> International Meeting for researchers in materials and plasma technology (5TH IMRMPT). Cúcuta- Colombia

6<sup>TH</sup> International Week of Science Technology and Innovation. Cúcuta- Colombia

**Referencias bibliográficas**

- (APHA), A. P. H. A. (2017). *Standard method for examination of water and wastewater* (21st ed.). Washington D.C.
- Adams, M. (1995). *Fundamentos de química de suelos*. Caracas.
- Al-Harashseh, M. S., Al Zboon, K., Al-Makhadmeh, L., Hararah, M., & Mahasneh, M. (2015). Fly ash based geopolymer for heavy metal removal: A case study on copper removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(3), 1669–1677. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.06.005>
- Al-Zboon, K., Al-Harashseh, M. S., & Hani, F. B. (2011). Fly ash-based geopolymer for Pb removal from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 188(1–3), 414–421. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.133>
- Artuz, L. A., Martinez, M. S., & Morales, C. J. (2008). Las Industrias Curtiembres Y Su Incidencia En La Contaminación Del Río Bogotá. *Isocuanta*, 1(1), 11. Retrieved from <http://revistas.usta.edu.co/index.php/isocuanta/article/view/1387>
- Burciaga-Díaz, O., Escalante-Garcia, J. I., & Magallanes-Rivera, R. X. (2015). Resistencia a la compresión y evolución microestructural de geopolímeros base metacaolín expuestos a alta temperatura. *Revista ALCONPAT*, 5(1), 58. <https://doi.org/10.21041/ra.v5i1.77>
- Chang, Raymond & College, W. (2002). Raymond Chang Química General 7Th Edición.pdf. *McGrawHill*, pp. 1–1004, 671. Retrieved from <http://en.scientificcommons.org/48774967>
- Cheng, T. W., Lee, M. L., Ko, M. S., Ueng, T. H., & Yang, S. F. (2012). The heavy metal adsorption characteristics on metakaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*, 56, 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.11.027>
- Clavijo, J. (2013). *Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido ( SEM )*.
- Dana, & Hurlbut, C. (1969). *Manual de mineralogía*.

Davidovits, J. (1991). Geopolymers. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633–1656. <https://doi.org/10.1007/bf01912193>

Davidovits, Joseph, & France, S. (2018). *Full text available for free download in the Geopolymer Institute Library at # 15: 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications*. (November), 28–29.

Desarrollo, Y., De, U. S. O., Transformada, C. O. N., & Cemento, D. E. L. (2012). Uso De Espectroscopía Infrarroja Con Transformada De Fourier (Ftir) En El Estudio De La Hidratación Del Cemento. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 3(2), 62–71.

Douglas, B. E., McDaniel, D. H., & Alexander, J. J. (1994). *Conceptos y modelos de Química Inorgánica*. España.

Duan, P., Yan, C., Zhou, W., & Ren, D. (2016). Development of fly ash and iron ore tailing based porous geopolymer for removal of Cu(II) from wastewater. *Ceramics International*, 42(12), 13507–13518. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.143>

Gaitan, M. S. (2017). Determinación de metales pesados totales con digestión ácida y solubles lectura directa por Espectrofotometría de absorción atómica. 2004, 16. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Metales+en+agua+por+Absorción+Atómica..pdf/e233a63d-378c-4f83-9311-d9375043cf2a>

Gallegos, W., Vega, M., & Noriega, P. (2012). *La Granja Espectroscopía De Absorción Atómica Con Llama Y Su Aplicación Para La Determinación De Plomo Y Control De Productos Cosméticos Flame Atomic Absorption Spectroscopy and Its Application To the Determination of Lead and Control of Cosmetic Products*. 15(1), 19–26. Retrieved from [https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8824/1/Espectroscopia de absorcion atomica con llama y su aplicacion para la determinacion de plomo y control de productos cosmeticos.pdf](https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8824/1/Espectroscopia%20de%20absorcion%20atomica%20con%20llama%20y%20su%20aplicacion%20para%20la%20determinacion%20de%20plomo%20y%20control%20de%20productos%20cosmeticos.pdf)

Ge, Y., Cui, X., Kong, Y., Li, Z., He, Y., & Zhou, Q. (2015). Porous geopolymeric spheres for removal of Cu(II) from aqueous solution: Synthesis and evaluation. *Journal of*

- Hazardous Materials*, 283(Ii), 244–251. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.038>
- González, A. K., Montaña, A. M., González, C. P., & Santos, A. (2017). Structural and mechanical study of concrete made from cementitious materials of low environmental impact. *Journal of Physics: Conference Series*, 935(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/935/1/012015>
- González, C. P., Montaña, A. M., González, A. K., & Ríos, C. A. (2014). Synthesis and characterization of inorganic polymers from the alkali activation of an aluminosilicate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 59(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/59/1/012001>
- Gündoğan, R., Acemioğlu, B., & Alma, M. H. (2004). Copper (II) adsorption from aqueous solution by herbaceous peat. *Journal of Colloid and Interface Science*, 269(2), 303–309. [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(03\)00762-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(03)00762-8)
- Gupta, V. K., & Ali, I. (2004). Removal of lead and chromium from wastewater using bagasse fly ash - A sugar industry waste. *Journal of Colloid and Interface Science*, 271(2), 321–328. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.11.007>
- IAPI. (2018). *Directory Kantor Akuntan Publik dan Akuntan Publik*. 491.
- Ibañez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (2011). *Estructura general de los silicatos*.
- Kausar, A., Iqbal, M., Javed, A., Aftab, K., Nazli, Z., Nawaz, H., & Nouren, S. (2018). Dyes adsorption using clay and modi fi ed clay : A review. *Journal of Molecular Liquids*, 256, 395–407. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.034>
- Manohar, D. M., Noeline, B. F., & Anirudhan, T. S. (2006). Adsorption performance of Al-pillared bentonite clay for the removal of cobalt(II) from aqueous phase. *Applied Clay Science*, 31(3–4), 194–206. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2005.08.008>
- Margarida, M. (1984). *Aislamiento térmico. Aplicaciones en la edificación y la industria economía de energía*. Barcelona.
- Márquez, F., Herrera, G. M., Campo, T., Cotto, M., Ducongé, J., Sanz, J. M., ... Morant, C.

- (2012). Preparation of hollow magnetite microspheres and their applications as drugs carriers. *Nanoscale Research Letters*, 7(1), 210. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-210>
- Mera A et al. (2007). Alternativa para la segregación de residuos químicos generados en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad del Cauca. *Producción + Limpia*, 2.
- Messaoud, I. ben, Hamdi, N., & Srasra, E. (2018). Physico-Chemical Properties of Geopolymer Binders Made from Tunisian Clay. *Materials Focus*, 7(1), 114–120. <https://doi.org/10.1166/mat.2018.1487>
- Minambiente. (n.d.). *18-Res 883 De 2018.Pdf*.
- Nordberg, G. (2012). Metales: Propiedades Químicas Y Toxicidad Productos Químicos. *Enciclopedia De Salud Y Seguridad En El Trabajometal*, 4º(ES: PROPIEDADES QUÍMICAS Y TOXICIDAD), 1–76. Retrieved from <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/Enciclopedia OIT/tomo2/63.pdf>
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS: IMPLICACIONES EN SALUD, AMBIENTE Y SEGURIDAD ALIMENTARIA Heavy metals contamination: implications for health and food safety. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16, 66–77. <https://doi.org/10.1007/BF02796157>
- Sánchez, F., & Sharon, C. (2016). *CAPÍTULO II METALES TÓXICOS EN COLOMBIA: PRESENCIA, ORIGEN, DISTRIBUCIÓN Y CONTAMINACIÓN EN COMPONENTES BIÓTICOS Y ABIÓTICOS* Fernanda Sánchez 1 Sharon Corredor 2. Retrieved from [https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2939/CAPÍTULO II Metales Pesados.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2939/CAPÍTULO%20II%20Metales%20Pesados.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Siyal, A. A., Shamsuddin, M. R., Khan, M. I., Rabat, N. E., Zulfiqar, M., Man, Z., ... Azizli, K. A. (2018). A review on geopolymers as emerging materials for the adsorption of heavy metals and dyes. *Journal of Environmental Management*, Vol. 224, pp. 327–339.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.046>

Skoog, D. A., James Holler, F., & Nieman, T. A. (2001). *Douglas A. Skoog & F. James Holler & Timothy A. Nieman - Principios de análisis instrumental (5ed, McGrawHill).pdf* (pp. 1–856). pp. 1–856.

Vanegas, G. A., & Dueñas, A. (2017). *Instructivo para el lavado de material de vidrio y plástico*. Bogotá D.C.

**Apéndices**

*Apéndice A.* Variación del tiempo de contacto para remoción de cromo con geopolímero

<b>t (horas)</b>	<b>Abs</b>	<b>[mg/L] inicial</b>	<b>[mg/L] final</b>	<b>% adsorbido</b>
3	0,015	3,0	1,35	53,4
6	0,013	3,0	1,08	62,72
9	0,011	3,0	0,81	72,04
12	0,017	3,0	1,62	44,08
15	0,013	3,0	1,08	62,72
18	0,013	3,0	1,08	62,72
21	0,012	3,0	0,94	67,38
24	0,014	3,0	1,21	58,06

*Apéndice B.* Variación del tiempo de contacto para remoción de cromo con piedra pómez

<b>t (horas)</b>	<b>Abs</b>	<b>[mg/L] inicial</b>	<b>[mg/L] final</b>	<b>% adsorbido</b>
3	0,014	3,0	1,35	29,57
6	0,0165	3,0	1,08	17,84
9	0,0165	3,0	0,81	17,84
12	0,0165	3,0	1,62	17,84
15	0,014	3,0	1,08	29,57
18	0,0115	3,0	1,08	41,31
21	0,009	3,0	0,94	53,05
24	0,0115	3,0	1,21	41,31

*Apéndice C.* Variación de la dosis de geopolímero para remoción de cromo

<b>Dosis (g)</b>	<b>Abs</b>	<b>[mg/L] inicial</b>	<b>[mg/L] final</b>	<b>% adsorbido</b>
0,03	0,019	3,0	1,295	60,78
0,05	0,02	3,0	1,437	56,45
0,1	0,02	3,0	1,437	56,45

0,2	0,017	3,0	1,008	69,45
0,4	0,021	3,0	1,58	52,12
0,6	0,018	3,0	1,151	65,12
0,8	0,021	3,0	1,58	52,12
1,0	0,018	3,0	1,151	65,12

*Apéndice D.* Variación de la dosis de geopolímero para remoción de cromo

<b>pH</b>	<b>Abs</b>	<b>[mg/L] inicial</b>	<b>[mg/L] final</b>	<b>% adsorbido</b>
2	0,062	3,0	1,014	66,19
3	0,063	3,0	1,028	65,72
4	0,075	3,0	1,197	60,09
5	0,006	3,0	0,985	67,13
6	0,006	3,0	1,042	65,25

*Apéndice E.* Variación del tiempo de contacto para remoción de cadmio con geopolímero

<b>t (horas)</b>	<b>Abs</b>	<b>[mg/L] inicial</b>	<b>[mg/L] final</b>	<b>% adsorbido</b>
3	0,014	2,0	0,083	95,82
6	0,047	2,0	0,585	70,74

9	0,029	2,0	0,311	84,42
12	0,011	2,0	0,037	98,10
15	0,019	2,0	0,159	92,02
18	0,022	2,0	0,205	89,74
21	0,016	2,0	0,113	94,30
24	0,043	2,0	0,524	73,78

*Apéndice F.* Variación del tiempo de contacto para remoción de cadmio con piedra pómez

<b>t (horas)</b>	<b>Abs</b>	<b>[mg/L] inicial</b>	<b>[mg/L] final</b>	<b>% adsorbido</b>
3	0,032	2,0	0,373	81,35
6	0,058	2,0	0,771	61,42
9	0,056	2,0	0,726	63,67
12	0,048	2,0	0,037	69,42
15	0,084	2,0	0,611	42,86
18	0,074	2,0	1,006	49,69
21	0,04	2,0	0,489	75,55
24	0,058	2,0	0,771	61,42

*Apéndice G.* Variación la dosis de geopolímero para remoción de cadmio

<b>Dosis (g)</b>	<b>Abs</b>	<b>[mg/L] inicial</b>	<b>[mg/L] final</b>	<b>% adsorbido</b>
0,03	0,024	2,0	0,330	83,48
0,05	0,021	2,0	0,312	84,39
0,1	0,019	2,0	0,276	86,19
0,2	0,004	2,0	0,038	98,08
0,4	0,021	2,0	0,082	95,88
0,6	0,007	2,0	0,050	97,49
0,8	0,005	2,0	0,050	97,49
1,0	0,005	2,0	0,050	97,49

*Apéndice H.* Variación del pH para la remoción de cadmio

<b>pH</b>	<b>Abs</b>	<b>[mg/L] inicial</b>	<b>[mg/L] final</b>	<b>% adsorbido</b>
2	0,007	2,0	0,024	98,72
3	0,013	2,0	0,115	93,91
4	0,008	2,0	0,039	97,92
5	0,009	2,0	0,054	97,12
6	0,010	2,0	0,044	97,64

