



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE  
IONES PLOMO Y SU ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE LAS  
AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE PUNO UTILIZANDO  
PIEDRA PUZOLANICA”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**MADYLIN MAMANI LLANOS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PUNO – PERÚ**

**2023**



## Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE IONE**

AUTOR

**Madylin Mamani LLanos**

RECuento DE PALABRAS

**16176 Words**

RECuento DE CARACTERES

**85965 Characters**

RECuento DE PÁGINAS

**92 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**2.5MB**

FECHA DE ENTREGA

**May 31, 2023 12:15 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**May 31, 2023 12:16 PM GMT-5**

### ● 4% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 4% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 2% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 40 palabras)



Firmado digitalmente por  
RODRIGUEZ MELO Maria FAU  
20145486170 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 31.05.2023 13:03:40 -05:00

Resumen



## DEDICATORIA

*A Dios por regalarme la vida y permitirme culminar satisfactoriamente este trabajo y darme la fortaleza de cumplir mis metas trazadas.*

*Con mucho amor y eterno agradecimiento dedico mi esfuerzo y trabajo puesto a mis padres, pilares fundamentales en mi vida Isabel y Mario, quienes a lo largo han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo incondicional en todo momento.*

*Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar. Los amo con mi vida.*

*También para mi hermano Abdiel que a pesar de las adversidades estuvo apoyándome en todo momento.*

*A mi querida mascota Sam que está en el cielo cuidando de nosotros.*

*Para mis seres queridos que ya no están presentes conmigo, pero sé que están en mi corazón.*

***Madylin Mamani Llanos***



## AGRADECIMIENTOS

*A mi Alma Mater, la Universidad Nacional del Altiplano - Puno por acogerme y darme la oportunidad de forjarme profesionalmente. Prepararme para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.*

*Con eterno agradecimiento a esta prestigiosa Facultad de Ingeniería Química, decano e ingenieros quienes me compartieron conocimientos, sabias enseñanzas y brindarme los conocimientos teórico-prácticos necesarios para mi formación profesional y desempeñarme como futuro profesional de Ingeniera Química.*

*A todas aquellas personas que me apoyaron, motivaron y ayudaron desinteresadamente por sus valiosas sugerencias en el desarrollo, ejecución y conclusión del presente trabajo de investigación.*

***Madylin Mamani Llanos***



# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>DEDICATORIA</b>	
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	
<b>ÍNDICE DE ACRÓNIMOS</b>	
<b>RESUMEN .....</b>	<b>13</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>14</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1 OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b>	
<b>2.1 ANTECEDENTES.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>20</b>
2.2.1 Metales pesados .....	20
2.2.2 Propiedades de los metales pesados .....	21
2.2.3 Plomo .....	22
2.2.4 Origen .....	23
2.2.5 Toxicología del plomo .....	23
2.2.6 Definición de la puzolana .....	24
2.2.7 Adsorción.....	26
2.2.8 Tipos de adsorción.....	27
2.2.9 Parámetros físico químico que influyen en los procesos de adsorción .....	27
2.2.10 Capacidad de adsorción .....	28
2.2.11 Isotermas de adsorción .....	28



2.2.12 Modelo de adsorción de Langmuir .....	31
2.2.13 Modelo de adsorción de isoterma de Freundlich .....	33
2.2.14 Precipitación alcalina .....	35
2.2.15 Agentes precipitantes alcalinos más utilizados en la industria .....	37

### CAPÍTULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1 LUGAR DE EJECUCIÓN .....</b>	<b>40</b>
<b>3.2 MATERIALES .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>41</b>
3.3.1 Muestreo de las aguas residuales de la ciudad de Puno .....	41
<b>3.4 CONCENTRACIÓN DE PLOMO EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA     CIUDAD DE PUNO .....</b>	<b>43</b>
3.4.1 Caracterización de las aguas residuales de la ciudad de Puno contaminadas con plomo .....	43
3.4.2 Análisis químicos de las aguas residuales de la ciudad de Puno .....	43
<b>3.5 PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL pH Y CONCENTRACIÓN DE PUZOLANA     PARA LA ADSORCIÓN DE PLOMO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE     LA CIUDAD DE PUNO, POR EL MÉTODO DE AGITACIÓN     MAGNÉTICA .....</b>	<b>44</b>
3.5.1 Activación de la puzolana .....	44
3.5.2 Agitación magnética .....	44
<b>3.6 MODELO MATEMÁTICO PARA EL PROCESO DE ADSORCIÓN DE     PLOMO CON PUZOLANA ACTIVADA POR EL PROCESO DE     AGITACIÓN MAGNÉTICA Y SUS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN .....</b>	<b>47</b>
3.6.1 Desarrollo del modelo matemático y su isoterma de adsorción .....	47
3.6.2 Identificación de las variables de trabajo .....	48
3.6.3 Rendimiento de recuperación de plomo (Pb) .....	48
3.6.4 Determinación de la isoterma de adsorción de los iones <b>Pb<sup>2+</sup></b> según la isoterma de Langmuir .....	50



3.6.5 Determinación de la isoterma de adsorción de los iones $Pb^{2+}$ según Freundlich	52
-----------------------------------------------------------------------------------------	----

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1 CONCENTRACIÓN DE PLOMO EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE PUNO</b>	<b>53</b>
4.1.1 Caracterización de las aguas residuales de la ciudad de Puno contaminadas con plomo	53
<b>4.2 PARÁMETROS ÓPTIMOS DE pH Y CONCENTRACIÓN DE PUZOLANA PARA LA ADSORCIÓN DE PLOMO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE PUNO, POR EL PROCESO DE AGITACIÓN MAGNÉTICA</b>	<b>54</b>
<b>4.2 MODELO MATEMÁTICO PARA EL PROCESO DE ADSORCIÓN DE PLOMO CON PUZOLANA ACTIVADA POR EL PROCESO DE AGITACIÓN MAGNÉTICA Y SUS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN</b>	<b>55</b>
4.3.1 Modelo matemático	55
4.3.2 Determinación de la isoterma de adsorción de los iones $Pb^{2+}$ según la isoterma de Langmuir	56
4.3.3 Determinación de la isoterma de adsorción de los iones $Pb^{2+}$ según la isoterma de Freundlich	59
<b>V. DISCUSIÓN</b>	<b>62</b>
<b>VI. CONCLUSIONES</b>	<b>64</b>
<b>VII. RECOMENDACIONES</b>	<b>66</b>
<b>VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>67</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>72</b>

**ÁREA:** Tecnologías Ambiental y Recursos Naturales

**TEMA:** Tecnología Ambiental

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 01 de junio de 2023



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Modelos físico-químicos de adsorción .....	31
<b>Tabla 2.</b> Comparación entre valores de $K_{ps}$ en diferentes compuestos.....	37
<b>Tabla 3.</b> Comparación de las propiedades de los agentes precipitantes .....	37
<b>Tabla 4.</b> Ubicación geográfica de las estaciones de muestreo .....	42
<b>Tabla 5.</b> Valores límite de las aguas residuales destinadas a la descarga con plomo en ríos y lagos .....	43
<b>Tabla 6.</b> Análisis químico de las aguas residuales .....	43
<b>Tabla 7.</b> Valores de pH y puzolana activa .....	46
<b>Tabla 8.</b> Identificación de variables y niveles de operación .....	48
<b>Tabla 9.</b> Cálculo del % de rendimiento para el diseño factorial del Pb.....	49
<b>Tabla 10.</b> Matriz del diseño factorial $2^{2-4}$ para el Pb.....	50
<b>Tabla 11.</b> Valores de la cantidad de puzolana activada y la concentración de Pb recuperada .....	51
<b>Tabla 12.</b> Resultados de la adsorción de Pb de las aguas residuales de la ciudad de Puno- Isoterma de Langmuir .....	51
<b>Tabla 13.</b> Datos experimentales de adsorción de Pb con valores de $1/C_e$ y $1/q$ -Isoterma de Langmuir .....	52
<b>Tabla 14.</b> Valores para la Isoterma de Freundlich .....	52
<b>Tabla 15.</b> Resultados de las pruebas de recuperación de Pb de las aguas residuales de la ciudad de Puno .....	53
<b>Tabla 16.</b> Resultados de la concentración de Pb recuperado de la muestra tratada con puzolana activada .....	55
<b>Tabla 17.</b> Resultados del análisis estadístico de la isoterma de Langmuir $C_e/q$ vs $C_e$ ..	56





<b>Tabla 18.</b> Resultados del análisis estadístico de la isoterma de Langmuir $1/q_e$ Vs $1/C_e$ .....	57
<b>Tabla 19.</b> Resultado del análisis estadístico de la isoterma de Freundlich $\log q$ vs $\log C$ .....	60
<b>Tabla 20.</b> Resultados de los análisis estadísticos de las isotermas de Langmuir y Freundlich.....	61
<b>Tabla 21.</b> Análisis de varianza para Y .....	74
<b>Tabla 22.</b> Coeficiente de regresión para Y.....	75
<b>Tabla 23.</b> Optimizar respuesta .....	75
<b>Tabla 24.</b> Cálculo del % de rendimiento para el diseño factorial .....	78



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Proceso de adsorción de un adsorbato en la superficie de un sólido.....	27
<b>Figura 2.</b> Isotermas de adsorción .....	29
<b>Figura 3.</b> Clasificación de las isotermas de Brunauer.....	29
<b>Figura 4.</b> Forma común en la isoterma de Langmuir.....	33
<b>Figura 5.</b> Isoterma de Freundlich.....	35
<b>Figura 6.</b> Solubilidad de hidróxidos metálicos en función del pH .....	38
<b>Figura 7.</b> Bahía interior de Puno .....	42
<b>Figura 8.</b> Puntos de monitoreo bahía interior .....	42
<b>Figura 9.</b> pH al inicio de la agitación magnética .....	45
<b>Figura 10.</b> Número de pruebas con agitación magnética .....	46
<b>Figura 11.</b> Parapeto estandarizado para Y .....	76
<b>Figura 12.</b> Efectos principales para Y.....	76
<b>Figura 13.</b> Contornos de superficie de la respuesta estimada.....	77
<b>Figura 14.</b> Bahía interior del Lago Titicaca Puerto Luis Banchero Rossi .....	79
<b>Figura 15.</b> Toma de muestra de agua residual, Puerto Luis Banchero Rossi .....	79
<b>Figura 16.</b> Toma de muestras de agua residual, en dirección de salida de lanchas hacia las islas .....	80
<b>Figura 17.</b> Toma de muestras de agua residual, salida de lanchas hacia las islas .....	80
<b>Figura 18.</b> Muestra de puzolana triturada .....	81
<b>Figura 19.</b> Puzolana lista para ser pesada .....	81
<b>Figura 20.</b> Pesado 30g de puzolana para ser activa .....	81
<b>Figura 21.</b> Calibrando la mufla a 800°C.....	82
<b>Figura 22.</b> Introduciendo la puzolana a la mufla .....	82



<b>Figura 23.</b> Ácido clorhídrico.....	82
<b>Figura 24.</b> Mufla calibrada a 800°C .....	82
<b>Figura 25.</b> Puzolana en la mufla a 800°C .....	82
<b>Figura 26.</b> Preparando el HCl para el lavado de la puzolana.....	82
<b>Figura 27.</b> Preparando el HCl para el lavado de la puzolana.....	83
<b>Figura 28.</b> Agregando NaOH a la puzolana.....	83
<b>Figura 29.</b> Agregando NaOH a la puzolana.....	83
<b>Figura 30.</b> pH de la puzolana con HCl .....	83
<b>Figura 31.</b> Puzolana lavada con NaOH con pH 7,19 (básico) .....	83
<b>Figura 32.</b> Ingresando la puzolana para ser secada luego del lavado con HCl y con NaOH .....	83
<b>Figura 33.</b> Puzolana seca, lista para ser llevada a agitación magnética.....	84
<b>Figura 34.</b> Toma de los pH de las muestras .....	84
<b>Figura 35.</b> Muestra preparada para la agitación magnética .....	84
<b>Figura 36.</b> Puzolana lavada con NaOH con pH 10,26 (básico) .....	84
<b>Figura 37.</b> Proceso de agitación magnética .....	85
<b>Figura 38.</b> Filtrado de cada muestra después de la agitación magnética .....	85
<b>Figura 39.</b> Filtrado de las muestras después de la agitación magnética .....	85
<b>Figura 40.</b> Se obtuvo seis muestras filtradas, listas para su análisis químico.....	85



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

<b>ECA:</b>	Estándares de calidad de agua
<b>MINAM:</b>	Ministerio del Ambiente
<b>D.S.:</b>	Decreto Supremo
<b>CVP:</b>	Ceniza volante de palma
<b>PEBLT:</b>	Proyecto Especial Lago Titicaca
<b>ANOVA:</b>	Análisis de la varianza
<b>ARM:</b>	Angiografía de resonancia magnética
<b>LPM:</b>	Límite Máximo Permisible
<b>UNAP:</b>	Universidad Nacional del Altiplano
<b>pH:</b>	Potencial de Hidrógeno
<b>FIQ:</b>	Facultad de Ingeniería Química



## RESUMEN

La presente investigación se realizó en la Universidad Nacional del Altiplano Facultad de Ingeniería Química, en el laboratorio de control de calidad. El objetivo de la presente investigación fue determinar la capacidad de adsorción de iones plomo y su isoterma de adsorción de las aguas residuales de la ciudad de Puno, utilizando piedra puzolánica por el método de agitación magnética, se tomaron muestras de las aguas residuales de la ciudad de Puno en dos lugares diferentes, se recolectaron un total de 6 muestras en recipientes de polietileno con capacidad de 200 cm<sup>3</sup>, los cuales fueron conservados en refrigeración hasta su traslado al laboratorio. La metodología experimental determinó el proceso de agitación magnética a 500 rpm, con pH de 7,19 a 10,26 con un tiempo que varía de 10 a 60 min, el factor más importante fue la concentración de puzolana activada con 0.5277 mg/L, utilizando HCl para remover las cenizas, luego NaOH como corrector del pH en cada caso para que cada muestra tenga un pH básico. Las propiedades físicas y químicas de las aguas residuales fueron caracterizadas y superan los límites máximos permisibles de 0,0025 mg/L (ECA), después del proceso de agitación magnética con puzolana activada, los resultados fueron que se recuperó 0,0128 mg/L de plomo. El modelo matemático definió el coeficiente de correlación obtenido fue de  $R^2 = 88,51\%$  para las aguas residuales de la ciudad de Puno, las isotermas se obtuvieron con las siguientes conclusiones: para la isoterma de Langmuir el  $R^2=0,9547$  y para la isoterma de Freundlich  $R^2=0,9666$ , lo cual nos indica que el proceso de adsorción con puzolana activada es adecuado.

**Palabras clave:** Adsorción, agitación magnética, isotermas, plomo, puzolana activada.



## ABSTRACT

This research was carried out at the Altiplano National University, Chemical Engineering Faculty, in the quality control laboratory. The research objective was to determine the adsorption capacity of lead ions and its adsorption isotherm of the wastewater of Puno city using pozzolanic stone, by magnetic agitation method, wastewater samples of the city were taken. Puno in two different places, a total of 6 samples were collected in polyethylene containers with a capacity of  $200 \text{ cm}^3$ , which were kept refrigerated until transferred to the laboratory. The technology proposed for the experimental process determined the magnetic stirring process at 500 rpm, with a pH of 7,19 to 10,26 with a time that varies from 10 to 60 min, the most important factor being the concentration of activated pozzolan, using HCl to remove the ashes, then NaOH as a pH corrector in each case so that each sample has a basic pH. The physical and chemical properties of the wastewater were characterized and exceed the maximum permissible limits of 0,0025 mg/L, after the magnetic stirring process with activated pozzolan, the results were that 0,01282044 mg/L of lead was recovered. The mathematical model defined the correlation coefficient obtained was  $R^2 = 88,51\%$  for the wastewater of Puno city, the isotherms were obtained with the following conclusions: for Langmuir the  $R^2=0,9547$  and for Freundlich  $R^2=0,9666$ , which indicates that the adsorption process with activated pozzolan is adequate.

**Keywords:** Adsorption, magnetic stirring, isotherms, lead, activated pozzolan.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La ciudad de Puno, se caracteriza por no tener sistemas apropiados de tratamiento de aguas residuales municipales. Al no tener un eficaz tratamiento, las aguas residuales se conducen a la bahía interior del Lago Titicaca impactando a las fuentes de aguas. Según estudios se ha determinado que contienen materia orgánica y una alta composición iónica representada por iones inorgánicos metálicos y no metálicos (Orozco, 2004). El agua potable también es susceptible a ser contaminada por metales pesados, ya sea por un mal tratamiento o una lixiviación de los metales a partir del sistema de distribución de agua, e incluso los alimentos pertenecientes a cultivos que han sido regados con agua residuales pueden presentar trazas de metales y contaminación con compuestos orgánicos o inorgánicos (Qureshi, 2016). Existen varios métodos para los procesos de adsorción y recuperación de metales pesados como la precipitación química, intercambio iónico, filtración, tratamientos electroquímicos, metodología de membranas, evaporación y coagulación-floculación, entre otros que son los métodos comúnmente utilizados para el tratamiento de ARM.

La puzolana es un material silicoso o silico-aluminoso, sólido, inorgánico y poroso, con una estructura cristalina, donde los átomos de aluminio tienen una coordinación tetraédrica, lo cual provoca una carga negativa en la estructura principal del aluminosilicatos; esta carga es compensada por cationes metálicos (Meral, 2004). El objetivo principal de este proyecto es determinar la capacidad de adsorción de iones plomo y su isoterma de adsorción de las aguas residuales de la ciudad de Puno utilizando piedra puzolánica, dando a conocer los parámetros óptimos de pH, temperatura y tiempo de adsorción para la recuperación de plomo y el modelo matemático para el proceso de adsorción de plomo de las aguas residuales con piedra puzolánica. Los resultados



obtenidos en dichos experimentos han sido comparados con estudios anteriores de remoción de plomo por diferentes métodos de adsorción de metales pesados como la coagulación y floculación, agitación magnética, con el fin de estudiar si existen diferentes mecanismos para este proceso (Orozco, 2004).

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

- Determinar la capacidad de adsorción de iones plomo y su isoterma de adsorción con piedra puzolánica de las aguas residuales de la ciudad de Puno .

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la concentración de plomo en las aguas residuales en la Bahía interior de la ciudad de Puno.
- Determinar los parámetros óptimos de pH y concentración de puzolana, por el proceso de agitación magnética.
- Determinar el modelo matemático para el proceso de adsorción de plomo de las aguas residuales y la aplicación de isothermas de adsorción en la recuperación de plomo.





## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 ANTECEDENTES

Farro, et al. (2015), en su trabajo de investigación utilizó la síntesis de la zeolita, lo precalentó a 800°C y luego efectuó un lavado con HCl al 10% cuyo objetivo fue el de conseguir la ceniza pretratada de palma (CVP). Se utilizó el método de la fusión alcalina para la síntesis de las zeolitas, usando proporciones en masa de NaOH/CVP = 0,5/1; 1,0/1; 1,5/1; 2,0/1 y 2,5/1 e identificando a las zeolitas resultantes como Z05, Z10, Z15, Z20 y Z25, respectivamente. En su trabajo utilizó la fusión fue de 550°C durante 1 hora y el proceso de cristalización, a 90°C, durante 2h se regeneró con NaCl al 5%, para ser reutilizadas en una segunda extracción de iones. Con 1,5g de zeolita logró remover el 99,9% de Cu<sup>2+</sup> contenido en 100mL de su solución. Mientras que, con 2,0g, logró remover tanto en la primera como en la segunda extracción, el 99,9% del Pb<sup>2+</sup> contenido en 100mL de su solución.

Rodríguez, et al. (2016), en las pruebas utilizó combinación de cationes conteniendo Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> y Mn<sup>2+</sup>, los resultados obtenidos fueron que la remoción en miligramos por gramo del material zeolítico en su estado natural sigue el orden siguiente: Pb<sup>2+</sup> > Cu<sup>2+</sup> = Zn<sup>2+</sup> > Mn<sup>2+</sup>, luego del proceso de la transformación hidrotermal del material volcánico, se obtuvo el material zeolítico, el cual tiene una alta capacidad de intercambio catiónico (400meq/100g.) y corresponde a la zeolita sintética del tipo NaP1. La formación de este producto con un producto químico como es el NaOH 2,5 M a 100 °C y durante 8 horas, la zeolita tiene una buena capacidad de intercambio para los cationes Pb<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> y NH<sup>4+</sup>.

Gebremedhin, (2002), la cuantificación de mercurio se llevó a cabo en solución, mediante espectroscopia de absorción atómica. La cantidad de azufre en los minerales



zeolíticos acondicionados con NaCl y posteriormente modificados con cloruro de cisteaminio (0,375 mol/g), demostró que fue mayor en relación a los minerales modificados con cloruro de cisteaminio. En los minerales zeolíticos modificados con tiourea, la cantidad de azufre fue más baja. Los coeficientes de difusión y las isothermas de sorción de Hg se obtuvieron para los minerales zeolíticos natural, acondicionado con cloruro de sodio (NaCl) y acondicionados con cloruro de sodio (NaCl). La adsorción de mercurio (Hg) a causa de la zeolita modificada, no fue afectada por la presencia de los metales Cu (II), Zn (II) y Ni, los cuales sirvieron para la presente investigación.

Valdez, A. (2018), investigó la capacidad de adsorción de la zeolita natural para la eliminación de iones de metales pesados  $Cu^{2+}$  y  $Pb^{2+}$ . Los parámetros como el pH inicial (3-6), tamaño de partícula ( $595\mu m-74\mu m$ ), cantidad de adsorbente (1-4g) concentración inicial (50-400mg/L) y tiempo de contacto (15-120min), fueron evaluados. Manteniendo una temperatura constante de  $25\text{ }^{\circ}C$  y velocidad de agitación de 150rpm. De acuerdo a la investigación se determinó que la remoción del plomo fue entre el 30 al 100%, y para el cobre fueron entre el 30 y 80% y cuyos valores óptimos para la remoción de los metales Pb y Cu; cantidad de adsorbente: 4g y tiempo de remoción 30min, tamaño de partícula  $74\mu m$ .

Ordoño y Mendoza, et al. (2020), en su investigación sobre la adsorción de cobre Cu (II) y arsénico As (V) de soluciones acuosas y de aguas residuales de mina, obtuvo los siguientes resultados, la zeolita acondicionada contiene 8.36% de  $(K_{0,92}Na_{0,08})(AlSi_3O_8)$ , la remoción de Cu (II) fue de del 99,36%, As (V) fue 52,78% de. La isoterma de adsorción para ambos fue el modelo de Langmuir; expresada para el Cu (II) por la ecuación  $(L/q_e) = 0,0973 (L/C_e) + 0,8075$ , la correlación  $R^2 = 98,62\%$  y para el As (V) por la ecuación  $(1/q_e) = 0,1656 (1/C_e) + 1,2928$ , cuya correlación  $R^2 = 96,74\%$ . como



conclusión fue que la remoción obtenida para el Cu (II) y As(V) en las aguas residuales de mina son menores a los límites máximo permisibles.

Cosme, et al. (2017), para el proceso de coagulación estableció las condiciones para 5 minutos y 100 rpm y para la floculación se utilizó un tiempo de 20 minutos y velocidad de 50 rpm, luego de finalizado el proceso se procedió a la sedimentación durante 30 minutos. Se llegó a los siguientes resultados, el plomo tuvo una remoción del 88,36% con Policloruro de aluminio 20 ppm y la remoción del plomo con *Opuntia floccosa*, 30 ppm fue de 73,41%.

Panca, et al. (2016), obtuvo los siguientes resultados: pH óptimo en la remoción de fluoruro con policloruro de aluminio fue 6,5 y la remoción con lechada de cal el pH óptimo es 11. Cabe señalar que la remoción de fluoruro con policloruro de aluminio está en los rangos de pH 6 a 8, es decir tiene amplio rango de pH. La velocidad de agitación en la remoción de fluoruro con policloruro de aluminio fue de 100 rpm y en la remoción con lechada de cal fue de 140 rpm.

Restrepo, et al. (2016), en su trabajo de investigación de evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable concluye que, para un tiempo de floculación de 30 min se observa la mayor remoción, además para este tiempo se presenta la menor dependencia de la turbiedad remanente respecto al gradiente. El Sulfato de Aluminio líquido Tipo B presenta un mayor porcentaje de remoción de 95,77%, seguido muy de cerca por el PAC con un 94,87% y por último el PASS con un 94,51%.

Pomalaza, et al. (2017), la dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio tipo A, ha sido 120 mg  $Al_2(SO_4)_3/L$ , para una alta eficiencia de remoción de arsénico a condiciones de: 15,8 °C de temperatura, pH 8, tiempo de duración de mezcla rápida 5 minutos, gradiente de velocidad de mezcla rápida de 200rpm, tiempo de duración de



mezcla lenta de 15 minutos, gradiente de mezcla lenta de 60rpm y un tiempo de sedimentación de 30 minutos. La ecuación de optimización  $Y = -0,0146x^2 + 3,5698x - 128,2$ , que se obtuvo a partir de la Dosis versus el porcentaje Remoción de 12 pruebas preliminares, obteniendo así la mejor dosis 122,25 mg  $Al_2(SO_4)_3/L$ , la cual fue base para la determinación de los niveles para las pruebas experimentales donde se encontró la dosis óptima cuyo valor es de 120 mg  $Al_2(SO_4)_3/L$ .

Valencia, J. et al. (2013), la remoción de iones Pb (II) a partir de una disolución acuosa sobre carbón activado granular se investigó a 27 °C. Los resultados muestran que el rendimiento de la columna mejora cuando se incrementa la altura del lecho de carbón activado y disminuye el flujo volumétrico y la concentración inicial. Los datos experimentales de las curvas de ruptura se ajustaron a los modelos BDST (Bed Depth Service Time), Clark y Wolborska. El modelo BDST proporciona el mejor ajuste para describir el comportamiento dinámico en todas las condiciones de operación estudiadas. El modelo de Clark para relaciones de C/Co entre 0,05 y 0,5 y el modelo de Wolborska para  $C/Co < 0,2$  describen de manera satisfactoria el rendimiento de la columna.

## **2.2 MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1 Metales pesados**

Se denomina metales pesados a aquellos elementos químicos que poseen un peso atómico comprendido entre 63,55 (Cu) y 200,59 (Hg), y que presentan un peso específico superior a 4 ( $g/cm^3$ ). Cabe destacar que en esta categoría entran prácticamente todos los elementos metálicos de interés económico, por tanto, de interés minero (Weast, 1984).

Los metales pesados poseen una conductividad eléctrica alta, son dúctiles, la mayoría son elementos de transición con capacidad para formar compuestos que pueden o no sufrir actividad redox. De los 82 elementos que se encuentran naturalmente 21 son no metales, 16 son metales ligeros y los tres restantes, incluyendo el As, son metales



pesados. Se incluyen el Cd, Pb, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Co, Hg, Ni, Al y Se (Weast, 1984). Los metales pesados se pueden clasificar en esenciales (Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn, V), los cuales cumplen alguna función biológica a concentraciones traza y en no esenciales (Cr, Cd, Hg, Pb, As, Sb), cuando no cumplen ninguna función biológica conocida. Los iones metálicos son parte de la geósfera, por lo tanto, se encuentran presentes de forma natural en la corteza terrestre (yacimientos) y son extraídos por el hombre para su fundición y posterior uso industrial. Las principales causas de acumulación natural en los ecosistemas son: la erosión, la actividad volcánica y los incendios forestales, que de la misma manera cumplen ciclos de acumulación y remediación, sin presentarse un efecto tóxico y/o nocivo para los ecosistemas (Mejía, 2006).

El proceso de transformación de los metales pesados abarca desde su extracción en los yacimientos, hasta la fundición y el refinado de éstos, para obtener los metales de interés y convertirlos en bienes de consumo, que una vez utilizados es desechado. En cada una de estas etapas se liberan metales al ambiente; así, la minería expone las rocas metálicas a meteorización acelerada, lixiviación y escorrentía; la fundición y el refinado, liberan importantes cantidades de productos secundarios. Las descargas de las industrias de aplicación, transformación, residuos sólidos urbanos y lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, contienen una importante carga de diferentes iones metálicos. El aporte atmosférico se da principalmente por la combustión de materias primas energéticas fósiles como carbón, gasolina, etc (Mejía, 2006).

### **2.2.2 Propiedades de los metales pesados**

Las propiedades físicas y químicas más resaltantes de los metales pesados (Weast, 1984).

Propiedades físicas:

- Peso específico.
- Calor específico.



- Dilatación térmica.
- Temperatura de fusión y solidificación.
- Conductividad térmica y eléctrica.
- Dureza.

Propiedades químicas:

- Resistencia al ataque químico.
- Molécula monoatómica.
- Brillo característico llamado metálico.
- Muy poco reactivo con el hidrogeno.
- Se combina con el oxígeno para formar los óxidos.
- Son dúctiles o deformables.
- Son sólidos a temperatura normal excepto el mercurio que es líquido.

### 2.2.3 Plomo

El plomo es un metal pesado de alta densidad  $11,4 \text{ g/cm}^3$  a  $16^\circ\text{C}$ , de color azulado, que al empañarse adquiere un color gris mate. En estado puro es blando y maleable, poco dúctil y mal conductor de la electricidad. Como muchos metales, en ambientes húmedos se recubre de una capa de óxido. Sus características más relevantes son: número atómico 82, peso atómico 207,19, su punto de fusión  $327,4^\circ\text{C}$ , y el punto de ebullición  $1\ 740^\circ\text{C}$ . Tiene 4 isótopos naturales, de pesos atómicos 208, 206, 207, 204 y una dureza de 1,5. Es relativamente resistente al ataque de ácidos sulfúrico y ácido clorhídrico, aunque se disuelve con lentitud en ácido nítrico y ante la presencia de bases nitrogenadas. Posee 4 electrones en su órbita de valencia, de los que sólo 2 se ionizan con facilidad, por lo que el estado de oxidación de este metal en sus compuestos inorgánicos es en general, de +2 (Mejía, 2006).

## 2.2.4 Origen

La presencia de metales pesados en el suelo, al igual que en aguas subterráneas y superficiales, puede ser resultada de procesos naturales y de actividades antropogénicas, siendo esta última la principal responsable tanto de forma directa como indirecta del incremento de los niveles de metales pesados en el ambiente. Por su parte, la actividad antropogénica es responsable del incremento de estos elementos en aguas superficiales (por medio de la descarga de residuos líquidos), en el aire (por medio de procesos de combustión) y en el suelo (a través de actividades agropecuarias). Ambientalmente se encuentra en las siguientes formas: Derivados inorgánicos (procesos naturales).

El plomo se presenta con diferentes composiciones como óxidos minerales de: Cerusita  $PbCO_3$ , Anglesita:  $PbSO_4$ , Hidrocerusita:  $2PbCO_3.Pb(OH)_2$ , Minio:  $2PbO.PbO_2$ , Minto:  $Pb_3O_4$ , Plumbojarosita:  $PbFe_6(OH)_{12}(SO_4)_4$ . Además, otros metales acompañan al óxido de plomo, como los sulfuros de: Galena:  $PbS$ , Jamesonita:  $2PbS.Sb_2S_3$ , Geocronita:  $5PbS.Sb_2S_3$ . Siendo los de mayor interés la cerusita, anglesita, galena y jamesonita. Los minerales oxidados de plomo económicamente importantes son: cerusita y anglesita (Valduvina, 2018).

Son derivados orgánicos el acetato de plomo; abortivo, el tetraetilo de plomo, antidetonante, el estearato de plomo. Que da consistencia al plástico y el naftenato de plomo; componente de los aceites y grasas de uso industrial (Valduvina, 2018).

## 2.2.5 Toxicología del plomo

El plomo no tiene ninguna función biológica dentro de los microorganismos. Y una de las características de este metal es que es tóxico para las células vivas.

### a. Tóxico

#### • Absorción

Las vías de entrada del plomo inorgánico en el organismo son fundamentalmente la



respiratoria y la digestiva. Por la vía respiratoria se absorbe entre el 30 y el 50% del plomo inhalado. Por la vía digestiva se absorbe el 10% (50% en los niños) (Richardson, 1995).

#### • **Distribución y vida media**

El plomo absorbido es transportado por la sangre y alrededor del 90% se fija en los glóbulos rojos. El plomo en el organismo sigue un modelo tricompartmental (Richardson, 1995):

- El sanguíneo (el 2% del contenido total, con una vida media de unas 5 semanas).
- El de los tejidos blandos (el 8%, con una vida media de unas 6-8 semanas).
- El óseo (representa el 90% del contenido total y con una vida media que oscila entre los 10 y 28 años).

#### **b. Mecanismo de toxicidad**

El plomo tiene gran afinidad por grupos imidazol, sulfhídrico, amino, carboxilo y fosfato. Presenta una fuerte unión a las membranas biológicas. Presenta una fuerte unión a las proteínas y numerosas vías metabólicas como la fosforilación oxidativa y la síntesis de la hemoglobina. La inhibición de la pirimidin 5' – nucleotidasa. Depósitos de ácidos nucleicos en los hematíes ocasionando el punteado basófilo. El plomo es desmielinizante y puede ocasionar degeneración axonal.

Tras la absorción y debido a su valencia 2 es asimilado como el calcio en los huesos y se elimina con dificultad. Es especialmente significativa su eliminación en la etapa de lactancia pasando este de los huesos a la leche materna. Se elimina de forma natural de los huesos en su regeneración liberándose en especial ante el padecimiento de osteoporosis (Richardson, 1995).

#### **2.2.6 Definición de la puzolana**

Las puzolanas se definen como materiales silíceos y aluminosos, que en sí mismos poseen poco o ningún valor cementante, pero sí poseerán su poder cementante cuando





estén finamente dividida las partículas y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el calcio hidróxido a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementosas (ASTM, 1994). Todos los materiales silíceos y aluminosos no son puzolánicos, los materiales silíceos que se consideran puzolanas son reactivas. Sin embargo; minerales cristalinos, como sílice como el cuarzo, alúmina como corindón y aluminosilicatos como silimanita (SA) y mulita ( $S_3A_2$ ) no son materiales de combinación de cal a temperatura ambiente. En general, los materiales silíceos y aluminosos pueden mostrar propiedades puzolánicas si son finamente molido y en forma amorfa (Meral, 2004).

#### Clasificación de las puzolanas

Las puzolanas se clasifican principalmente en dos grupos en función de sus orígenes como natural y artificial.

##### **a. Puzolanas naturales**

Las puzolanas naturales son de origen volcánico, tales como algunas tierras de diatomeas; cherts de opalina y esquistos; tobas y cenizas o pumicites volcánicas, cualquiera de los cuales pueden o no ser procesados por calcinación; y diversos materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, tales como algunas arcillas y pizarras. Las puzolanas naturales procesados o sin procesar han sido utilizados por la humanidad para las construcciones civiles durante miles de años. Los morteros y hormigones se forman utilizando una mezcla de cal y una puzolana natural - típicamente una ceniza volcánica o un residuo de ladrillos, fueron desarrollados y utilizados por los griegos y más tarde fueron utilizados por los romanos (150 a.C.), para construir durables edificaciones, para el uso de tanques de almacenamiento de agua (Meral, 2004).

##### **b. Puzolanas artificiales**

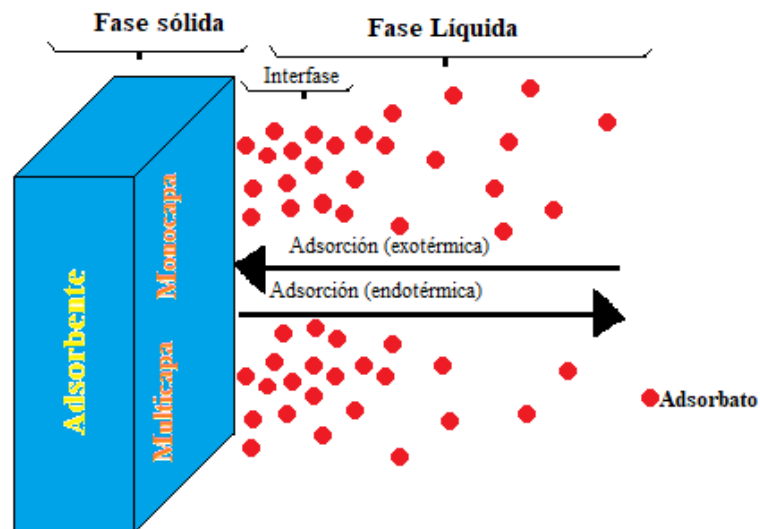
Las puzolanas artificiales son aquellas que se obtienen como subproductos

industriales.

Entre ellas están las cenizas volantes (finas partículas sólidas de las cenizas llevadas a cabo a partir de la quema de carbón en centrales eléctricas), humos de sílice (finamente divididas, subproductos obtenidos en la fabricación de metal de silicio o aleaciones de silicio), y escorias de alto horno granulado (subproductos generados por el rápido enfriamiento de sustancias no ferrosos en minerales de hierro que se separan a partir del metal caliente en un alto horno), son los ejemplos más comunes de puzolanas artificiales (Erdogan, 1997) (Meral, 2004).

### **2.2.7 Adsorción**

La adsorción se refiere a la existencia de una concentración más elevada de cualquier componente en la superficie de la fase sólida que la que hay en la fase líquida (figura 1). La sustancia que se deposita en la interfase se llama adsorbato, y la sustancia en cuya superficie se realiza la adsorción, adsorbente. En años recientes se han investigado una gran cantidad de nuevos materiales adsorbentes que incluyen carbones, nanomateriales, nuevas zeolitas, aluminosilicatos, arcillas y sólidos porosos (Ambe, S. 1989 y Abe M. 1982). Todos estos materiales presentan altas áreas específicas (mayores que  $100\text{m}^2/\text{g}$ ) y son por lo tanto altamente porosos por lo que han demostrado ser efectivos para el tratamiento de desechos radiactivos y no radiactivos presentes en solución acuosa, ya que tienen afinidad por ciertos iones o grupos de iones y han mostrado alta selectividad, resistencia a la degradación, a temperaturas altas y a niveles altos de radiación (Granados et al., 2010).



**Figura 1.** Proceso de adsorción de un adsorbato en la superficie de un sólido

**Fuente:** (Granados et al., 2010).

### 2.2.8 Tipos de adsorción

En general se identifican dos principales tipos de adsorción: la física, o fisisorción, y la química, o quimisorción: Fisisorción: las fuerzas son de naturaleza física y la adsorción es relativamente débil. Las fuerzas corresponden a las consideradas por Johannes Van Der Waals con respecto a su ecuación de estado para los gases. El calor que se desprende cuando un mol de gas experimente fisisorción en general es bajo, de menos de 20 kJ. Quimisorción: considerada por primera vez en 1916 por el químico Irving Langmuir, menciona que las moléculas adsorbidas se unen a la superficie mediante fuerzas covalentes del mismo tipo general que las que ocurren entre los átomos de las moléculas. El calor que desprende por mol en este tipo de adsorción, en general es comparable con el que se desprende de un enlace químico, o sea, de 100 a 500kJ/mol (Laidler, 2003).

### 2.2.9 Parámetros físico químico que influyen en los procesos de adsorción

(Granados et al., 2010) la eficiencia de los procesos de adsorción depende de las características del adsorbente (área específica, estructura y tamaño de partícula, entre otras) y de las propiedades de las especies químicas en solución (cationes y aniones,

tamaño del ion y carga eléctrica), además del tipo de mecanismo de adsorción que pueda ocurrir entre las fases, las condiciones del proceso (pH, temperatura, concentración) y las fuerzas que controlan el proceso (Van Der Waals, electrostáticas, enlaces químicos).

### 2.2.10 Capacidad de adsorción

La calidad del material adsorbente es considerada de acuerdo a cuánto sorbato puede atraer y retener en una forma “inmovilizada”. La cantidad de metal adsorbido por el adsorbente puede ser calculada como la capacidad de sorción,  $q$ . Las capacidades de sorción dependen de las constantes ácido-básicas, del punto isoeléctrico del adsorbente y del pH de la solución (Tapia, 2002).

$$q = \frac{V(C_o - C_{eq})}{m}$$

Donde:

$q$ : Capacidad de adsorción ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )

$V$ : Volumen de la solución (L).

$C_o$ : Concentración inicial de plomo (ppm).

$C_{eq}$ : Concentración del residual de plomo en el equilibrio (ppm).

$m$ : Masa del biosorbente (g).

### 2.2.11 Isotermas de adsorción

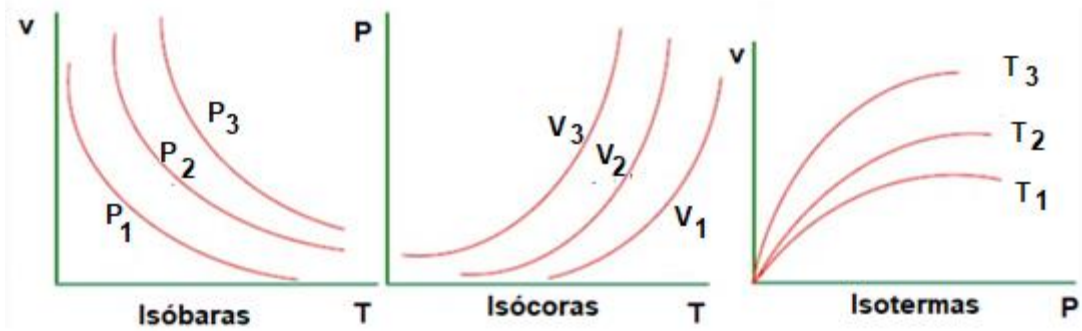
Las isotermas de adsorción indican como las moléculas adsorbidas se distribuyen entre la fase líquida y la sólida cuando el proceso de adsorción alcanza un estado de equilibrio (Okeola et al., 2010).

El grado de adsorción en sólidos se puede describir como:

$P$ : Presión del gas que se absorbe.

$V$ : Volumen de gas absorbido.

$T$ : Temperatura de la experiencia.

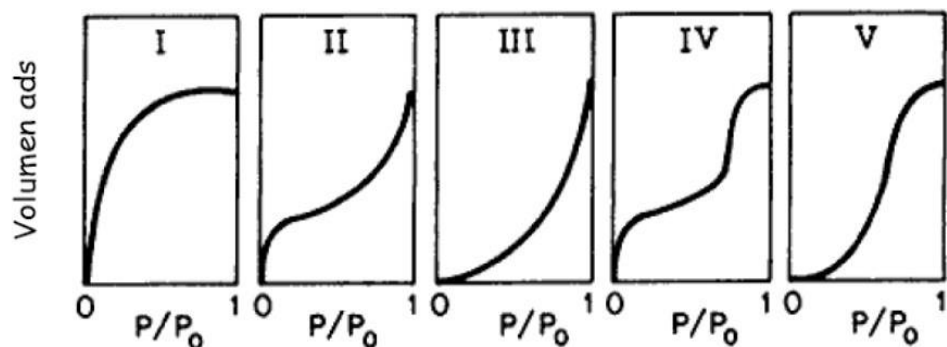


**Figura 2.** Isotermas de adsorción

**Fuente:** (Morón 2018, tema-III-Adsorción y Catálisis).

El grado de adsorción más comúnmente usado en los sólidos son las isotermas, donde la relación entre la cantidad de adsorbato por gramo de adsorbente y la presión o concentración de equilibrio está a una temperatura constante.

Según la clasificación de Brunauer se tiene 5 tipos:



**Figura 3.** Clasificación de las isotermas de Brunauer

**Fuente:** (Morón, 2018. Tema-III-Adsorción y Catálisis)

#### TIPO I

El adsorbente cubre el adsorbente con una superficie uniforme hasta que se forme una sola capa de recubrimiento, y luego el proceso se detiene. La mayoría de los procesos de adsorción química muestran esta isoterma.

#### TIPO II



El adsorbato cubre el adsorbente hasta tener una capa única, y luego continúe la adsorción multicapa. A menudo aparece en el proceso de adsorción física con interacciones no muy específicas.

### TIPO III

El adsorbato tiene aproximadamente la misma afinidad por el adsorbente y por sí mismo, o más similar a sí mismo, así que una vez que se adsorbe una molécula, también actuó como sitio libre.

### TIPO IV

En este caso el comportamiento inicial es formar una sola capa para mostrar más tarde una formación multicapa hasta alcanzar el espesor de multicapa a presión máxima.

### TIPO V

En este caso, el comportamiento inicial es formar una multicapa hasta espesor máximo (Morón, 2018).

Ahora, se utilizan diferentes modelos físicos y químicos para estudiar el equilibrio de adsorción. En estos modelos, se trata de proporcionar la cantidad de metal adsorbido por unidad de masa adsorbente y la concentración de metal residual en la solución. En la tabla 1, se hace un resumen de los principales modelos de isothermas y sus ecuaciones:

**Tabla 1.** Modelos físico-químicos de adsorción

<b>ISOTERMA</b>	<b>ECUACION</b>
Modelo de Freundlich	$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e$ <p>Kf=Constante característica relacionado a la capacidad de adsorción n=Constante característica relacionado a la intensidad de adsorción o grado de favorabilidad de adsorción q<sub>e</sub>=Cantidad de metal adsorbido en el equilibrio</p>
Modelo de Langmuir	$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$ <p>C<sub>f</sub> = Concentración de metal en disolución al alcanzar el equilibrio mMol/L q<sub>max</sub> = Adsorción máxima correspondiente a los sitios de saturación K = Relación entre la tasa de adsorción /desorción</p>
Modelo BET	<p>C<sub>S</sub>: concentración de saturación del soluto B: constante relacionada a la energía de interacción con la superficie</p>
Modelo de Redlich-Peterson	$q_e = \frac{k_{rp} C_e}{1 + \alpha_{RP} C_e^\beta}$
Modelo de Temkin	$q_e = \ln k_t + \beta \ln C_e$

**Fuente:** (Tejada, 2014).

### 2.2.12 Modelo de adsorción de Langmuir

La ecuación de Langmuir como su nombre bien lo dice fue desarrollada en 1918 por Irving Langmuir, con la finalidad de explicar la adsorción de moléculas en estado gaseosas en una superficie plana. Al inicio fue utilizada por Fried y Shapiro en 1956 y Olsen y Watanabe en 1957 para la explicación de la adsorción de fosfatos en los suelos, tiempo después los usos fueron ampliados llegando hasta ser usada para la adsorción en superficies solidas (Marín A. 2010).

La isoterma de Langmuir después de ser usada para superficies solidas fue usada para adsorción de gases solidos obteniendo buenos resultados, por lo que se evalúa el

proceso de adsorción en fase líquida y hoy es uno de los modelos más utilizados para la apreciación de diferentes estudios de adsorción (Paredes, 2011).

Este modelo supone que las moléculas son adsorbidas en la superficie hasta formar una capa completa, es decir, llegar a la saturación, momento en el cual el proceso de adsorción finaliza, y la superficie es uniforme. En este modelo se supone que hay un sitio de adsorción fijo solo puede haber una molécula de adsorción en cada sitio, todos son equivalentes y no hay interacción entre las moléculas adsorbidas (Miranda L. 2012).

En la isoterma de Langmuir, se asume que la fuerza de los átomos es ejercida sobre la superficie no saturada químicamente, es decir la cantidad total de sitios enlazados no se dispersan, es decir, la adsorción es de manera limitada a una sola capa. Esta isoterma es uno de los más comunes cuando se quiere realizar el estudio de la adsorción, porque se basa en el supuesto que existe un número de sitios activos definidos, los cuales son distribuidos de manera homogénea y que cuenta con la misma afinidad con el metal para formar una monocapa y de esta manera no existe interacción entre ellas (Miranda L. 2012).

La ecuación que representa este modelo es:

$$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

Dónde:

$q_e$  = capacidad de adsorción de sorbato, en mg de sorbato por gramos de sorbente (mg/g).

$q_{max}$  = Capacidad de adsorción saturada en monocapa, en mg de sorbato por gramos de sorbente (mg/L).

$K_L$  = constante de la isoterma de Langmuir (L/mg).

$C_e$  = Concentración de equilibrio de sorbato en solución mg/L.



Realizando la linealización de la ecuación es:

$$\frac{1}{q_e} = \left( \frac{1}{K_L q_{max}} \right) \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_{max}}$$

Dónde:

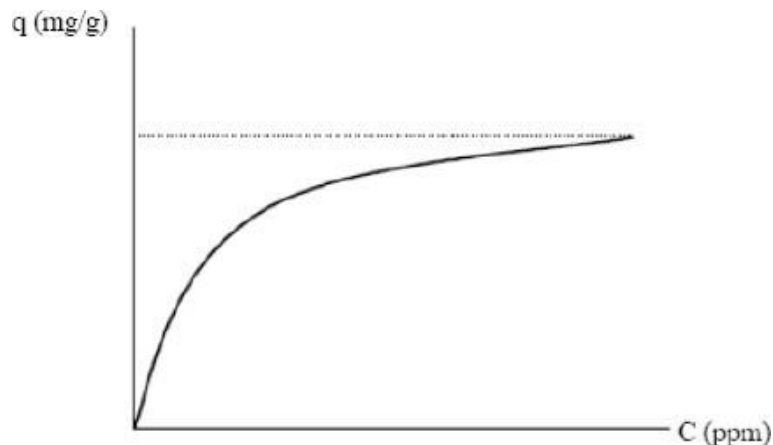
$q_e$  = capacidad de adsorción de sorbato, en mg de sorbato por gramos de sorbente (mg/g).

$q_{max}$  = Capacidad de adsorción saturada en monocapa, en mg de sorbato por gramos de sorbente (mg/L).

$K_L$  = constante de la isoterma de LA (L/mg).

$C_e$  = Concentración de equilibrio de sorbato en solución mg/L.

Cuando el valor de  $K_L$  es mayor a 1, la isoterma es altamente favorable, por el contrario, cuando  $K_L$  es menor a 1, la isoterma es prácticamente lineal. La desventaja es que la isoterma tiene una teoría sencilla por lo que no permite el ajuste cuando el valor de  $K_L$  es mayor (Marín A. 2010).



**Figura 4.** Forma común en la isoterma de Langmuir

**Fuente:** (Marín, 2010).

### 2.2.13 Modelo de adsorción de isoterma de Freundlich

Freundlich en su modelo de adsorción propone una adsorción de superficie única, donde la distribución de energía es desigual y hay interacción entre las moléculas adsorbidas. Freundlich indica una ecuación semiempírica e isotérmica. La isoterma a



menudo se conoce como la ecuación clásica y se usa ampliamente, especialmente en el rango de concentración baja a media de acuerdo con la siguiente ecuación: (Marín, 2010).

Y realizando la linealización resulta la siguiente ecuación:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e$$

Dónde:

$q_e$ =capacidad de adsorción de sorbato, en mg de sorbato por gramos de sorbente.

$C_e$ =Concentración de equilibrio del metal en solución (mg/L).

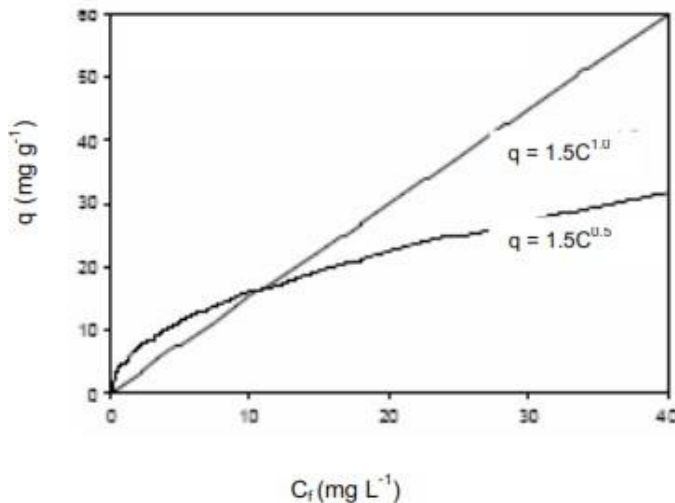
$K_F$  y  $n$ = Constantes que depende de la temperatura, naturaleza del adsorbente y adsorbato.

$K_F$  = Constante de Freundlich o de equilibrio determinada experimentalmente.

$n$  = Representa la intensidad de adsorción, adimensional. Constante sin ningún significativo físico, es siempre mayor que 1 y usualmente se encuentra entre 2 y 4.

El modelo de Freundlich supone que hay un número infinito de sitios activos. Sin embargo, es uno de los primeros modelos que asocia la cantidad de iones metales con la concentración del metal en la solución (Miranda L. 2012).

El modelo de Freundlich generalmente es usado como un isoterma no lineal, que establece una relación entre la concentración de soluto en la superficie del adsorbente y la concentración del soluto en el líquido en contacto (Paredes, 2011).



**Figura 5.** Isoterma de Freundlich

**Fuente:** (Muñoz M. 2007).

#### 2.2.14 Precipitación alcalina

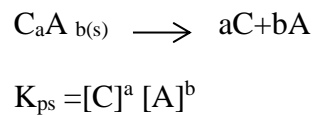
La precipitación es un proceso físico-químico en el cual metales solubles e inorgánicos son convertidos a metales y sales inorgánicas relativamente insolubles al adicionar un agente precipitante. Comúnmente se utiliza un reactivo alcalino para poder aumentar el pH de la solución y así disminuir la solubilidad del metal y por ende inducir la precipitación. La precipitación alcalina es un proceso automático y controlado por una solución de pH básico. Al aumentar el valor del pH con una solución común alcalina como NaOH, Ca(OH)<sub>2</sub>, el hidróxido metálico correspondiente se vuelve insoluble y se precipita en la solución.

La solubilidad que se obtiene teóricamente generalmente no es la misma que en la práctica. La solubilidad teórica se puede definir como el número de moles o miligramos de soluto que se pueden disolver en un litro de solución (Orozco, Triviño, & Manrique, 2004 *et al.*, 1998).



Los coagulantes metálicos son utilizados en la mayoría de las veces para acelerar la coagulación y precipitación de los metales pesados. El hidróxido férrico y/o el hidróxido de aluminio precipitan y tienden a formar co-precipitados con níquel y cromo.

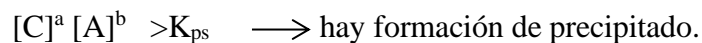
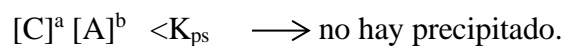
La constante del producto de la solubilidad mejor conocida como  $K_{Ps}$  depende de cada compuesto y las condiciones de operación a las que se encuentran. La  $K_{Ps}$  se puede definir como: “Es igual al producto de las concentraciones de los iones que participan en el equilibrio, cada una elevada a la potencia de su coeficiente en la ecuación de equilibrio” (Brown et al., 1998). Generalmente se toman a 25 °C y el compuesto disuelto en agua pura. La manera de calcular  $K_{Ps}$  es la siguiente:



Donde

(C) y (A) son las concentraciones en moles por litro.

La formación de un precipitado se puede inferir al hacer la comparación entre la concentración de iones presentes en la solución y el  $K_{ps}$  de la solución. (Brown *et al* 1998).



A continuación, se muestra en la tabla 2 una comparación entre los valores  $K_{ps}$  encontrados en la literatura para los compuestos a utilizar en este proyecto de investigación.

**Tabla 2.** Comparación entre valores de  $K_{sp}$  en diferentes compuestos

Compuesto	Formula	$K_{sp}$ (25°C)	$pK_{sp}$	$K_{sp}$
Hidróxido de Cromo (III)	$Cr(OH)_3$	----	30,2	$6,3 \times 10^{-31}$
Hidróxido de Cobre (II)	$Cu(OH)_2$	$4,8 \times 10^{-20}$	10.66	$2,2 \times 10^{-20}$
Hidróxido de Níquel	$Ni(OH)_2$	$5,48 \times 10^{-16}$	15	$1,6 \times 10^{-14}$
Hidróxido de Zinc	$Zn(OH)_2$	$3 \times 10^{-17}$	16,7	$1,2 \times 10^{-17}$

*Fuente: (Brown et al., 1998)*

### 2.2.15 Agentes precipitantes alcalinos más utilizados en la industria

- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Hidróxido de calcio  $Ca(OH)_2$
- Hidróxido de magnesio  $Mg(OH)_2$

En la tabla 3 se dan algunas de las características de los tres agentes precipitantes antes mencionados.

**Tabla 3.** Comparación de las propiedades de los agentes precipitantes

PROPIEDAD	Na(OH)	Ca(OH) <sub>2</sub>	Mg(OH) <sub>2</sub>
Peso molecular	40	74.1	58,3
Contenido hidróxido (%)	42,5	45,9	58,3
Calor de la solución (kg-cal/mol)	9,94	2,79	0,0
Solubilidad (g/100mL H <sub>2</sub> O)	42,0 <sup>A</sup>	0,185 <sup>A</sup>	0,0009 <sup>B</sup>
pH máximo reactivo	14,0	12,5	9,0
Peso de equivalencia	1,47	1,27	1,0
Punto de fusión	16,0	0,0 <sup>D</sup>	0,0 <sup>E</sup>
Contenido de sólidos del lodo (%)	30,0	35,0	55,0
Densidad del lodo kg/m <sup>3</sup> (lb/ft <sup>3</sup> )	11300	1400	1600-17507
Tiempo de filtrado (hr)	7-8	7-9	1,5-2,0
Volumen del lodo m <sup>3</sup> /ton métrico	5,0	4,2	2,2

*Fuente: (Hoffland Environmental Inc, 2005).*

<sup>B</sup> Temperatura 18 °C

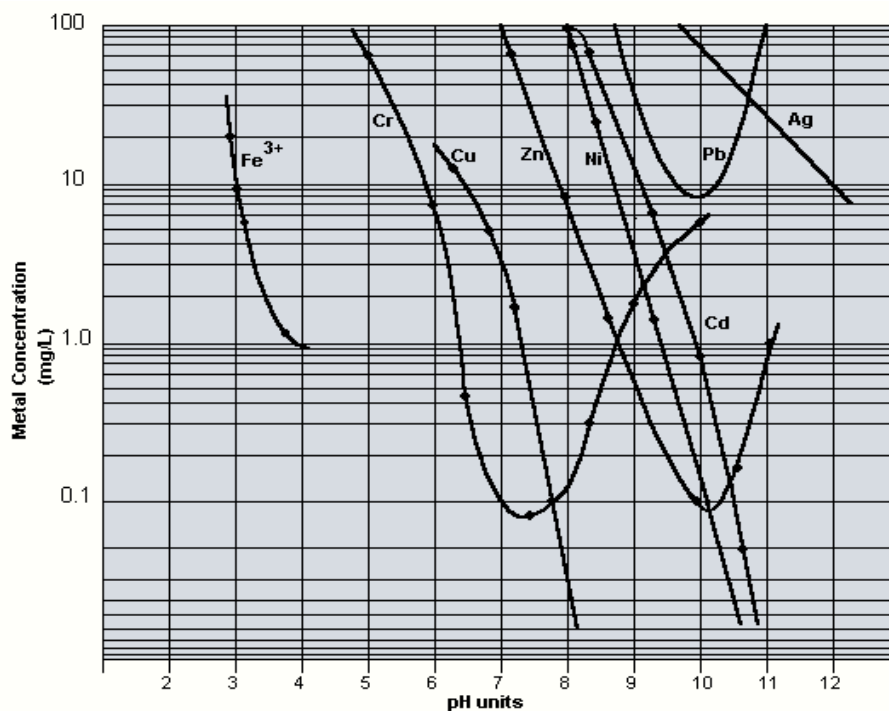
<sup>C</sup> 50% solución

<sup>D</sup> 30% lodos

<sup>F</sup> Lodos de un plato y marco de un filtro prensa

<sup>G</sup> Consiste de hidróxido de metal y cal

En la figura 6, se muestra una curva de solubilidad de los metales pesados comunes y su solubilidad vs el pH de la solución. Las líneas que se muestran son las curvas teóricas de solubilidad de los diferentes metales y una forma característica de estas líneas es la forma en “U” que tienen, denotando un mínimo de solubilidad en un valor específico de pH.



**Figura 6.** Solubilidad de hidróxidos metálicos en función del pH

**Fuente:** (Hoffland Emnvironmental, 2005).

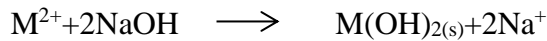
Si se le pone atención al plomo, se puede observar que a pH de valor 10 tiene una solubilidad de 20 mg/L.

Las reacciones que se llevan a cabo de los metales al estar en contacto con los hidróxidos. se van a obtener hidróxidos metálicos no solubles y a que intervalo de pH se obtendrán

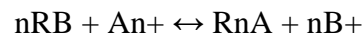


hidróxidos metálicos solubles (escenarios con un pH muy ácido). M simboliza el metal a precipitar (Hoffland Environmental Inc, 2005).

### **Hidróxido de sodio**



**Intercambio iónico** El intercambio iónico consiste en intercambiar componentes iónicos no deseados del agua residual por iones (cationes o aniones) más aceptables:



Los iones eliminados se retienen en una resina de (naturales o sintéticas), para ser liberados más tarde en un líquido de regeneración. La concentración de SS debe de ser baja (Brown *et al.*, 1998).



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 LUGAR DE EJECUCIÓN

El presente trabajo de investigación se ejecutó en el Laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA – Puno. Que está a 3814 m.s.n.m. y la temperatura ambiental aproximada de 13 a 15°C respectivamente.

El área de estudio se ubicó en la bahía interior de la ciudad de Puno.

#### **Ubicación:**

Provincia : Puno

Distrito : Puno

Departamento : Puno

Dirección : Av. Sesquicentenario N° 1150

#### 3.2 MATERIALES

##### **Materiales de laboratorio**

- Soporte de embudo.
- Equipos de filtración,
- Papel filtro Waltman N°40.
- Termómetro digital KT-300 HALTEN.
- Vasos de precipitado de 500mL.
- Matraz de Erlenmeyer de 500 mL.
- Pipetas de 50,20 y 5 mL.
- Fiolas de 250mL.
- Probeta de 100mL.





### **Equipos de laboratorio**

- Balanza analítica.
- Mufla eléctrica.
- Agitador magnético.
- Cronometro.
- pH- metro digital de calibración HANNA INSTRUMENTS, HI 931 MICROPROCESADOR con sensibilidad 0,1.

### **Reactivos**

- Ácido Clorhídrico.
- Hidróxido de sodio (0,05M)
- Agua destilada.

### **Materiales**

- Muestra de aguas residuales de la ciudad de Puno.
- Piedra puzolana molida.

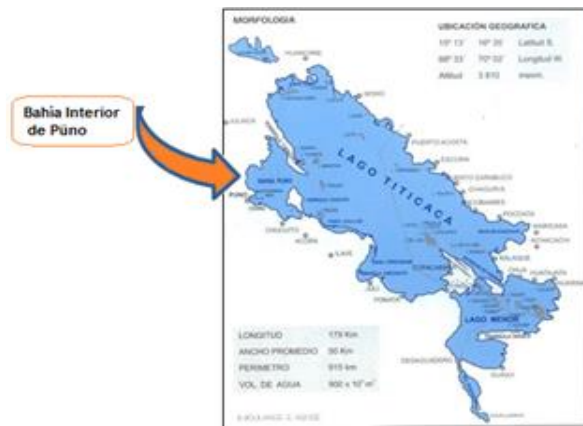
## **3.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

### **3.3.1 Muestreo de las aguas residuales de la ciudad de Puno**

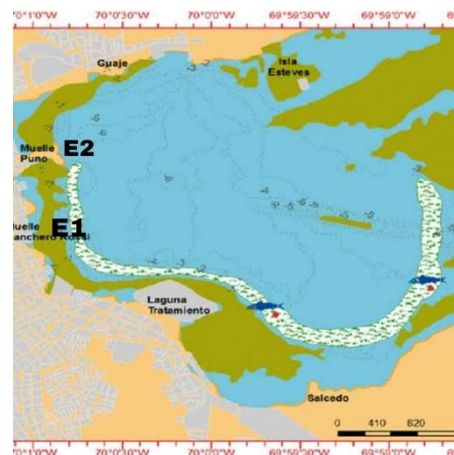
Se han tomado las muestras de las aguas residuales en 2 puntos diferentes, en el puerto muelle salida de lanchas hacia las islas y el otro lugar a un costado del Puerto Luis Banchemo Rosi, para los análisis químicos se colectaron un total de 6 muestras, para cada una se colectó 200 cm<sup>3</sup> en recipientes de polietileno, conservándose en refrigeración para su traslado al laboratorio.

**Tabla 4.** Ubicación geográfica de las estaciones de muestreo

Estación	Descripción
E-1	Bahía Interior de Puno en el Lago Titicaca, a en dirección salida de lanchas a las islas (puerto muelle). Con coordenadas 15°50'06''S 70°00'52''O/-15.835079,-70.014443.
E-2	Bahía Interior de Puno en el Lago Titicaca, (Puerto Luis Banchemo Rosi). Con coordenadas -15.845174892740143, -70.01518886547493



**Figura 7.** Bahía interior de Puno



**Figura 8.** Puntos de monitoreo bahía interior

### 3.4 CONCENTRACIÓN DE PLOMO EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE PUNO

#### 3.4.1 Caracterización de las aguas residuales de la ciudad de Puno contaminadas con plomo

Las aguas residuales de la ciudad de Puno se han caracterizado a través del análisis químico, determinándose la cantidad de plomo de acuerdo a la Ley General de Aguas D.L. N° 17752 y sus modificaciones al reglamento según el Decreto Supremo 004-2017-MINAM. (Anexo A), donde la cantidad de plomo supera los límites máximos permisibles, de acuerdo a la siguiente tabla 5.

**Tabla 5.** Valores límite de las aguas residuales destinadas a la descarga con plomo en ríos y lagos

Metal	Unidad de Medida	Límites máximos permisibles de descarga en los ríos y lagos D.S. 004-2017-MINAM
Plomo	mg/L	0,0025

*Fuente: D.S. 004-2017-MINAM aprueban Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para agua.*

#### 3.4.2 Análisis químicos de las aguas residuales de la ciudad de Puno

Análisis espectroscópico efectuado de las aguas residuales de la ciudad de Puno, la cantidad de plomo que supera los límites máximos permisibles.

**Tabla 6.** Análisis químico de las aguas residuales

Metal	Unidad de Medida	Análisis de las aguas residuales de la bahía interior Promedio de 6 muestras de Pb (mg/L)	Límites máximos permisibles de descarga en los ríos y lagos D.S. 004-2017-MINAM Pb (mg/L)
Plomo	mg/L	0,120	0,0025



### **3.5 PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL pH Y CONCENTRACIÓN DE PUZOLANA PARA LA ADSORCIÓN DE PLOMO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE PUNO, POR EL MÉTODO DE AGITACIÓN MAGNÉTICA**

El proceso experimental para determinar la cantidad de plomo adsorbido con piedra puzolana activada, consistió en 2 pasos fundamentales, los cuales son:

#### **3.5.1 Activación de la puzolana**

La activación consistió en quemar la puzolana en una mufla y se realizó con la finalidad de proporcionarle mayor porosidad al material adsorbente, en consecuencia, aumentar la superficie específica de adsorción.

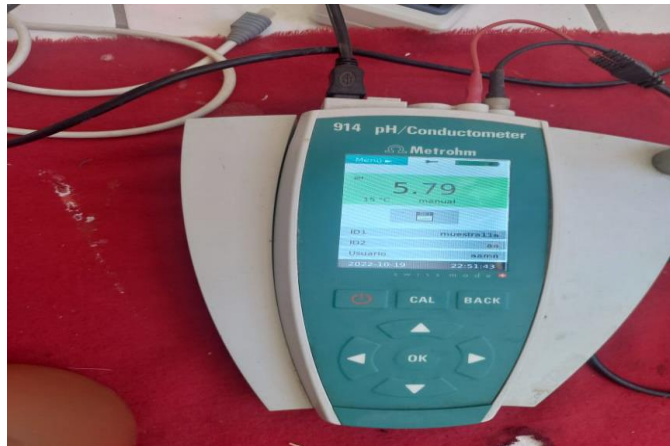
La temperatura de activación se determinó por medio de una mufla a 800 °C durante 1 hora, luego se lavó con HCl para eliminar las cenizas que pudiera tener la puzolana quemada y se enjuagó con agua destilada.

En ese sentido, la temperatura de activación a la cual se obtengan los mayores contenidos de  $Al_2O_3$  en la puzolana activada será la temperatura óptima. Por ello, de esta manera también se podrán determinar los rangos superior e inferior de activación, los cuales indican que si se sobrepasa cierta temperatura se sucede una cristalización de la estructura de la arcilla activada perdiendo su nivel de activación y si por lo contrario la temperatura es muy baja no se logra la deshidroxilación suficiente, siendo muy pobre entonces el nivel de actividad puzolánica (Talero, 2014).

#### **3.5.2 Agitación magnética**

3. Primero se prepararon 6 muestras de agua residual de la bahía interior de la ciudad de Puno que contiene plomo, en vasos de precipitación con 150mL de la muestra a tratar.

4. A cada vaso de precipitado que contenía las muestras se agregaron 0.1865 a 0,7579g de puzolana activada, cada vaso al inicio tenía un pH de 5,79 lo cual nos indicaba muestras ácidas.

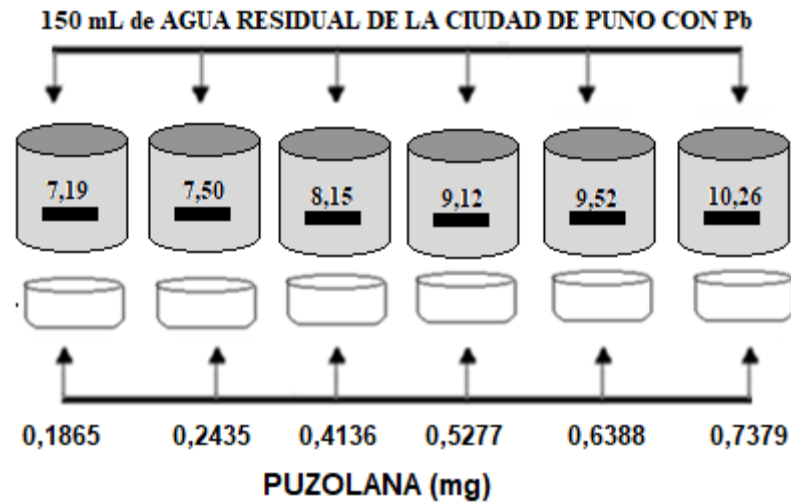


*Figura 9. pH al inicio de la agitación magnética*

5. Con el fin de trabajar en medio básico indicado por la literatura, se procedió al ajuste del pH de cada muestra con NaOH, para provocar un desplazamiento del equilibrio químico que favorezca la solubilidad.

6. El pH para la precipitación del plomo en cada muestra varió de un pH de 7,19 a 10,26. La cantidad de NaOH agregada fue en forma aleatoria, lo importante era que las diferentes muestras tuvieran un medio básico.

7. Para la evaluación de la concentración de plomo, se tomó 150mL de la muestra con puzolana activada en frascos de Erlenmeyer con agitación constante a 500 rpm a pH de 7,19 a 10,26, tal como se muestra en la figura, por un tiempo de 10 minutos para la primera experiencia, luego se fue variando el tiempo de hasta 60 minutos para la última prueba con agitación magnética a temperatura constante. Al cabo de este tiempo, cada muestra fue filtrada con papel filtro Waltman N°40. Las concentraciones finales de plomo de las aguas residuales de la ciudad de puno, se determinaron por absorción atómica, cuyos certificados desarrollados por el laboratorio RH LAB S.A.C de la ciudad de Juliaca (Anexo D).



**Figura 10.** Número de pruebas con agitación magnética

Cada solución se filtró para recuperar la puzolana. La puzolana activada y la solución filtrada se guardaron en recipientes tapados.

**Tabla 7.** Valores de pH y puzolana activa

Nº de Pruebas	Puzolana Activada (mg)	pH
1	0,1865	7,19
2	0,2435	7,50
3	0,4136	8,15
4	0,5277	9,12
5	0,6388	9,52
6	0,7379	10,26

El pH es una de las variables más importantes en el proceso de remoción de plomo de igual manera, la cantidad de puzolana activada que cumple un papel muy importante en el proceso de remoción a través de la adsorción, pues afecta el equilibrio de hidrólisis por la adición de puzolana activada, además que esta adición causa un aumento automático del pH.



El pH junto a la cantidad de puzolana activada son factores que más influyen en el proceso de adsorción. Su influencia es determinante ya que afecta a todos los equilibrios de hidrólisis que se producen, como consecuencia de la adición de puzolana activada.

### **3.6 MODELO MATEMÁTICO PARA EL PROCESO DE ADSORCIÓN DE PLOMO CON PUZOLANA ACTIVADA POR EL PROCESO DE AGITACIÓN MAGNÉTICA Y SUS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN**

#### **3.6.1 Desarrollo del modelo matemático y su isoterma de adsorción**

Para el desarrollo del modelo matemático, se ha utilizado el programa estadístico Statgraphics Centurión XVI, cuyo método estadístico (ANOVA) analiza y desarrolla toda la metodología planificada en la investigación, llegando a determinar la significancia de cada una de las variables, lo cual constituye un caso especial de regresión lineal para dos variables:

$$N = 2^k$$

Donde:

N = Número total de experimentos

k = Número de variables

En nuestro caso, como hemos mencionado, se realiza un experimento que depende de tres factores y se plantea dos niveles, por lo que se requerirán:

Número de experimentos:  $N=2^k = 2^2 = 4$  experimentos.

Cuya resolución será la siguiente:

$$Y=B_0+B_1X_1+B_2X_2 + B_3X_1X_2$$

Donde:

Y = Variable respuesta rendimiento

X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> = Dos variables codificadas de entrada: pH y tiempo de adsorción.

$X_1X_2$  = Interacciones entre las dos variables principales

Primero hallaremos los valores de  $X_1$  y  $X_2$  en función a las variables de entrada del proceso y luego los valores de  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  (estimadores de los coeficientes de regresión) en función a la variable respuesta Rendimiento (Y).

### 3.6.2 Identificación de las variables de trabajo

En el presente trabajo de investigación se ha efectuado la optimización eficaz del proceso, encontrando los rangos de trabajo más óptimos de dicho proceso, se trabajó en función a los factores y niveles, para lo cual se eligió 2 variables de trabajo para determinar la cantidad de zinc que será adsorbida con el carbón activado y estas son cantidad de puzolana como coagulante y el pH, tal como se indican en la siguiente tabla.

**Tabla 8.** Identificación de variables y niveles de operación

FACTOR	VARIABLES	UNIDAD	NIVEL INFERIOR (-)	NIVEL SUPERIOR (+)
pH	$X_1$	Escalar	7,19	10,26
Cantidad de puzolana	$X_2$	mg	0,1865	0,7379

### 3.6.3 Rendimiento de recuperación de plomo (Pb)

Para determinar la variable respuesta del diseño factorial se procede a cuantificar el porcentaje de rendimiento de plomo recuperado de la siguiente manera:

$$\% \text{ RENDIMIENTO} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \%$$

Dónde:

$\%R$  = Rendimiento de Pb

$W_1$  = Peso inicial de Pb

$W_2$  = Peso final de Pb





**Tabla 9.** Cálculo del % de rendimiento para el diseño factorial del Pb

<b>N° DE PRUEBA</b>	<b>W<sub>1</sub> (mg)</b>	<b>W<sub>2</sub> (mg)</b>	<b>RENDIMIENTO %</b>
1	0,120	0,0145	87,86
2	0,120	0,0145	87,85
3	0,120	0,0146	87,79
4	0,120	0,0147	87,75
5	0,120	0,0148	87,67
6	0,120	0,0149	87,58

En esta tabla 9 se observa la cantidad inicial de plomo existente en las aguas residuales de la Bahía interior de la ciudad de Puno ( $W_1$ ), de igual manera se observa las diferentes cantidades del rendimiento del proceso (%) y el cual queda reflejada en la cantidad resultante de plomo luego del proceso ( $W_2$ ).

**Tabla 10.** Matriz del diseño factorial 2<sup>2</sup>=4 para el Pb

N° De Prueba	COMBINACION DE NIVELES		Rendimiento (%)
	X <sub>1</sub> (pH)	X <sub>2</sub> (puzolana) (mg)	
	1	7,19	
2	10,26	0,1865	87,85
3	7,19	0,7379	87,79
4	10,26	0,7379	87,75
5	8,72	0,4622	87,67
6	8,72	0,4622	87,58

Con los valores de la tabla 10

se determinó el número de pruebas experimentales a realizar (combinando los valores máximo y mínimo de dos factores establecidos). Para un diseño 2<sup>2</sup> se tiene 4 pruebas experimentales.

### 3.6.4 Determinación de la isoterma de adsorción de los iones Pb<sup>2+</sup> según la isoterma de Langmuir

$$\text{Ecuación de Langmuir} \quad \frac{C_e}{\frac{x}{m}} = \frac{1}{KV_m} + \frac{C_e}{V_m}$$

$$\text{Forma lineal} \quad \frac{C}{q} = \frac{1}{b}C + \frac{1}{kb}$$

$$q = \frac{x}{m}$$

$$X = C_0 - C_e$$

Donde:

C<sub>0</sub>=Concentración de referencia

C<sub>e</sub>= Concentración en el fluido

x/m= Carga



$m$ = Masa del adsorbente

$x$ =Masa del adsorbato

$q$ = Cantidad adsorbida

Con el objetivo de determinar la isoterma según Langmuir, se utilizaron los siguientes datos:

**Tabla 11.** Valores de la cantidad de puzolana activada y la concentración de Pb recuperada

Masa puzolana activada (mg/L) Co	Concentración en el equilibrio de Pb (mg/L) Ce
0,1865	0,0145
0,2435	0,0145
0,4136	0,0146
0,5277	0,0147
0,6388	0,0148
0,7379	0,0149

**Tabla 12.** Resultados de la adsorción de Pb de las aguas residuales de la ciudad de Puno-Isoterma de Langmuir

Masa puzolana activada (mg/L) Co	Concentración en el equilibrio (mg/L) Ce	Eje X X=Co-Ce	Eje Y q=X/m	Eje X Ce	Eje Y Ce/q
0,1865	0,0145	0,172	0,1147	0,0145	0,1270
0,2435	0,0145	0,229	0,1144	0,0145	0,1275
0,4136	0,0146	0,399	0,1140	0,0146	0,1285
0,5277	0,0147	0,513	0,1140	0,0147	0,1290
0,6388	0,0148	0,624	0,1134	0,0148	0,1305
0,7379	0,0149	0,723	0,1113	0,0149	0,1339



$q$  = Concentración del adsorbato sobre la superficie del adsorbente.

$C_e$  = Concentración de iones plomo en el equilibrio presentes en la solución.

**Tabla 13.** Datos experimentales de adsorción de Pb con valores de  $1/C_e$  y  $1/q$  -Isoterma de Langmuir

Concentración en el equilibrio (mg/L)		$1/C_e$	$1/q$
Ce	$q=X/m$		
0,0145	0,1147	68,63	8,72
0,0145	0,1144	68,59	8,74
0,0146	0,1140	68,26	8,77
0,0147	0,1140	68,03	8,78
0,0148	0,1134	67,57	8,82
0,0149	0,1113	67,11	8,99

### 3.6.5 Determinación de la isoterma de adsorción de los iones $Pb^{2+}$ según Freundlich

Ecuación lineal de Freundlich: 
$$\text{Log } q = \frac{1}{n} \text{Log } C + \text{Log } K_d$$

**Tabla 14.** Valores para la Isoterma de Freundlich

$q=x/m$	C	Eje X	Eje Y
		Log C	Log q
0,1147	0,1865	0,1760	-0,7542
0,1144	0,2435	0,3010	-0,5213
0,1140	0,4136	0,5440	-0,2643
0,1140	0,5277	0,6532	-0,1849
0,1134	0,6388	0,7403	-0,1305
0,1113	0,7379	0,8129	-0,0899

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 CONCENTRACIÓN DE PLOMO EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE PUNO

##### 4.1.1 Caracterización de las aguas residuales de la ciudad de Puno contaminadas con plomo

Se caracterizó las muestras de las aguas residuales de la ciudad de Puno, a través de los análisis físico-químico, se tomaron un promedio de la muestra que fueron analizados en los laboratorios RHLAB S.A.C.-RH-M83-0417 de la ciudad de Juliaca (Anexo D).

**Tabla 15.** Resultados de las pruebas de recuperación de Pb de las aguas residuales de la ciudad de Puno

Metal	Unidad de Medida	Análisis de las aguas residuales de la ciudad de Puno	Límites máximos permisibles de descarga en los ríos y lagos
		Promedio de 6 muestras de Pb (mg/L)	D.S. 004-2017-MINAM Pb (mg/L)
Plomo	mg/L	0,0120	0,0025

De acuerdo a los datos de la tabla 15, se interpreta que de acuerdo al D.S. 004-2017-MINAM la cantidad de plomo en las aguas residuales debe ser de 0,0025 mg/L como límite máximo permisible para consumo humano, luego del análisis de las aguas residuales se obtuvieron como promedio de todas las pruebas un valor de 0,0120 mg/L, lo cual indica que excedió los valores máximos permitidos para consumo humano, lo que permitía efectuar la investigación de absorción de plomo.



## **4.2 PARÁMETROS ÓPTIMOS DE pH Y CONCENTRACIÓN DE PUZOLANA PARA LA ADSORCIÓN DE PLOMO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE PUNO, POR EL PROCESO DE AGITACIÓN MAGNÉTICA**

El proceso de adsorción depende del pH y de la concentración de puzolana activada agregada a cada muestra.

La influencia que ejerce el pH y la concentración de puzolana tienen una influencia determinante porque afecta a todos los equilibrios de hidrólisis que se producen, como consecuencia de la adición de catión metálico.

Otra de las causas por las que el pH es tan determinante en el proceso, es que la adición del catión metálico provoca un aumento automático del pH, tanto más alta sea la dosis de la concentración de puzolana es mayor sea la alcalinidad del agua.

Con objeto de establecer la influencia que el pH ejerce en el proceso de adsorción del plomo de las aguas residuales de la ciudad de Puno, se llevó a cabo el modelo matemático a través de la parte experimental y luego la parte estadística.

Los parámetros utilizados fueron los siguientes: pH 10.26 con lleva para las aguas residuales a una velocidad de agitación de 500 rpm y tiempo de 40 min con un  $R^2=88,51\%$ .

La tabla 16 muestran el porcentaje de recuperación de plomo, luego del proceso de adsorción de plomo con puzolana activada con un porcentaje de recuperación de 89,3163% para una dosis de puzolana de 0,5277 mg, lo cual corresponde a una recuperación de 0,0128 mg y un pH de 10,26.

**Tabla 16.** Resultados de la concentración de Pb recuperado de la muestra tratada con puzolana activada

N° de Pruebas	pH	Puzolana Activada (mg/L)	Concentración de Pb inicial (mg/L)	Concentración de Pb recuperado (mg/L)	RENDIMIENTO %
1	7,19	0,1865	0,12	0,0130	89,1069
2	10,26	0,2435	0,12	0,0137	88,5813
3	7,19	0,4136	0,12	0,0126	89,4519
4	<b>10,26</b>	<b>0,5277</b>	<b>0,12</b>	<b>0,0128</b>	<b>89,3163</b>
5	8,72	0,6388	0,12	0,0012	89,2118
6	8,72	0,7379	0,12	0,0012	89,2118

El rendimiento del Pb de 89,3163, resultado que se asemejan a los valores encontrados en el estudio realizado por Cosme et. Al (2017) remoción con Policloruro de aluminio de 88,36%, presentando mayor rendimiento con puzolana activa.

## 4.2 MODELO MATEMÁTICO PARA EL PROCESO DE ADSORCIÓN DE PLOMO CON PUZOLANA ACTIVADA POR EL PROCESO DE AGITACIÓN MAGNÉTICA Y SUS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

### 4.3.1 Modelo matemático

El modelo matemático se ha demostrado a través de los resultados experimentales y de acuerdo al modelo estadístico Statgraphics Centurión XVI, se ha demostrado que la variable más importante es la concentración de puzolana activada, seguida del pH.

El valor de la concentración de puzolana activada es de 0,5277 mg/L. El coeficiente de correlación obtenido ha sido  $R^2 = 88,51\%$  y el modelo matemático hallado es:

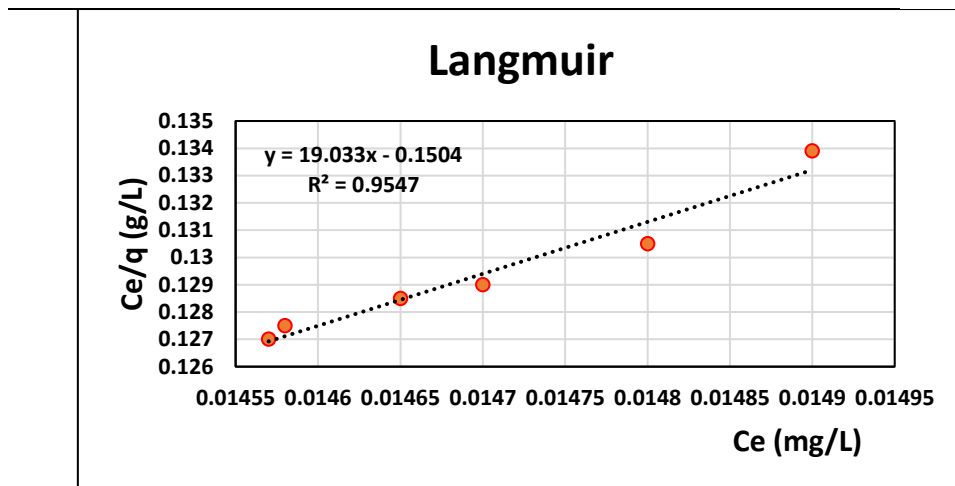
$$Y = 89,6007 - 0,1077 * \text{pH} + 0,108 * \text{Concentración puzolana}$$

### 4.3.2 Determinación de la isoterma de adsorción de los iones $Pb^{2+}$ según la isoterma de Langmuir

Los valores obtenidos para el metal plomo, tanto para isoterma de Langmuir como para la isoterma de Freundlich y las curvas experimentales obtenidas se presentan a continuación:

**Tabla 17.** Resultados del análisis estadístico de la isoterma de Langmuir  $Ce/q$  vs  $Ce$

Metal	q (promedio) g)	b (L/mg)	R <sup>2</sup>	K
plomo	0,1136	$5,25 \times 10^{-2}$	0,9547	-78,96



**Figura 1.** *Isoterma con puzolana según Langmuir  $Ce/q$  vs  $Ce$*

Ecuación de la recta de acuerdo a la figura 11, isoterma de Langmuir

$$Y = 19,033X - 0,1504$$

$$R^2 = 0,954$$

$$Y = mX + b$$

Donde:

$$\text{Pendiente} = 19,033$$

$$\text{Ordenada} = 0,1504$$



Se encuentra el valor de b:

$$1/b = m$$

$$1/m = b$$

$$1/(19,033) = b$$

$$b=5,25 \times 10^{-2}$$

Se encuentra el valor de k:

$$1/kb = -0,1504$$

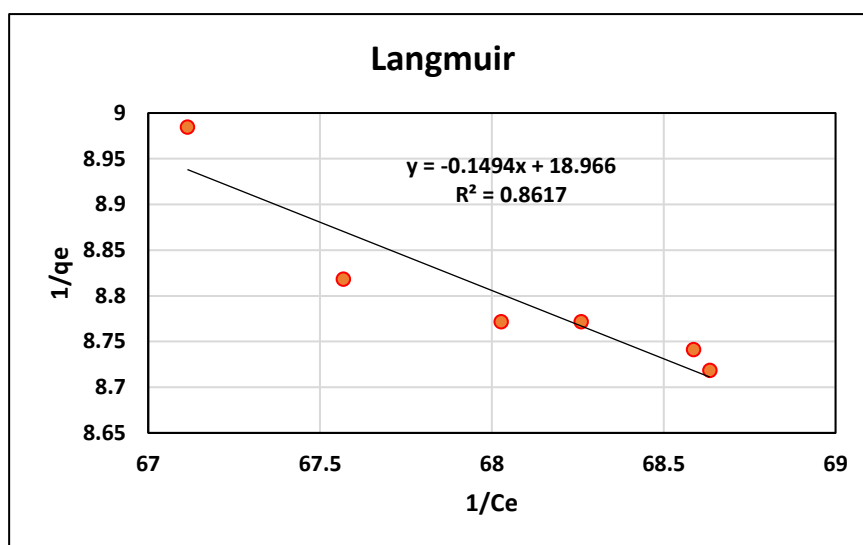
$$1/-0,1504b = k$$

$$k = 1/(-0,1504)(5,25 \times 10^{-2})$$

$$k=-78,96$$

**Tabla 18.** Resultados del análisis estadístico de la isoterma de Langmuir  $1/q_e$  Vs  $1/C_e$

Metal	q (promedio) (g)	1/n (b) (L/mg)	R <sup>2</sup>	Kd
Plomo	0,1136	-0,6693	0,8617	$7,877 \times 10^{-3}$



**Figura 2.** Isoterma con puzolana según Langmuir  $1/q_e$  vs  $1/C_e$



La figura 12 corresponde al modelo de Langmuir, para lo cual se utilizó la ecuación siguiente:

**Forma lineal de Langmuir**  $C/q = 1/b C + 1/kb$

$$q = X/m$$

$$X = Co - Ce$$

Donde:

Co=Concentración de referencia

Ce= Concentración en el fluido

x/m= Carga

m= Masa del adsorbente

x=Masa del adsorbato

q= Cantidad adsorbida

Con el objetivo de determinar la isoterma según Langmuir, se utilizaron los siguientes datos:

Ecuación de la recta de acuerdo a la figura 6, isoterma de Langmuir

$$Y = -0,1494X + 18,966$$

Donde:

Pendiente = -0,1494

Ordenada = 18,966

Se encuentra el valor de b

$$1/b = m$$

$$1/b = m$$

$$1/(-0,1494) = b$$

$$b = -6,693$$

Se encuentra el valor de k

$$\frac{1}{kb} = 18,966$$

$$1/18,966 * b = k$$

$$k = 1/(18,966)(-6,693)$$

$$k=7,877 \times 10^{-3}$$

### 4.3.3 Determinación de la isoterma de adsorción de los iones $Pb^{2+}$ según la isoterma de Freundlich

Ecuación lineal de Freundlich:  $\text{Log } q = 1/n \text{ Log } C + \text{Log } K_d$

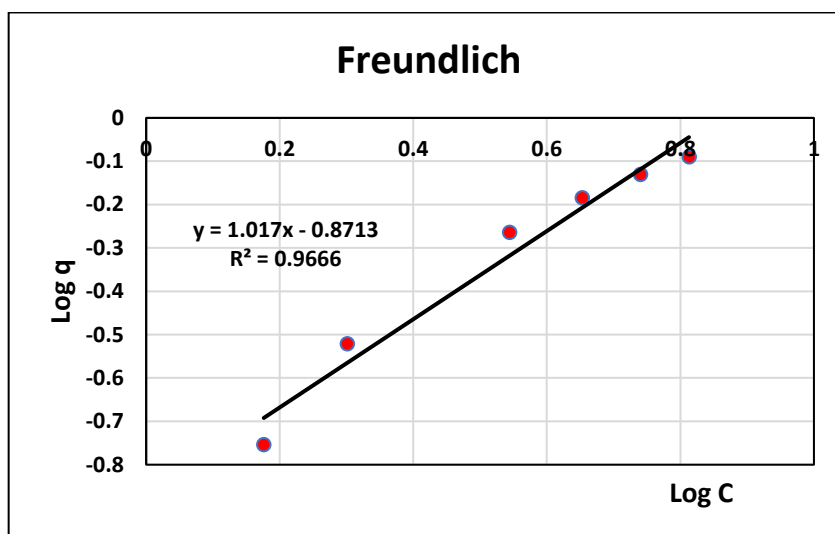


Figura 3. Isotherma según Freundlich

**Ecuación de la recta**

$$\text{Log } q = 1/n \text{ Log } C + \text{Log } K_d$$

$$y = 1,017 X - 0,8713$$

Donde:

q = Cantidad adsorbida.

C=Ce= Cantidad de líquido.

$K_d$  = Fuerza de unión.

➤ De acuerdo a la ecuación de la recta

Pendiente=1,017

Ordenada=- 0,8713

$$\text{Valor de } n: \quad 1/n = m$$

$$1/m = n$$

$$1/1,017 = n$$

$$n=0,9832$$

$$\text{Valor de } \log Kd = -0,8713$$

$$Kd=0,1345$$

**Tabla 19.** Resultado del análisis estadístico de la isoterma de Freundlich Log q vs Log C

Metal	q (promedio) (g)	1/n (b) (L/mg)	R <sup>2</sup>	Kd
Plomo	0,1136	0,9832	0,9666	0,1345

Generalmente, la adsorción y movilidad de los metales pesados en sedimento se relaciona a través de un coeficiente de distribución (Kd) que se define por la distribución de las concentraciones del adsorbato:

$$Kd = Cs/Ce$$

Kd, es igual al inverso del intercepto de la ecuación de la isoterma de Langmuir, como un indicador de la extensión de la adsorción, o como una medida relativa de la afinidad del adsorbente por el adsorbato.

La isoterma de Freundlich, modelo empírico diseñado para ajustar los datos de adsorción que no se ajustan a los modelos teóricos de Langmuir, considera una relación exponencial entre la cantidad de adsorbato adsorbida (X) y la concentración en el equilibrio (Ce). La ecuación, en su forma linealizada es:

$$\log X = \log k + n \log Ce$$

donde Kd y n son constantes empíricas. Una gráfica de log X vs log Ce da una línea recta.



**Tabla 20.** Resultados de los análisis estadísticos de las isothermas de Langmuir y Freundlich

<b>Modelo Isotérmico</b>	<b>q (promedio) (g)</b>	<b>1/n (b) (L/mg)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Kd</b>
<b>Langmuir</b>	0,1136	5,25x10 <sup>-2</sup>	0,9547	-20,05
<b>Freundlich</b>	0,1136	0,9832	0,9666	0,1345

En el trabajo de investigación se utilizó dos modelos de isothermas de adsorción, determinándose que modelo que rige el proceso de adsorción, es el modelo de pseudo-segundo orden que permite describir el comportamiento del fenómeno de adsorción con piedra puzolánica activada, porque al evaluar el modelo propuesto por Ho, los valores de correlación arrojados son superiores a 0,95 indicando que los iones plomo se adsorben en más de un sitio activo con la puzolana activada, la tabla 20 muestra la evaluación de ambas isothermas y sugiere que la isoterma de Freundlich ajusta mejor los datos experimentales, ya que su coeficiente de determinación fue más alto, lo cual nos permite asumir que el proceso cumple con el pseudo segundo orden, cuyo valor de R<sup>2</sup> que es mayor al valor R<sup>2</sup> de la isoterma de Langmuir.



## V. DISCUSIÓN

Farro (2015) en su trabajo hizo una precalcificación a 800°C y luego un lavado con HCl al 10%, para conseguir la ceniza pretratada (CVP). Se utilizó la metodología de la fusión alcalina para la síntesis de las zeolitas, usando proporciones en masa de NaOH/CVP = 0,5/1; 1,0/1; 1,5/1; 2,0/1 y 2,5/1 e identificando a las zeolitas resultantes como Z05, Z10, Z15, Z20 y Z25, respectivamente. Logrando con 2,0 g, remover el 99,9% del  $Pb^{2+}$  contenido en 100 mL de su solución.

En este trabajo se calcinó la puzolana a 800 °C y luego se lavó con HCl para eliminar la ceniza donde el pH fue ácida y luego se lavó con NaOH para llevar la muestra a un pH alcalino que varió de 7,19 a 10,26 logrando una recuperación de plomo de 0,0128 mg/L a un pH de 10,26, tiempo de 40 min y una concentración de puzolana activada de 0,5277 mg/L

Rodríguez (2016) los resultados obtenidos fueron que la remoción en miligramos por gramo del material zeolítico en su estado natural, sigue el orden siguiente:  $Pb^{2+} > Cu^{2+} = Zn^{2+} > Mn^{2+}$ , luego del proceso de la transformación hidrotérmica del material volcánico, se obtuvo el material zeolítico, el cual tiene una alta capacidad de intercambio catiónico (400 meq/100g). La formación de este producto con un producto químico como es el NaOH 2,5 M a 100 °C y durante 8 horas, la zeolita tiene una buena capacidad de intercambio para los cationes  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  y  $NH_4^+$ .

Nuestra investigación demostró que durante un tiempo de 40 min la puzolana activada tiene una buena capacidad de intercambio con el catión  $Pb^{+2}$

Valdez (2018) investigó la capacidad de adsorción de la zeolita natural para la eliminación de iones de metales pesados  $Cu^{2+}$  y  $Pb^{2+}$ . Los parámetros como el pH inicial (3-6), tamaño de partícula (595  $\mu m$ -74 $\mu m$ ), cantidad de adsorbente (1-4 g) concentración inicial (50-400 mg/L) y tiempo de contacto (15-120 min), fueron evaluados manteniendo



una temperatura constante de 25 °C y velocidad de agitación de 150 rpm. De acuerdo a la investigación se determinó que la remoción del plomo fue entre el 30 al 100%, y cuyo valor óptimo para la remoción de Pb; cantidad de adsorbente: 4g y tiempo de remoción 30min, tamaño de partícula 74 $\mu$ m.

En nuestro caso se determinó que la remoción de plomo fue del 89,3163% y cuyo valor de remoción fue de 0,0128 mg/L con un coeficiente de rendimiento de  $R^2=88,541\%$ .



## VI. CONCLUSIONES

- Las condiciones de utilización de la puzolana activada para la recuperación de plomo proveniente de las aguas residuales de la ciudad de Puno, se tomaron muestras en dos lugares diferentes, en el puerto muelle salida de lanchas hacia las islas con coordenadas  $15^{\circ}50'06''S$   $70^{\circ}00'52''O$  /  $-15.835079, -70.014443$  y el otro lugar Puerto Luis Banchemo Rossi con coordenadas  $-15.845174892740143, -70.01533370474623$ , luego del proceso de adsorción con puzolana activada, la concentración promedio de Pb recuperado es de  $0,0128$  mg/L, con  $89,31\%$  de rendimiento de recuperación. La puzolana requiere un tratamiento previo, para que su adsorción sea mejor. También para su activación el calor que llega a  $800^{\circ}C$  con un tiempo de activación de una hora.
- Se utilizaron 6 vasos de precipitado conteniendo aguas residuales de la ciudad de Puno, los cuales contenían plomo, para determinar los parámetros físico-químicos en el proceso de adsorción con puzolana activada se utilizó el proceso de agitación magnética con velocidades de agitación óptima de  $500$  rpm con un tiempo de  $10$  a  $60$  minutos y con un pH que vario de  $7,19$  a  $10,26$  para cada proceso, siendo el factor más importante la concentración de puzolana activada, utilizando HCl para remover las cenizas, luego NaOH como corrector del pH en cada caso para que cada muestra tenga un pH básico, siendo el mejor resultado la prueba 6 con un resultado óptimo de  $pH=10,26$ , un tiempo adsorción de trabajo de  $60$  min, concentración de puzolana activada de  $0,5277$  mg/L.
- El coeficiente de correlación obtenido fue de  $R^2 = 88,51\%$  para las aguas residuales de la ciudad de Puno, lo cual nos indica que el proceso de adsorción de plomo con puzolana activada es adecuado, obteniéndose el siguiente modelo matemático.

$$Y = 89,6007 - 0,1077 * pH + 0,108 * \text{Concentración puzolana}$$





Las isotermas se obtuvieron con los siguientes resultados.

Resultados de los análisis estadísticos de las isotermas de Langmuir y Freundlich

Modelo Isotérmico	q (promedio) (g)	n (b) (L/mg)	R <sup>2</sup>	Kd
Langmuir	0,1136	5,25x10 <sup>-2</sup>	0,9547	-20,05
Freundlich	0,1136	0,9832	0,9666	0,1345



## VII. RECOMENDACIONES

- Uno de los problemas en el tratamiento de agua para su mejoramiento es el costo, ya que la piedra puzolana existe en grandes cantidades y con sus propiedades físicas y químicas se recomienda investigar más sobre su estudio como adsorbente natural.
- La piedra puzolana se puede utilizar como posible catalizador para el blanqueado de aceites lubricantes, ensayos en filtración y craking del petróleo. Según la “Enciclopedia de Tecnología Química”.
- Se recomienda proponer un mecanismo viable para la reutilización del adsorbente, con el fin de aprovechar al máximo las propiedades de la puzolana activada y así seguir incentivando las costumbres del cuidado al medio ambiente, además como materia prima es barata y existe en cantidades en nuestra región.
- Las Entidades Públicas de la Región de Puno tienen la responsabilidad de evitar la contaminación de la Bahía interior del Lago Titicaca, por lo que deben establecer programas de control, para evitar la liberación de estos contaminantes a través de trabajos de recuperación de las aguas residuales.
- La Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano debe poner en conocimiento del Gobierno Regional, Municipalidad departamental y el Proyecto Especial Lago Titicaca (PEBLT) de los trabajos de investigación sobre recuperación de metales pesados que han sido evaluados en los trabajos de investigación de nuestra facultad.



## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abe M. (1982). Oxides and hydrous oxides of multivalent metals as inorganic ion exchange materials. Boca Raton, Fl, EUA: CRC Press,
- Ambe, S. (1989). Adsorption of No-carrier-added  $^{119}\text{Sb(V)}$  ions onto metal oxide and hydroxide surfaces from aqueous solutions. *Radiochim. Acta.* 46, 145-150,
- Amézquita G. Héctor. (2010). Modificación de la Capacidad Adsorbente de Fibras de Carbón Activado para la Eliminación de Metales Pesados. (*Tesis de pregrado*). Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- ASTM C 618, (1994). "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in portland Cement Concrete," Annual Book of ASTM Standards.
- Brown, T., Lemay, H., Bursten, B. (1998) *Química La Ciencia Central*. (7ma edición) Prentice Hall: México.
- Cosme M. O. Zevallos O. E. (2017). Influencia del tipo y concentración de coagulante en la remoción de plomo de una solución acuosa. (*Tesis de pregrado*). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- El-Hammari L, Laghizil A, Saoiabi A, Barboux P, Meyer M, Brandes S, Guilard R. (2008). Some factors affecting the removal of lead (II) ions from aqueous solution by porous calcium hydroxyapatite: Relationships between surface and adsorption properties. *Adsorp. Sci. Technol.* 24, 507-516.
- Hoffland Emnvironmental Inc. (2005). *Hydroxide precipitación*.
- Farro Pérez Nelson W., Wilson Reyes Lázaro, Juan Díaz Camacho, Jorge Mendoza Bobadilla, Betty Chuquimango Infantes, Carlos Araujo Yaipén<sup>6</sup> (2015). Influencia de la proporción de hidróxido de sodio a cenizas volantes en la obtención de zeolitas



para purificar efluentes acuosos contaminados con metales pesados. - Universidad Nacional de Trujillo.

Gebremedhin Haile Tesfaalem. (2002). Remoción de metales pesados del agua por mineral neolítico químicamente modificado mercurio como un caso particular. (*Tesis de pregrado*). Universidad Autónoma del Estado de México, México.

Granados Correa Francisco, Juan Serrano Gómez y Juan Bonifacio Martínez (2010). Síntesis y caracterización de materiales inorgánicos para ser empleados como adsorbentes de metales tóxicos y de interés nuclear. Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México.

Laidler K, Meiser J. (2003). Fisicoquímica, Nueva York, EUA: Continental, Erdogan, Marín A. B. P, J. F. Ortuño, M. I. Aguilar, V. F. Meseguer, J. Sáez, and M. Lloréns, "Use of chemical modification to determine the binding of Cd(II), Zn(II) and Cr(III) ions by orange waste," *Biochem. Eng. J.*, vol. 53, no. 1, pp. 2-6, Dec. 2010

Mejía G. (2006). *Aproximación teórica a la Biosorción de metales pesados por medio de microorganismos*. Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia, 77-99.

Meral, Cagla (2004). Use of perlite as a pozzolanic addition in blended cement production, Tesis de grado para maestro de ciencia en ingeniería civil, escuela de ciencias naturales y aplicadas de la universidad técnica del medio este Turquía.

Miranda R. Lilia. (2012). *bioadsorbente a partir de la cascara de la tuna (Opuntia ficus - indica)* "para la adsorción de Pb<sup>2+</sup>". Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.

Morón (2018). Tema III. Adsorción y Catálisis. Texto de Fisicoquímica Copyright: ©

All Rights Reserved



- Muñoz T. María C. (2007). Remoción De Metales Pesados En Aguas Residuales Utilizando Una Macrófita Acuática (*Eleocharis Acicularis*) Muerta. (*Tesis de pregrado*). Universidad Autónoma de Querétano, México.
- Okeola FO, Odebunmi EO. (2010). Comparación de los isotérmicos de Freundlich y Langmuir para la adsorción de azul de metileno por carbón activado derivado de residuos agrícolas. *Adv. Reinar. Biol.* 4(3):329-335.
- Ordoño Bellido José Alberto. (2020). Remoción de cobre Cu (II) y arsénico As (v) de aguas residuales de mina, por adsorción con zeolita natural en proceso batch. (*Tesis de pregrado*). Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Orozco Gavina, C.A. Triviño Cabrera C.C. Manrique Lozada L, (2004) Star-up a UAB Reactor for domestic wastewater treatment in Andean-Amazonian Conditions, *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 10(2), 170-185.
- Panca Pacompia Ornelia. (2016). “remoción del fluoruro en agua potable por precipitación - floculación con policloruro de aluminio y lechada de cal. (*Tesis de pregrado*). Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Paredes Doig Ana Lucia. (2011). Estudio de la adsorción de compuestos aromáticos mediante carbón activado preparado a partir de la cascara de castaña. (*Tesis de pregrado*). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima.
- Pomalaza Bacilio F. Mashyory R. Victoria. (2016). Optimización del método de coagulación-floculación para la remoción de arsénico de fuentes de agua potable empleando sulfato de aluminio tipo A. (*Tesis d pregrado*). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Qureshi, AS, Hussain, MI, Ismail, S. y Khan, QM (2016). Evaluación de la acumulación de metales pesados y los posibles riesgos para la salud en hortalizas regadas con aguas residuales tratadas. *Chemosphere* , 163 , 54-61.



- Restrepo, H. A. (2009). “Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Richardson PW. Hawkes HE. (1995). *Adsorción de cobre sobre cuarzo*. Massachusetts-ELSEVIER.
- Rodriguez Valdivia Marcelo. (2016). Evaluación de la capacidad de adsorción de  $\text{NH}_4^+$  y metales pesados  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  y  $\text{Mn}^{2+}$  empleando zeolitas naturales y sintéticas. *Tesis de pregrado*). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Talero R. (2014) “Nuevo método químico por vía húmeda, para determinar el contenido de alúmina reactiva de puzolanas naturales y artificiales”. Universidad Complutense de Madrid.
- Tapia N. (2002). Aplicaciones ambientales de la biotecnología en la industria: Adsorción y Biosorción, Mecanismos y principales modelos para describir el fenómeno de biosorción. *Proyecto Palma 3,5 y 6 de agosto 1-17*. PUCP, Lima.
- Tejada Tovar, A. Villabona Ortiz, and E. Ruiz Paternina. (2014). “Remoción de  $\text{Pb}(\text{II})$ ,  $\text{Ni}(\text{II})$  y  $\text{Cr}(\text{VI})$  en soluciones acuosas usando matrices modificadas químicamente,” *Prospectiva*, vol. 12, no. 2, pp. 7-17.
- Valdez Padrón Pablo A. (2018). Ensayo Toxicológico de efluentes líquidos de refinación de oro y la posible remoción de metales pesados Cobre (Cu) y Plomo (Pb) mediante el empleo de Zeolita natural. *(Tesis de pregrado)*. Universidad de Cuenca, Ecuador.
- Valencia J. & Castelar G. (2013). Predicción de las curvas de ruptura para la remoción de plomo (II) en disolución acuosa sobre carbón activado en una columna empacada. Universidad de Antioquia, Antioquia.



Valduvina, C.R., L.R. Garcell Puyáns y I. Rodríguez Iznaga. (2018). Remoción del plomo de residuales alcalinos con zeolita natural, en una columna de adsorción de lecho fijo. *Tecnología Química*, 2018. 38(2): p. 210- 222. ISSN 2224-6185.

Weast R. C. (1984). *CRC Handbook of chemistry and physics* 64<sup>o</sup> edition). Boca Raton Florida. CRC Press

ANA. (2016). *Protocolo Nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales.pdf* (p.92). 2009)



## ANEXOS





## ANEXO A

Marco legal: D.S. 004-2017-MINAM aprueban Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para agua y establece Disposiciones Complementarias.

Categoría 1: Poblacional y Recreacional

Subcategoría A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable

Parámetros	Unidad de medida	E1: Lagunas y lagos		E2: Ríos		E3: Ecosistemas costeros y marinos	
		Costa y sierra	Selva	Estuarios	Marinos		
<b>FÍSICOS- QUÍMICOS</b>							
Aceites y Grasas (MEH)	mg/L		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Cianuro Libre	mg/L		0,0052	0,0052	0,0052	0,001	0,001
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co		20 (a)	20 (a)	20 (a)	**	**
Clorofila A	mg/L		0,008	**	**	**	**
Conductividad	( $\mu$ S/cm)		1 000	1 000	1 000	**	**
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L		5	10	10	15	10
Fenoles	mg/L		2,56	2,56	2,56	5,8	5,8
Fósforo total	mg/L		0,035	0,05	0,05	0,124	0,062
Nitratos (NO <sub>3</sub> -) (c)	mg/L		13	13	13	200	200
Amoniaco Total (NH <sub>3</sub> )	mg/L		(1)	(1)	(1)	(2)	(2)
Nitrógeno Total	mg/L		0,315	**	**	**	**
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L		$\geq 5$	$\geq 5$	$\geq 5$	$\geq 4$	$\geq 4$
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH		6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,8 – 8,5	6,8 – 8,5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L		$\leq 25$	$\leq 100$	$\leq 400$	$\leq 100$	$\leq 30$
Sulfuros	mg/L		0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Temperatura	°C		$\Delta 3$	$\Delta 3$	$\Delta 3$	$\Delta 2$	$\Delta 2$
<b>INORGÁNICOS</b>							
Antimonio	mg/L		0,64	0,64	0,64	**	**
Arsénico	mg/L		0,15	0,15	0,15	0,036	0,036
Bario	mg/L		0,7	0,7	1	1	**
Cadmio Disuelto	mg/L		0,00025	0,00025	0,00025	0,0088	0,0088
Cobre	mg/L		0,1	0,1	0,1	0,05	0,05
Cromo VI	mg/L		0,011	0,011	0,011	0,05	0,05
Mercurio	mg/L		0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Níquel	mg/L		0,052	0,052	0,052	0,0082	0,0082
Plomo	mg/L		0,0025	0,0025	0,0025	0,0081	0,0081
Selenio	mg/L		0,005	0,005	0,005	0,071	0,071
Talio	mg/L		0,0008	0,0008	0,0008	**	**
Zinc	mg/L		0,12	0,12	0,12	0,081	0,081



## ANEXO B

### DETERMINACIÓN DEL MODELO MATEMATICO PARA EL PROCESO DE ADSORCIÓN DE PLOMO- ANALISIS ESTADÍSTICO

**Tabla 21.** Análisis de varianza para Y

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: pH	0,109436	1	0,109436	6,49	0,0842
B: Concentración puzolana	0,2916	1	0,2916	17,28	0,0253
Error total	0,0506121	3	0,0168707		
Total (corr.)	0,451648	5			

R-cuadrada = 88,7939 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 81,3232 porciento

Error estándar del est. = 0,129887

Error absoluto medio = 0,0865914

Estadístico Durbin-Watson = 1,50261 (P=0,3248)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,165496

La tabla ANOVA (El análisis de varianza), particiona la variabilidad de Y en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental.

En este caso, 1 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R<sup>2</sup>- indica que el modelo, así ajustado, explica 88,7939% de la variabilidad en Y.

**Tabla 22.** Coeficiente de regresión para Y

<b>Coeficiente</b>	<b>Estimado</b>
Constante	89,6007
A: pH	-0,1077
B: Concentración puzolana	0,108

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es

$$Y = 89,6007 - 0,1077 * \text{pH} + 0,108 * \text{Concentración puzolana}$$

en donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales.

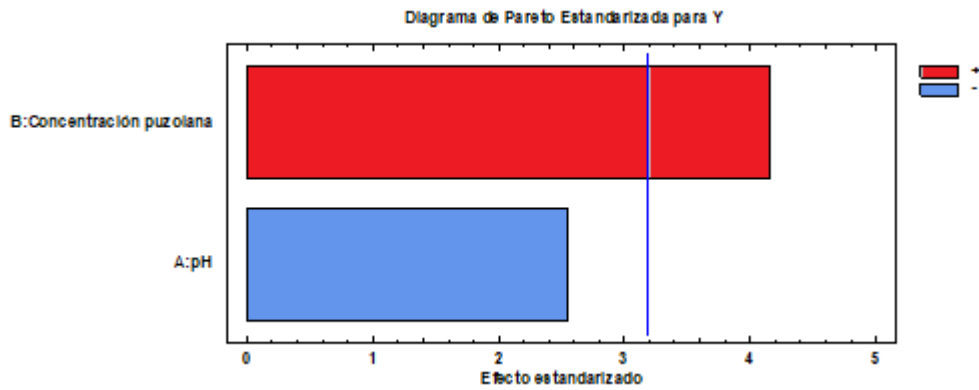
**Tabla 23.** Optimizar respuesta

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
pH	7,19	10,26	7,19
Concentración puzolana	0,130	0,128	0,128

Meta: maximizar Y

Valor óptimo = 89,5819

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Y sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

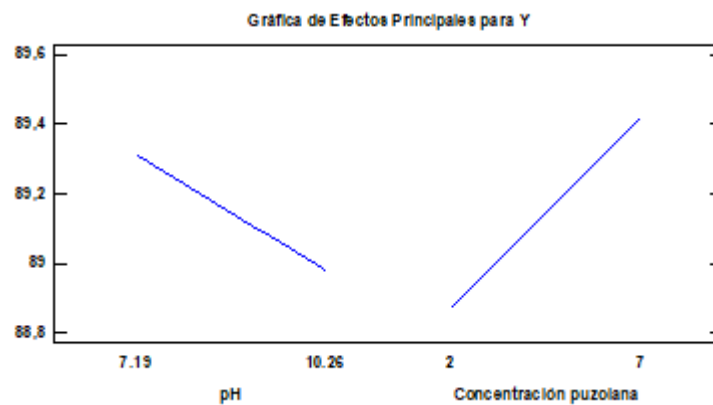


**Figura 11.** Parapeto estandarizado para Y

En la figura 11 ha sido elaborada en base a los datos de la tabla 9, muestra cada uno de los efectos estimados e interacciones, entre las variables, pH y concentración de puzolana, la más significativa para la variable respuesta es la concentración de puzolana activada, cualquier cambio en esta afecta a la variable respuesta Y en mayor grado.

La línea azul indica el margen sobre el que varía el sistema

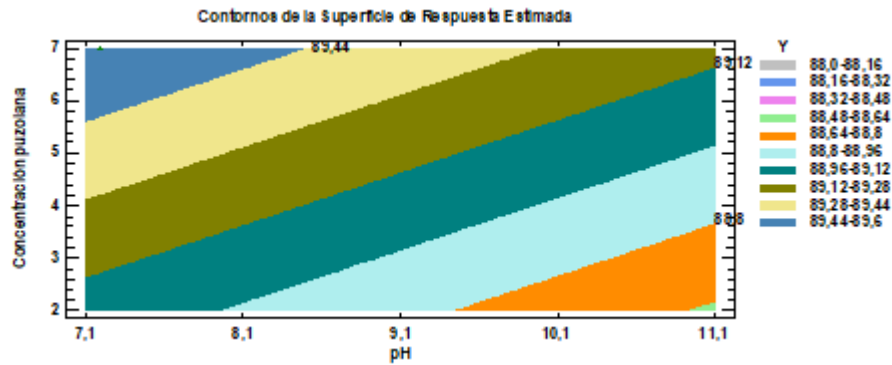
Los colores indican cuan representativos son las variables y sus combinaciones. No hay indicios de correlación de serie en los residuos



**Figura 12.** Efectos principales para Y

En la figura 12 se puede visualizar que no existe interacción entre los factores, por lo que estas variables son independientes lo que corresponde a la superficie respuesta, nos indica que la pendiente correspondiente al pH es negativa, lo que significa que a medida que sube el pH, disminuye el rendimiento (Y), en cambio la variable concentración de

puzolana es positiva pues a mayor concentración de ésta, es mayor el valor del rendimiento (Y).



**Figura 13.** Contornos de superficie de la respuesta estimada

Visualizando el gráfico (isolíneas), podemos interpretar lo siguiente: El valor óptimo para la concentración de puzolana es 7 mg y para el pH es de 10,26.

Esta ventana muestra la ruta ascendente. Este indica localizaciones buenas para ejecutar experimentos adicionales si su objetivo es aumentar o disminuir el Rendimiento.



## ANEXO C

### CÁLCULOS DE LA METODOLOGÍA DE TRABAJO

La cantidad recuperada de plomo (rendimiento) en porcentaje se calculó de la siguiente manera:

$$\% = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Dónde:

C<sub>i</sub>= concentración inicial del metal en el agua

C<sub>f</sub>= concentración final del metal en el agua después de la agitación magnética

**Tabla 24.** Cálculo del % de rendimiento para el diseño factorial

Concentración inicial de Pb (mg/L)	Concentración final de Pb (mg/L)	Rendimiento %
0,12	0,01457	87,86
0,12	0,01458	87,85
0,12	0,01465	87,79
0,12	0,01470	87,75
0,12	0,01480	87,67
0,12	0,01490	87,58

1.  $\% = \frac{0,12 - 0,01457}{0,12} \times 100 = 87,86$

2.  $\% = \frac{0,12 - 0,01458}{0,12} \times 100 = 87,85$

3.  $\% = \frac{0,12 - 0,01465}{0,12} \times 100 = 87,79$

4.  $\% = \frac{0,12 - 0,01470}{0,12} \times 100 = 87,75$

5.  $\% = \frac{0,12 - 0,01480}{0,12} \times 100 = 87,67$

6.  $\% = \frac{0,12 - 0,01490}{0,12} \times 100 = 87,58$

## ANEXO D

### TOMA DE MUESTRSA DE AGUA RERSIDUAL EN LA BAHIA DE LA CIUDAD DE PUNO



*Figura 14. Bahía interior del Lago Titicaca Puerto Luis Bancho Rossi*



*Figura 15. Toma de muestra de agua residual, Puerto Luis Bancho Rossi*



**Figura 16.** Toma de muestras de agua residual, en dirección de salida de lanchas hacia las islas



**Figura 17.** Toma de muestras de agua residual, salida de lanchas hacia las islas



## PREPARACION DE LA PIEDRA PUZOLANICA



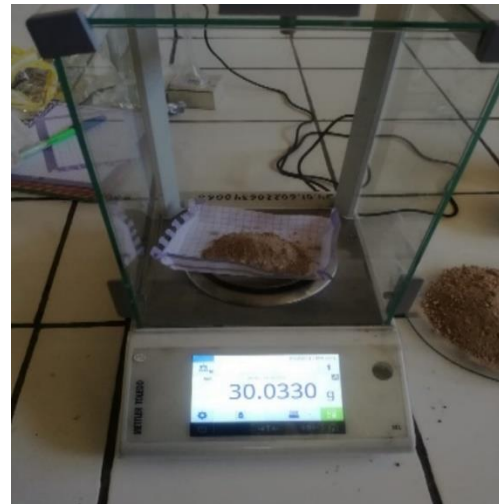
*Figura 18. Muestra de puzolana triturada*



*Figura 19. Puzolana lista para ser pesada*



*Figura 20. Pesado 30g de puzolana para ser activa*



## ACTIVACIÓN DE LA PUZOLANA EN LA MUFLA A 800 °C



**Figura 21.** Calibrando la mufla a 800°C



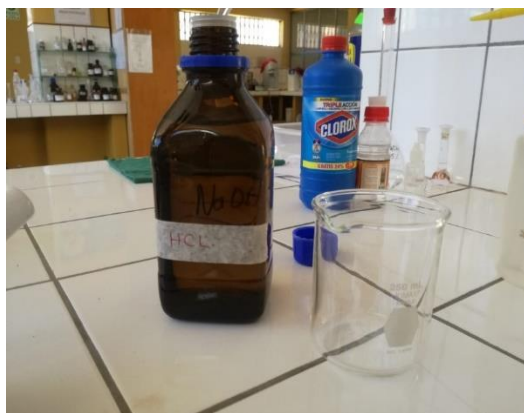
**Figura 24.** Mufla calibrada a 800°C



**Figura 22.** Introduciendo la puzolana a la mufla



**Figura 25.** Puzolana en la mufla a 800°C



**Figura 23.** Ácido clorhídrico



**Figura 26.** Preparando el HCl para el lavado de la puzolana



**Figura 27.** Preparando el HCl para el lavado de la puzolana



**Figura 28.** Agregando NaOH a la puzolana



**Figura 29.** Agregando NaOH a la puzolana



**Figura 30.** pH de la puzolana con HCl



**Figura 31.** Puzolana lavada con NaOH con pH 7,19 (básico)



**Figura 32.** Ingresando la puzolana para ser secada luego del lavado con HCl y con NaOH



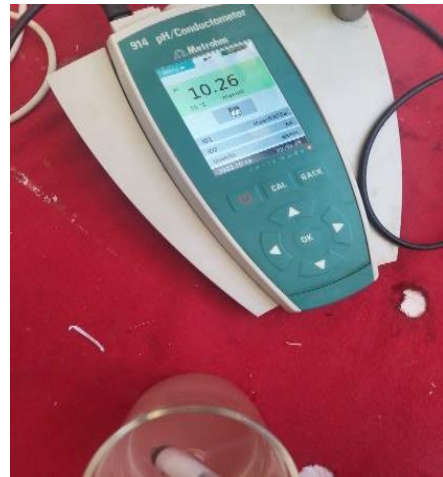
**Figura 33.** Puzolana seca, lista para ser llevada a agitación magnética



**Figura 35.** Muestra preparada para la agitación magnética



**Figura 34.** Toma de los pH de las muestras



**Figura 36.** Puzolana lavada con NaOH con pH 10,26 (básico)



*Figura 37. Proceso de agitación magnética*



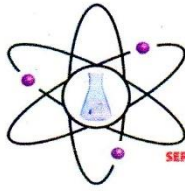
*Figura 38. Filtrado de cada muestra después de la agitación magnética*



*Figura 39. Filtrado de las muestras después de la agitación magnética*



*Figura 40. Se obtuvo seis muestras filtradas, listas para su análisis químico*



**INFORME DE ENSAYO**

**DATOS DEL CLIENTE**

A SOLICITUD DE	:	<b>SRTA. MADELYN MAMANI LLANOS</b>
ASUNTO	:	Determinación Analítica del contenido Metálico Total en la muestra
PROCEDENCIA	:	AGUA RESIDUAL DEL LAGO - PUNO
CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DE LA MUESTRA	:	
CANTIDAD DE MUESTRAS	:	01
SOLICITUD DE ENSAYO	:	Análisis Químico elemento Plomo(Pb)
PROYECTO	:	DETERMINAR LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE IONES PLOMO Y SU ISOTERMA DE ABSORCIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE PUNO UTILIZANDO PIEDRA PUZOLANICA
RECEPCION DE MUESTRAS	:	Botella de plástico, debidamente conservado.
FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO	:	21/10/2022 al 28/10/2022

**DETALLE DEL INFORME**

**RESULTADO DE ENSAYO**

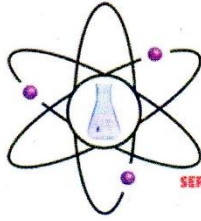
Fecha de Muestreo	21/10/2022	
Hora de Muestreo		
Nombre de muestra	Muestra 01	
Parámetro	Unidad	Resultado
ENSAYOS DE METALES - Metales Totales por Espectrofotometría de Absorción Atómica		
Plomo (Pb)	mg/L	0,120

Los resultados obtenidos y que se consignan en el presente informe corresponden al ensayo solicitado en las muestras recibidas del cliente.

**METODOS DE REFERENCIA**

\* Determinación de Plomo(Pb) en agua - Método Espectrofotometría de Absorción Atómica.

**RHLAB S.A.C**  
*Inj. César Huaynabata Luque*  
GERENTE GENERAL



RH-M97-2065

## INFORME DE ENSAYO

### DATOS DEL CLIENTE

A SOLICITUD DE	:	<b>SRTA. MADYLIN MAMANI LLANOS</b>
ASUNTO	:	Determinación Analítica del contenido Metálico Total en la muestra
PROCEDENCIA	:	AGUA RESIDUAL DEL LAGO - PUNO
CARACTERISTICAS Y CONDICIONES DE LA MUESTRA	:	
CANTIDAD DE MUESTRAS	:	01
SOLICITUD DE ENSAYO	:	Análisis Químico elemento Plomo(Pb)
PROYECTO	:	DETERMINAR LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE IONES PLOMO Y SU ISOTERMA DE ABSORCIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE PUNO UTILIZANDO PIEDRA PUZOLANICA
RECEPCION DE MUESTRAS	:	Botella de plástico, debidamente conservado.
FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO	:	03/11/2022 al 07/11/2022

### DETALLE DEL INFORME

### RESULTADO DE ENSAYO

Fecha de Muestreo	03/11/2022	
Hora de Muestreo		
Parámetro	Unidad	Plomo (Pb)
ENSAYOS DE METALES - Metales Totales por Espectrofotometría de Absorción Atómica		
Muestra 01	mg/L	0,01457
Muestra 02	mg/L	0,01458
Muestra 03	mg/L	0,01465
Muestra 04	mg/L	0,01470
Muestra 05	mg/L	0,01480
Muestra 06	mg/L	0,01490

Los resultados obtenidos y que se consignan en el presente informe corresponden al ensayo solicitado en las muestras recibidas del cliente.

### METODOS DE REFERENCIA

\* Determinación de Plomo(Pb) en agua - Método Espectrofotometría de Absorción Atómica.

RHLAB S.A.C.  
*[Firma]*  
Ing. R. R. Huayrapata Inga  
GERENTE GENERAL



**AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE  
INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

Por el presente documento, Yo MADYLEN MAMANI LLANOS  
identificado con DNI 7608 65 37 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
Ingeniería Química

, informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación para la obtención de  Grado

Título Profesional denominado:

"DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE IONES DE PLOMO Y SU ISOTERMA  
DE ADSORCIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE PUNO UTILIZANDO LP. PULCÓNIZADA"

"Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.


En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 23 de Mayo del 2023

  
FIRMA (obligatoria)



Huella





### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo MADULIN MADANI LLANOS  
identificado con DNI \_\_\_\_\_ en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Química  
informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación para la obtención de  Grado  
 Título Profesional denominado:

"DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE IONES DE PLOMO Y  
SU ISOTERMIA DE ADSORCIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE PUNO..."  
" Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 23 de MAYO del 2023



FIRMA (obligatoria)



Huella