



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



**“CÍNÉTICA DE RECUPERACIÓN Y REMOCIÓN DE COBRE (II)  
POR FLOCULACIÓN Y PRECIPITACIÓN ALCALINA DE LAS  
AGUAS RESIDUALES EN LA BAHÍA DE LA CIUDAD DE PUNO”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**RONMEL DIONEL ORTIZ COILA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PUNO – PERÚ**

**2024**



NOMBRE DEL TRABAJO

**"CÍNÉTICA DE RECUPERACIÓN Y REMOCIÓN DE COBRE (II) POR FLOCULACIÓN Y PRECIPITACIÓN ALCALINA DE LAS A**

AUTOR

**RONMEL DIONEL ORTIZ COILA**

RECuento DE PALABRAS

**15400 Words**

RECuento DE CARACTERES

**81618 Characters**

RECuento DE PÁGINAS

**96 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**6.0MB**

FECHA DE ENTREGA

**Apr 3, 2024 3:51 AM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Apr 3, 2024 3:53 AM GMT-5**

● **18% de similitud general**

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

- 17% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 9% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 16 palabras)

  
Ing. M.Sc. Jorge Aruahuánca Cartagena  
INGENIERO QUIMICO  
CIP. 128958

  
  
D. Sc. German Quille Calizaya  
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN  
FIQ UNA - PUNO

Resumen



## DEDICATORIA

- *Dedico esta tesis a Dios por haberme guiado espiritualmente dentro del camino correcto, por ser mi fortaleza y fuerza mental.*
- *A mi madre, Nilley Coila, por ser la persona más importante en mi vida y por demostrarme su cariño y apoyo constante.*
- *A mi padre, Nestor Ortiz, a pesar de su partida fue el pilar principal para seguir esforzándome.*
- *A Ana Paola, por brindarme su cariño y compañía en los momentos más difíciles de mi vida.*
- *A mi familia en general, por ser la motivación de querer superarme frente a diferentes vicisitudes de la vida.*
- *A la Facultad de Ingeniería Química, por haberme brindado la mejor enseñanza y desarrollo como estudiante.*

**Ronmel Dionel Ortiz Coila**



## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a Dios por guiarme a lo largo de la vida y poner dentro de ella a personas maravillosas que me ayudaron a desarrollarme como persona.

Agradecer a mi madre, por haberme dado la vida y consejos que permitieron culminar esta etapa de mi vida.

Agradecer a mi padre que en paz descanse, por brindarme educación e inculcarme los mejores valores que fueron la base principal de esta tesis.

Agradecer a la Universidad Nacional del Altiplano y de manera muy especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Química, ya que cuenta con la mejor plana de docentes que impartieron en mí la mejor formación académica.

Finalmente agradecer a mi director de tesis M.Sc. Jorge Aruhuanca Cartagena por depositar en mí su apoyo y confianza constante de igual forma, a mis miembros de jurado evaluador, D.Sc. Nazario Villafuerte Prudencio, Mg. Higinio Alberto Zuñiga Sanchez y Dr. Roger Huanqui Pérez, por su paciencia y guía profesional para culminar este proyecto.

**Rommel Dionel Ortiz Coila**



# 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 ANEXOS</b>	
<b>ACRÓNIMOS</b>	
<b>RESUMEN .....</b>	<b>14</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1. OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
1.1.1. Objetivo General .....	18
1.1.2. Objetivos Específicos .....	18
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b>	
<b>2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2. MARCO TEORICO .....</b>	<b>22</b>
2.2.1. Metales pesados .....	22
2.2.2. Origen.....	23
2.2.3. El agua.....	24
2.2.4. Contaminación del agua.....	25
2.2.5. Contaminación del agua por metales pesados.....	25



2.2.6. El cobre: Características, origen y usos .....	26
2.2.7. Adsorción .....	27
2.2.8. Coagulación.....	29
2.2.9. Principales coagulantes .....	30
2.2.10. Floculación .....	34
2.2.11. Cinética de adsorción .....	36
2.2.12. Modelos cinéticos de adsorción .....	37
2.2.13. Isotermas de adsorción .....	41
2.2.14. Diseño experimental.....	44
2.2.15. Modelamiento matemático de primer orden .....	44

### **CAPÍTULO III**

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

<b>3.1. LUGAR DE EJECUCION .....</b>	<b>45</b>
<b>3.2. MATERIALES.....</b>	<b>45</b>
3.2.1. Materia prima .....	45
3.2.2. Materiales y equipos .....	46
3.2.3. Reactivos .....	46
3.2.4. Equipos e instrumentos .....	47
<b>3.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>47</b>
3.3.1. Técnicas de muestreo .....	47
<b>3.4. CARACTERIZACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE COBRE (II) PROVENIENTE DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA BAHÍA INTERIOR DE LA CIUDAD DE PUNO .....</b>	<b>49</b>
<b>3.5. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE pH, VELOCIDAD Y TIEMPO DE ADSORCIÓN DEL PROCESO DE</b>	



<b>REMOCIÓN DE COBRE POR FLOCULACION Y PRECIPITACION ALCALINA. ....</b>	<b>50</b>
3.5.1. Parámetros de recuperación de Cu (II).....	50
3.5.2. Proceso de precipitación alcalina (coagulación - floculación).....	51
<b>3.6. DETERMINAR EL MODELO MATEMÁTICO Y LA CINETICA DE RECUPERACION DE COBRE DE LAS AGUAS DE LA BAHÍA INTERIOR DE PUNO POR PRECIPITACIÓN ALCALINA .....</b>	<b>55</b>
3.6.1. Desarrollo del modelo matemático por experimentación y estadística... 55	
3.6.2. Rendimiento de recuperación de cobre .....	57
3.6.3. Matriz de diseño .....	58
3.6.4. Determinación de la cinética de adsorción de cobre (II).....	59
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	
<b>4.1. CONCENTRACION DE COBRE PROVENIENTE DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA BAHIA INTERIOR DE LA CIUDAD DE PUNO..</b>	<b>64</b>
4.1.1. Caracterización inicial de las aguas de las aguas residuales en la bahía interior de la ciudad de puno .....	64
<b>4.2. PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL pH, VELOCIDAD Y TIEMPO DE ADSORCIÓN DEL PROCESO DE REMOCIÓN DE COBRE POR FLOCULACION Y PRECIPITACION ALCALINA.....</b>	<b>65</b>
<b>4.3. MODELO MATEMÁTICO Y CINETICA DE RECUPERACION DE COBRE DE LAS AGUAS DE LA BAHÍA INTERIOR DE PUNO POR PRECIPITACIÓN ALCALINA.....</b>	<b>66</b>
4.3.1. Modelo matemático para la recuperación de cobre por precipitación alcalina .....	66



4.3.2. Cinética de la recuperación de remoción de cobre.....	67
4.3.3. Modelo cinético de pseudo primer orden.....	67
4.3.4. Modelo cinético de pseudo segundo orden .....	68
<b>4.4. DISCUSIÓN .....</b>	<b>75</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>78</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>80</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>86</b>

**ÁREA:** Tecnología ambiental y recursos naturales

**TEMA:** Cinética de recuperación y remoción de cobre (II) por floculación y precipitación alcalina de las aguas residuales en la Bahía de la ciudad de Puno

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 31 de enero del 2024



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Metales pesados presentes en efluentes industriales.....	<b>24</b>
<b>Tabla 2</b> Valores límite de las aguas destinadas a la descarga de efluentes líquidos en ríos y lagos .....	<b>49</b>
<b>Tabla 3</b> Análisis químico del agua de la bahía interior de la ciudad de Puno .....	<b>50</b>
<b>Tabla 4</b> Variables para el diseño experimental .....	<b>51</b>
<b>Tabla 5</b> Tratamiento de adición de coagulante .....	<b>52</b>
<b>Tabla 6</b> Condiciones de operación en los experimentos de coagulación-floculación .....	<b>54</b>
<b>Tabla 7</b> Variables para el diseño experimental .....	<b>57</b>
<b>Tabla 8</b> Calculo del % de rendimiento para el diseño factorial para el Cu.....	<b>58</b>
<b>Tabla 9</b> Matriz de diseño factorial $2^3=8$ para el Cu .....	<b>59</b>
<b>Tabla 10</b> Datos para el modelo cinético de pseudo-primer orden.....	<b>61</b>
<b>Tabla 11</b> Datos para el modelo cinético de pseudo-segundo orden.....	<b>63</b>
<b>Tabla 12</b> Resultado de las pruebas de recuperación de Cu en las muestras de agua de la bahía interior de la ciudad de Puno.....	<b>64</b>
<b>Tabla 13</b> Cobre recuperado de la muestra tratada.....	<b>65</b>
<b>Tabla 14</b> Concentración de cobre recuperado de las muestras tratadas por precipitación alcalina .....	<b>66</b>
<b>Tabla 15</b> Valores de los modelos pseudo-primer orden y pseudo segundo orden.....	<b>70</b>
<b>Tabla 16</b> Efectos estimados para Y.....	<b>70</b>
<b>Tabla 17</b> Análisis de varianza para Y .....	<b>71</b>
<b>Tabla 18</b> Coeficiente de regresión para Y.....	<b>72</b>
<b>Tabla 19</b> Optimizar respuesta .....	<b>72</b>



<b>Tabla 20</b>	Estándares de Calidad Ambiental (ECA) Categoría 4 aprobados con decreto supremo N° 004-2017-MINAM. ....	<b>87</b>
<b>Tabla 21</b>	Calculo del % de rendimiento para el diseño factorial matemático.....	<b>88</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1</b> Neutralización de cargas .....	29
<b>Figura 2</b> Proceso de floculación .....	35
<b>Figura 3</b> Bahía interior de Puno .....	48
<b>Figura 4</b> Puntos de muestreo .....	48
<b>Figura 5</b> Diagrama de flujo del proceso de precipitación alcalina de las aguas de la bahía interior de la ciudad de Puno.....	53
<b>Figura 6</b> % de adsorción de cobre vs tiempo.....	60
<b>Figura 7</b> Modelo de primer orden para la adsorción de cobre.....	68
<b>Figura 8</b> Modelo de segundo orden para la adsorción de cobre.....	69
<b>Figura 9</b> Diagrama de Pareto.....	73
<b>Figura 10</b> Grafica de efectos principales para Y .....	74
<b>Figura 11</b> Contornos de superficie de la respuesta estimada.....	74
<b>Figura 12</b> Toma de muestras en el terminal de salida de carros interprovincial .....	90
<b>Figura 13</b> Toma de muestra de agua a un costado de la isla Esteves .....	90
<b>Figura 14</b> Toma de muestras de agua en el puerto de salida a los Uros.....	90
<b>Figura 15</b> Pesando el coagulante sulfato de aluminio .....	91
<b>Figura 16</b> Tomado de pH de cada una de la muestra de agua conteniendo Cu.....	91
<b>Figura 17</b> Colocando las muestras de agua en el equipo Jar-Tes para su agitación.....	91
<b>Figura 18</b> Proceso de filtración de las muestras después de la precipitación alcalina .	92
<b>Figura 19</b> Filtración de las muestras luego de la precipitación alcalina.....	92
<b>Figura 20</b> Muestras listas para ser llevados a su análisis final .....	92



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO 1.</b> Estándares de Calidad Ambiental (ECA).....	<b>87</b>
<b>ANEXO 2.</b> Cálculos de la metodología de investigación .....	<b>88</b>
<b>ANEXO 3.</b> Panel fotográfico .....	<b>90</b>
<b>ANEXO 4.</b> Certificado de análisis .....	<b>93</b>
<b>ANEXO 5.</b> Declaración jurada de autenticidad de tesis .....	<b>95</b>
<b>ANEXO 6.</b> Autorización para el deposito de tesis en el repositorio institucional .....	<b>96</b>



## ACRÓNIMOS

MINAN:	Ministerio del Ambiente
EPA:	Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos
pH:	Potencial de hidrógeno, indica la acidez o alcalinidad del agua
OMS:	Organización Mundial de la Salud
mg/L	Miligramos por litro



## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es la recuperación de cobre de las aguas de la bahía interior de la ciudad de Puno, en un punto fijo a una coordenada de  $15^{\circ}06'06.5''S$  y  $69^{\circ}48'06.0''W$ , mediante el proceso de precipitación alcalina, utilizando como equipo la prueba de jarras. El agua de la bahía interior de la ciudad de Puno, contiene cobre ( $0,157$  mg/L), que supera los valores máximos permisibles determinados por el D.S. 004- 2017-MINAM. La metodología utilizada por objetivos, consistió en determinar las variables de operación que se modificaron en todas las diluciones fueron la velocidad, tiempo de residencia y el pH (de 3,45 a 11), se realizaron 8 experimentos a la velocidad de agitación (120 rpm) y tiempo de mezcla inicial a tiempo final (10 a 30 min.) para cada proceso, con objeto de establecer sus influencias en los procesos ensayados, los resultados fueron que se recuperó  $0,0158137$  mg/L (90,9636% de rendimiento) de cobre, se trabajó con  $Ca(OH)_2$  en cantidades aleatorias para corregir el pH de la solución en cada caso, se efectuó el modelo matemático por experimentación, según se observa en la tabla 10, Siendo las variables óptimas la velocidad de agitación de 120 rpm; con un tiempo de 10 minutos, pH es de 11,. La validez del modelo de estadístico de regresión queda demostrada mediante los valores hallados por el modelo matemático con las variables, velocidad, tiempo de adsorción y pH. Por consiguiente, Por consiguiente, se concluye que el pH es la variable más significativa. De igual forma, el uso de cal hidratada en el proceso de recuperación de cobre por el método de precipitación alcalina fue el adecuado.

**Palabras claves:** Cinética, Cobre, Flocculación, Precipitación alcalina, Remoción.



## ABSTRACT

The research objective was, the copper recovery from the waters of Puno city interior bay, at a fixed point at a coordinate of  $15^{\circ}06'06.5''S$  and  $69^{\circ}48'06.0''W$ , through the alkaline precipitation process, using the jar test as equipment. The water of Puno city inner bay contains copper (0,157 mg/L), which exceeds the maximum permissible values determined by D.S. 004-2017-MINAM. The methodology used by objectives, consisted in determining the operation variables that were modified in all the dilutions were the speed, residence time and the pH (from 3,45 to 11), 8 experiments were carried out at the speed of agitation (120 rpm) and initial mixing time to final time (10 to 30 min.) for each process, in order to establish its influences on the tested processes, the results were that 0,0158137 mg/L (90,9636% of yield) of copper, we worked with  $Ca(OH)_2$  in random quantities to correct the pH of the solution in each case, the mathematical model was carried out by experimentation, as observed in table 10, the optimal variables being the speed of stirring 120 rpm; with a time of 10 minutes, pH is 11. The validity of the regression statistical model is demonstrated by the values found by the mathematical model with the variables speed, adsorption time and pH. Consequently, it is concluded that pH is the most significant variable. In the same way, the use of hydrated lime in the copper recovery process by the alkaline precipitation method was adequate.

**Keywords:** Kinetics, Copper, Flocculation, Alkaline precipitation, Removal.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La contaminación de las aguas de la bahía del lago Titicaca por metales pesados como el cobre, provenientes de las aguas residuales de la ciudad de Puno, ponen en riesgo la salud humana, lo que conlleva a los gobiernos a establecer normatividades cada vez más estrictas, motivando de esta manera un aumento en la investigación y desarrollo de métodos más efectivos para la remoción de Cu, entre otros, que involucren abaratar costos y el uso de recursos naturales disponibles. El cobre es un metal pesado tóxico que, a bajas concentraciones en los humanos, puede causar enfermedades en el sistema gastrointestinal, neuromuscular, sistema nervioso central, enfermedades hematológicas, renales y reproductivos; está asociado a la esterilidad y muerte neonatal, y también tiene efectos teratogénicos y cancerígenos. (Pinto, 2008).

El agua, es el elemento que constituye la esencia misma de la vida sobre el planeta, es *el* recurso principal que permite la supervivencia de los seres vivos, sin ella la vida es imposible, a pesar de ello parece que al hombre no le importa envenenar sistemáticamente los cursos fluviales, los mares y cualquier otro tipo de receptáculo acuoso. (Rivera, 2001).

La contaminación del agua por metales pesados provenientes de efluentes industriales pone en riesgo la salud humana, lo que conlleva a los gobiernos a establecer normatividades cada vez más estrictas, motivando de esta manera un aumento en la investigación y desarrollo de métodos más efectivos para la recuperación de estos metales pesados Pb (II), Zn (II), Cd (II), Hg (II), Mn entre otros), que involucren abaratar costos y el uso de recursos naturales disponibles. (Ribeiro, 2008).



Para el tratamiento de efluentes líquidos que contienen metales pesados existen diferentes métodos de remediación, siendo los de mayor aplicación los siguientes: precipitación, intercambio iónico, osmosis inversa y adsorción. (Ribeiro, 2008).

“Los metales pesados no se degradan química ni biológicamente, por lo que una vez emitidos permanecen en el ambiente durante cientos de años en algunos casos, contaminando el agua, la tierra, y ocasionando daños a la salud de las personas. Además, su concentración en los seres vivos aumenta a medida que son ingeridos por otros, por lo que la ingesta de plantas o animales contaminados puede provocar intoxicación. (Ribeiro, 2008).”

“La presencia de metales pesados en nuestro país, no solo son propios de la industria minero-metalúrgica (cobre, zinc, plomo, mercurio y arsénico), sino también por los insumos químicos que se emplean como aluminio, hierro, cobre, entre otros”.

Con este fin se han establecido normativas que limitan las cantidades máximas de determinados metales en efluentes antes de ser vertidos al medio y se llevan a cabo estudios, como el presente, orientados a eliminar los metales tóxicos de los vertidos de la manera más eficaz y económica posible. (Lara, 2007).

Dentro de los impactos ambientales, el mayor problema es causado por el agua residual de los domicilios de la ciudad de Puno, aguas que van directamente a la bahía del Lago Titicaca, con contaminantes químicos, metales, sólidos orgánicos e inorgánicos, lo cual ocasiona severos problemas a la flora y fauna del lago, ocasionando además perjuicios al agua de consumo humano.

“En este proyecto de investigación tiene como objetivo determinar la cinética y remoción de cobre por floculación y precipitación alcalina de las aguas residuales de la ciudad de Puno, utilizando el método de precipitación alcalina con el equipo de jarras,



que es el método más utilizado para la determinación del coagulante óptimo y su dosis, además de otros parámetros como velocidad de agitación, tiempo de mezcla y pH. Este método de recuperación de metales consiste en una serie de recipientes a los que se adicionan distintas dosis de coagulantes, además permitirá ajustar el pH y luego flocularlos”.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo General**

Determinar la cinética de recuperación y la eficacia de remoción de cobre (II) por el método de floculación y precipitación alcalina de las aguas residuales en la bahía de la ciudad de Puno

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar la concentración de cobre (II) proveniente de las aguas residuales en la bahía de la ciudad de Puno.
- Determinar los parámetros óptimos de pH, velocidad, tiempo de adsorción del proceso del proceso de remoción de cobre por floculación y precipitación alcalina.
- Determinar el modelo matemático y la cinética de recuperación de cobre de las aguas de la bahía interior de Puno por precipitación alcalina.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Chagua *et al* (2016), en el trabajo de investigación utilizó cobre 0.012 mg/L, fierro 0.008 mg/L, plomo 0.001 mg/L y 0.023 mg/L de Zinc. Seguidamente determinó la temperatura del agua de trabajo los tratados con Cu con un valor de 12.25 a 17.35°C y los tratados con Zn de 11.80 a 15.0°C, con pHs de 2.58 a 3.68 de pH para el cobre y 2.51 a 3.33 para el zinc, luego del proceso la remoción fue 5.00 a 0.93 ppm de Cobre y de 5.00 a 2.13 ppm de Zn, lo cual indica que la planta nativa *Scirpus Californicus* (Totora) tiene la capacidad de almacenar en su estructura los metales, obtuvo 81.50% y 57.50%, de Cu y Zn respectivamente.

Meza y Mallaupoma (2018) utilizó 2,8 g de nanoarcilla en el proceso de adsorción con pH de 3, 5 y 8 y tiempos de contacto de 30, 60 y 90 minutos. Como resultado obtuvo 96,3% a un tiempo de contacto de 30 minutos y un pH de 8, Luego determinó la isoterma de adsorción que mejor se adecúe al proceso, trabajó con concentraciones iniciales de Cu(II) de 10, 20, 30, 40 y 50 mg/L. El coeficiente de correlación  $R^2$  es de 0,96. La capacidad de adsorción de la nanoarcilla, según la isoterma de Langmuir para el Cu(II) fue de 7,53 mg/g.

Moreno *et al* (2017), trabajaron con Cu, Zn, Pb, Cd, As, Hg en la Bahía interior del Lago Titicaca, los elementos fueron determinados y cuantificados mediante espectrometría de absorción atómica. Al comparar cada estación y entre épocas, no existió diferencias estadísticamente significativas, aunque los mayores niveles de concentración correspondieron a la época de estiaje. Se concluyó que existe exposición ambiental por metales en las aguas de la Bahía Interior y donde sus concentraciones son permanentes



durante todo el período del año, pudiendo traer consecuencias negativas no solo para el ecosistema, sino además a la propia salud humana dada actividades de beneficio comunitario que se desarrolla en este espacio geográfico

Apaza (2013), concluyo que aplicando el proceso de precipitación alcalina utilizando hidróxido de calcio e hidróxido de sodio, los resultados más relevantes obtenidos en esta investigación se dieron a partir de las variables de operación planteados para el diseño experimental de superficie de respuestas: pH (9,77) para  $\text{Ca(OH)}_2$  y (8,92) para NaOH, respecto a la velocidad de mezcla (40 rpm) para ambos hidróxidos y para la velocidad de agitación (20 minutos) para ambos hidróxidos, con estas variables se logró una eficiencia de remoción Pb (99,10%), Zn (99,50%) utilizando  $\text{Ca(OH)}_2$  y Pb (98,55%), Zn (99,06%) con NaOH. De acuerdo al diseño experimental de superficie de respuestas se trabajó con velocidad de agitación 30 rpm, tiempo de agitación 19,2 minutos y pH 9,77 para el Cu; para el NaOH los resultados dieron: pH 8,93; tiempo de agitación 19,18 minutos y velocidad de mezcla 30 rpm,

Cosme M.O. (2017)), trabajo con 10 tratamientos y sus repeticiones. Los coagulantes utilizados fueron el Huaraco (*Opuntia floccosa*) y el Policloruro de Aluminio, las concentraciones fueron de 10; 20; 30; 40 y 50 ppm de los coagulantes respectivamente, con tiempo de 5 min y 100 RPM y para la floculación 50 RPM con un tiempo de 20 min y, luego se realizó la sedimentación por un tiempo de 30 min. El mejor tratamiento fue con el Policloruro de aluminio, con una remoción de plomo de 88,36 %, demostrando una influencia del tipo y concentración de coagulante en la remoción de plomo.

López R., G. A. (2016)). Trabajo con dosis de coagulante 20 a 100 mg/L y tiempo de mezcla 10 minutos, variando la velocidad de agitación entre 20-150 rpm. Como resultado se recuperó el 98,10 % de Mn con  $\text{Ca(OH)}_2$  y 94,09 % con NaOH, el pH óptimo es de 9, con un tiempo de floculación de 8,5 segundos, con una concentración de 100 ppm,



utilizó el NaOH como floculante con pH óptimo de 8,3, concentración de 100 ppm y tiempo de floculación de 7 segundos.

Vilca (2018), determino el contenido de zinc (110 mg/L) y cadmio (2,06 mg/L) en el agua de la mina. Las variables de operación fueron la dosis de coagulante (de 30 a 100 mg/L) y el pH (de 6 a 11), los experimentos se realizaron variando la velocidad de agitación (20 a 150 rpm) y el tiempo de mezcla (10 a 20 min.), los resultados fueron que se recuperó 1,97 mg/L de Cd (99,05%) y 108,2 mg/L de Zn (98,65 %) con reactivo MPP50 como floculante, determinó que la velocidad de agitación fue de 150 rpm y el pH óptimo es de 8,9; con un tiempo de floculación de 20 minutos, concluye que el pH y la velocidad de agitación son las variables más significativas en el proceso de recuperación del zinc y cadmio.

Tapia *et al* (2015), ha obtenido gel de pectina en forma de perlas esféricas, el proceso fue hacer gotear una solución al 4,0% de pectina, con un pH de 3,4, sobre una mezcla de alcohol al 93% con una solución 0,1 M de cloruro de calcio en la relación 1:1. Determinó que el pH óptimo para la adsorción de los iones de Cu (II) fue entre 4,5 a 5. El modelo de Langmuir utilizó para determinar la capacidad máxima de adsorción cuyo valor es de  $q_{max}=8,77$  mg/g y para la constante de Langmuir  $b=0,027$ , la cinética del proceso de adsorción determinó que el equilibrio del proceso de adsorción se alcanzó a los 250 min

Cueva (2014), el análisis se realizó por medio del minitab, teniendo como respuesta la mayor la remoción de los metales,  $Pb^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$ ,  $zn^{+2}$ ,  $Fe^{+3}$ , en el efluente minero son  $V_{ag} = 10$  rpm;  $Do = 4$  mL y  $Tag = 6$  minutos. La respuesta fue el menor tiempo crítico de sedimentación, se encontró un punto con las mejores condiciones para el tratamiento del agua de mina:  $V_{ag} = 10$  rpm;  $Tag = 6$  minutos,  $Do = 4$  mL.

Por tanto, el punto con las mejores condiciones es con las siguientes condiciones:



Vag = 10 rpm; Do= 4 mL, Tag = 6 minutos

Álvaro (2011). Se evaluaron dos variedades de aserrín de pino (*Pinus cupresus*, *Pinus caribaeae*) para la remoción de Ni<sup>2+</sup> presente en efluentes industriales. La variedad *Pinus cupresus* tuvo mayor adsorción, 0,53 mg Ni/g, lo cual por su fácil adquisición y bajo costo, lo hacen un adsorbente con gran potencial. Se utilizó un modelo cinético para la adsorción del metal. La torta húmeda residual puede disponerse por incineración donde el 44% del níquel queda depositado en las cenizas, el fenómeno se da principalmente por intercambio iónico con Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> presentes en el aserrín

## 2.2. MARCO TEORICO

### 2.2.1. Metales pesados

Los metales, en su conjunto, se caracterizan por sus propiedades físicas distintivas, destacando su lustre metálico, capacidad de ser moldeados y estirados, y su eficacia como conductores eléctricos.

“Desde el punto de vista químico, son elementos que pierden fácilmente electrones y se pueden convertir en cationes y forman óxidos básicos. Por otro lado, los metales pesados se han definido en base a diversos criterios como su densidad, gravedad específica, peso atómico, toxicidad, entre otros; que han sido consideradas imprecisas (Duffus, 2002). De acuerdo al primer criterio, según una de varias definiciones, los metales pesados son elementos - químicos con una gravedad específica al menos 5 veces mayor a la del agua, cuya densidad es 1 a 4 °C (39 °F).”



### 2.2.2. Origen

“Los metales están presentes en la corteza terrestre o en el interior de ella, así como en las aguas subterráneas y superficiales y en el aire; como consecuencia de procesos naturales o por actividades antropogénicas. Estas últimas, son causantes del aumento de la presencia de metales en el medio ambiente.”

En el Perú, gracias a la diversidad geográfica, geológica, política y etnocultural; existe una pluralidad de actividades económicas tanto formales e informales; minera, siderúrgica, metalurgia, hidrocarburos, pesquería, agricultura, entre otras que producen contaminación. El origen de esta además de estar asociada a los metales pesados, generados en la industria minero-metalúrgica (plomo, mercurio y cadmio, arsénico, etc.); está relacionada a los insumos químicos empleados como hidrocarburos, plaguicidas, aluminio, magnesio, hierro, cobre, compuestos orgánicos persistentes, entre otros (Ministerio de Salud, 2013).

Por otro lado, la naturaleza y concentración de los metales pesados en los efluentes líquidos provenientes de las diversas industrias, depende de varios factores como el proceso productivo y la etapa en que se producen los residuos; en la Tabla 1 se muestra los distintos metales pesados que se encuentran con frecuencia en los efluentes de diferentes industrias (Agouborde, 2008).

**Tabla 1**

*Metales pesados presentes en efluentes industriales*

Propiedades	Definiciones
Densidad	3,5-5 g/cm <sup>3</sup> ; > 4 g/cm <sup>3</sup> ; > 4,5 g/cm <sup>3</sup> ; > 5 g/cm <sup>3</sup> ; ≥ 5 g/cm <sup>3</sup> ; > 6 g/cm <sup>3</sup> ; > 7 g/cm <sup>3</sup> .
Peso atómico	Metales con peso molecular mayor que el sodio; metales con alto peso molecular (mercurio, cromo, cadmio, cobre, arsénico y plomo); elementos metálicos con pesos atómicos mayores a 40; un grupo de metales de elevado peso atómico, particularmente aquellos metales de transición que son tóxicos y que no pueden ser procesados por organismos vivos, tales como el plomo, mercurio y cadmio; metales con elevada masa atómica relativa.
Número atómico	Cualquier metal con número atómico mayor que el del calcio; cualquier elemento con números atómicos mayores que 20; metales con pesos atómicos entre 21 (escandio) y 92 (uranio); término a menudo utilizado para cualquier metal con número atómico ≥ 20
Basada en propiedades químicas	Compuestos inter-metálicos de hierro y estaño; plomo, cobre, zinc y metales alcalinos térreos que reaccionan con ácidos grasos para formar jabones, son utilizados en grasas lubricantes, secadores de pinturas, y fungicidas; cualquier metal que reacciona fácilmente con ditizona, como por ejemplo zinc, cobre, plomo, etc.
Basadas en la toxicidad	Elementos utilizados comúnmente en la industria y que genéricamente son tóxicos para animales y para procesos aerobios y anaerobios; término con el cual se denomina a elementos tales como el plomo, cadmio, mercurio; elementos que son de naturaleza tóxica.

Fuente: Agouborde, Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes (2008).

### 2.2.3. El agua

El agua, presente en forma líquida, sólida y gaseosa en la superficie terrestre, abarca océanos, lagos, ríos, casquetes polares y atmósfera. Es esencial



para los seres vivos, participando en diversos procesos bioquímicos y constituyendo gran parte de su masa. Incolora, inodora e insípida, está compuesta por moléculas de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Su densidad alcanza  $1\text{g/cm}^3$  a  $4^\circ\text{C}$ , su temperatura de mayor densidad. A nivel del mar, se congela a 0 grados centígrados y hierve a 100 grados centígrados (Apaza, 2013).

#### **2.2.4. Contaminación del agua**

La contaminación de cuerpos de agua (ríos, lagos, océanos y agua subterránea) ocurre cuando los contaminantes son descargados directamente o indirectamente en cuerpos de agua sin un adecuado tratamiento que remueva los componentes dañinos. La contaminación del agua afecta plantas y organismos que viven en estos cuerpos de agua, y en la mayoría de los casos afecta dañando no solamente a las especies individuales y las poblaciones, así como en las comunidades biológicas. El agua de dichos cuerpos se ha contaminado mediante sustancias tóxicas como ácidas, solventes orgánicos, pinturas, metales y demás, derivados de actividades industriales, agrícolas, ganaderas, domésticas, dicha agua ya no es apta para el consumo. La descarga de contaminantes específicos no es la única causa de contaminación del agua, también la construcción de presas, embalses y desviaciones de ríos pueden degradar seriamente su calidad (Heinke *et al*, 1999).

#### **2.2.5. Contaminación del agua por metales pesados**

El término "metales pesados" abarca elementos metálicos con alta densidad y propiedades tóxicas en concentraciones bajas. Ejemplos comunes son mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), talio (Tl) y plomo (Pb), todos presentes en la corteza terrestre y no susceptibles de descomposición. Estos



metales se incorporan a nuestros cuerpos en trazas, principalmente a través de la alimentación, el agua y la inhalación de aire contaminado. Aunque ciertos metales como el cobre, selenio y zinc son esenciales para el metabolismo humano, en exceso pueden ser perjudiciales. La exposición a metales pesados, como el plomo en tuberías de agua potable, puede conducir al envenenamiento. Su peligro radica en su tendencia a bioacumularse, es decir, aumentar su concentración en los organismos vivos con el tiempo. Algunos metales, como el cobre, manganeso y zinc, son esenciales para funciones bioquímicas y fisiológicas, pero en exceso pueden ser dañinos (Bengtsson et al, 2006).

El impacto de estos elementos como potentes agentes tóxicos afecta tanto a la salud humana como a los ecosistemas, y esto depende de diversos factores, como la vía de exposición, la cantidad absorbida y la naturaleza química del metal. La toxicidad de estos compuestos está estrechamente ligada a su concentración, ya que algunos pueden tener efectos carcinogénicos. Aunque la corteza terrestre es la principal fuente de estos metales, actividades humanas como la minería, la agricultura, la ganadería, la industria y el tráfico también desempeñan un papel significativo como fuentes de contaminación. (Rodríguez y Formoso, 2005; Chapman et al., 2003).

#### **2.2.6. El cobre: Características, origen y usos**

“Con frecuencia se encuentra en forma natural en las aguas superficiales, pero en concentraciones menores a un mg/L. En estas concentraciones, el cobre no tiene efectos nocivos para la salud.”

“Se trata de un elemento benéfico para el metabolismo, esencial para la formación de la hemoglobina. La deficiencia de cobre ha sido asociada con la



anemia nutricional de los niños. Sin embargo, si se ingiere agua contaminada con niveles de cobre que superan los límites permitidos por las normas de calidad, a corto plazo pueden generarse molestias gastrointestinales. Exposiciones al cobre a largo plazo podrían causar lesiones hepáticas o renales. Los peces (principalmente la trucha) son especialmente sensibles a este elemento y se ven indirectamente afectados cuando, al actuar el cobre como alguicida, elimina la capacidad de captación de oxígeno del agua y disminuye el OD a concentraciones tan pequeñas que ya no es posible el desarrollo de estas especies. La presencia del cobre en el agua está relacionada principalmente con la corrosión de las cañerías en la vivienda, la erosión de depósitos naturales y el percolado de conservantes de madera, entre otros. En algunos sistemas se aplica sulfato de cobre en dosis controladas como mecanismo para combatir las algas en el agua. Las dosis van de 0,1 a 2 mg/L. En concentraciones altas, el cobre puede favorecer la corrosión del aluminio y el cinc y cambiar el sabor del agua. Pruebas de coagulación en laboratorio han reportado una eficiencia en la remoción del cobre de entre 60 a 90% (10), dependiendo del pH y la turbiedad. La EPA ha establecido una concentración máxima de 1,3 mg/L, que denomina nivel de acción; es decir, una concentración límite que sirve como un aviso para que los sistemas públicos de suministro de agua tomen medidas de tratamiento (si es necesario, adicionales) cuando los niveles de las muestras de agua superan en más de 10% los valores permitidos. Las Guías de Calidad para Agua de Bebida del Canadá han recomendado un límite de un mg/L de cobre en aguas destinadas al consumo humano. El valor guía dado por la OMS es 2 mg/L (Vargas 2004).”

### **2.2.7. Adsorción**

“La adsorción es un fenómeno de acumulación de partículas como iones,



moléculas, que se encuentran en una determinada fase, por la superficie de un sólido o líquidos. En el caso de iones la interacción dependerá del tipo de ion (anión o catión), la carga y tamaño del mismo. La adsorción implica un fenómeno de superficie, en la actual secuestración del metal puede tener lugar fenómenos físicos (Adsorción física) o por enlaces químicos (Quimisorción). (Sun-Kou,*et al.*, 2014).”

#### - **Características principales de la adsorción**

- Es altamente selectiva
- Es un proceso rápido cuya velocidad aumenta cuando aumenta la temperatura, pero desciende cuando aumenta la cantidad adsorbida.
- Es un proceso espontáneo.

##### **2.2.7.1. Adsorción física o fisorción**

“Cuando estas fuerzas son del tipo dipolo-dipolo, dipolo-dipolo inducido o fuerzas de dispersión, se usa el término de adsorción física o fisorción. Esta adsorción es no específica debido a que las fuerzas de atracción de las moléculas a las superficies sólidas son relativamente débiles. La energía de activación por adsorción física no es más de 1Kcal/g.mol. Estas fuerzas decrecen rápidamente. (Sun-Kou *et al.*, 2014).”

##### **2.2.7.2. Adsorción química o quimisorción**

Cuando las fuerzas son enlaces covalentes se aplica el término de adsorción química o quimisorción. Esta adsorción es específica y las fuerzas de atracción son mucho más fuertes que la adsorción física, las moléculas adsorbidas son atraídas por fuerzas de valencia del mismo tipo

como los que ocurren entre átomos en moléculas, estas son estudiadas utilizando el modelo de Langmuir. (Sun-Kou, *et al*, 2014).

### **2.2.8. Coagulación**

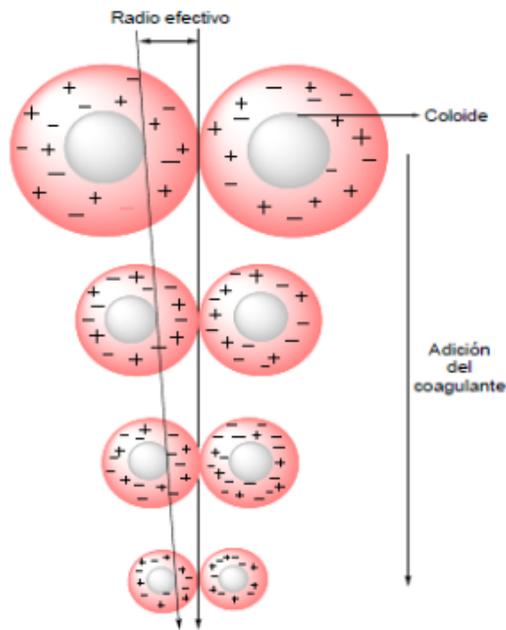
Se trata de un procedimiento químico que desestabiliza las partículas coloidales al contrarrestar las fuerzas que las mantienen separadas, lo que promueve su aglomeración en microflocs. Esto se logra mediante la adición de coagulantes químicos y el uso de energía de mezclado.

Se considera que la dosis de los coagulantes condiciona el funcionamiento de las unidades de decantación y que es imposible de realizar una clarificación si la cantidad del coagulante está mal ajustada. (Yáñez, 2007).

La figura 1 ilustra cómo las sustancias químicas neutralizan las cargas eléctricas en la superficie del coloide, lo que facilita la aglomeración de las partículas coloidales formando flóculos.

#### **Figura 1**

*Neutralización de cargas*



La adición de un coagulante neutraliza las cargas, produciendo un colapso de la "nube de iones" que rodean los coloides de modo que puedan aglomerarse

Fuente. Yáñez 2007

### 2.2.8.1. Mecanismos de Coagulación

Según Tapia 2007, la desestabilización se puede obtener por los mecanismos fisicoquímicos siguientes:

- Compresión de la doble capa.
- Adsorción y neutralización de cargas.
- Atrapamiento de partículas en un precipitado.
- Adsorción y puente

### 2.2.9. Principales coagulantes

Los principales coagulantes utilizados para desestabilizar las partículas y producir el floc son:

- Sulfato de Aluminio
- Aluminato de Sodio



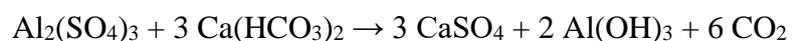
- Cloruro de Aluminio
- Sulfato Ferroso
- Sulfato Férrico
- Cloruro Férrico

Los más utilizados son las sales de Aluminio y de Hierro, cuando se adiciona estas sales al agua se producen una serie de reacciones muy complejas donde los productos de hidrólisis son más eficaces que los iones mismos; estas sales reaccionan con la alcalinidad del agua y producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman los precipitados. (Tapia, 2007) .

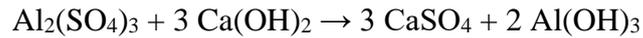
#### **2.2.9.1. Sulfato de aluminio ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ )**

El sulfato de aluminio, conocido como alúmina o alumbre, es el coagulante más comúnmente utilizado. Se presenta como un sólido de cristal grisáceo y reacciona con la alcalinidad del agua y los fosfatos. Genera flóculos pequeños y esponjosos, por lo que no se emplea en la precipitación inicial de aguas residuales altamente contaminadas. Sin embargo, su aplicación es amplia en el tratamiento de agua potable y la reducción de coloides orgánicos y fósforo. El rango de pH óptimo para la coagulación es de 5.0 a 7.5. En el tratamiento de aguas residuales, la dosis varía de 100 a 300 g/m<sup>3</sup> dependiendo del tipo de agua residual y los estándares de calidad requeridos (Tapia, 2007).

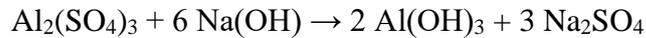
- Sulfato de aluminio (líquido o sólido).



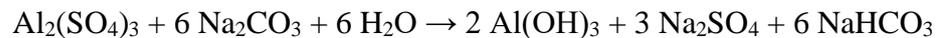
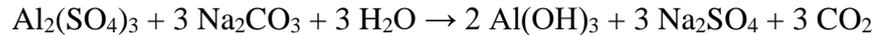
- Sulfato de aluminio + cal:



- Sulfato de aluminio + soda cáustica:

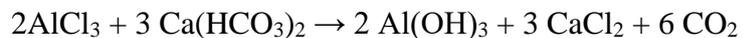


- Sulfato de aluminio + carbonato sódico:



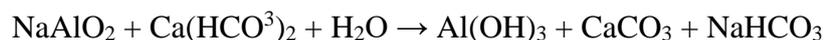
### 2.2.9.2. Cloruro de aluminio ( $\text{AlCl}_3$ )

El cloruro de aluminio se encuentra disponible en forma sólida o líquida, siendo esta última preferida (con una densidad de 1.29 kg/dm<sup>3</sup>, equivalente a un contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  del 11.4%). Se detallan las reacciones asociadas al cloruro de aluminio (Tapia, 2007).



### 2.2.9.3. Reacciones de aluminato sódico

Este coagulante se emplea poco, su uso más habitual es eliminar color a pH bajo; Además, se puede usar en el ablandamiento de agua con cal. (Tapia, 2007)



### 2.2.9.4. Sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ )

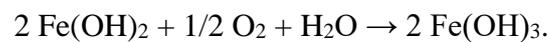
Se usa generalmente junto con la cal ( $\text{CaO}$ ) o junto con el cloro para llevar a cabo una coagulación efectiva; La reacción del  $\text{FeSO}_4$  con la cal hidratada se ve favorecida a pH alto (Tapia, 2007)



Rango de pH para la coagulación óptima alrededor de 9.5.

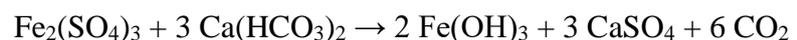


Dosis: En clarificación, se necesitan de 10 a 100 g/m<sup>3</sup> de reactivo comercial FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O; En tratamiento de aguas residuales, se necesitan de 200 a 400 g/m<sup>3</sup> de reactivo comercial FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O; en aguas aireadas, el hidróxido ferroso se oxida a hidróxido férrico:



#### **2.2.9.5. Sulfato férrico (Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>)**

Se encuentra disponible comercialmente en forma granular de color marrón rojizo y es altamente soluble en agua. Puede reaccionar con la alcalinidad natural del agua o con compuestos alcalinos añadidos, como la cal. Produce flóculos grandes y densos que sedimentan rápidamente, por lo que es adecuado tanto para la precipitación previa como para la co-precipitación en aguas residuales urbanas o industriales. Además, se utiliza en el tratamiento de agua potable, aunque en algunos casos puede ocasionar problemas de coloración. El rango de pH óptimo para la coagulación es entre 4 y 7, y mayor de 9. La dosis recomendada varía de 10 a 150 g/m<sup>3</sup> de reactivo comercial Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.9H<sub>2</sub>O con cal (Tapia, 2007).



#### **2.2.9.6. Cloruro férrico (FeCl<sub>3</sub>)**

Se encuentra disponible en forma sólida y líquida y se produce



mediante la oxidación de sulfato ferroso con cloro. Se utiliza en el tratamiento de aguas residuales e industriales y reacciona tanto con la alcalinidad natural del agua como con compuestos alcalinos añadidos. Estos polímeros con carga positiva desestabilizan las partículas coloidales cargadas negativamente presentes en el agua, al reducir las fuerzas repulsivas entre ellas.

La formación de partículas grandes comienza a enredar más partículas y aglomerarlas; La masa resultante tiene mayor densidad que la del agua a tratar y por lo tanto pueden ser removidas por sedimentación y filtración (Tapia, 2007).

Rango de pH para la coagulación óptima: entre 4 y 6 y mayor de 8.  
Dosis de 5 a 160 g/m<sup>3</sup> de reactivo comercial FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O con cal.

Es enérgico, aunque puede presentar problemas de coloración en las aguas.



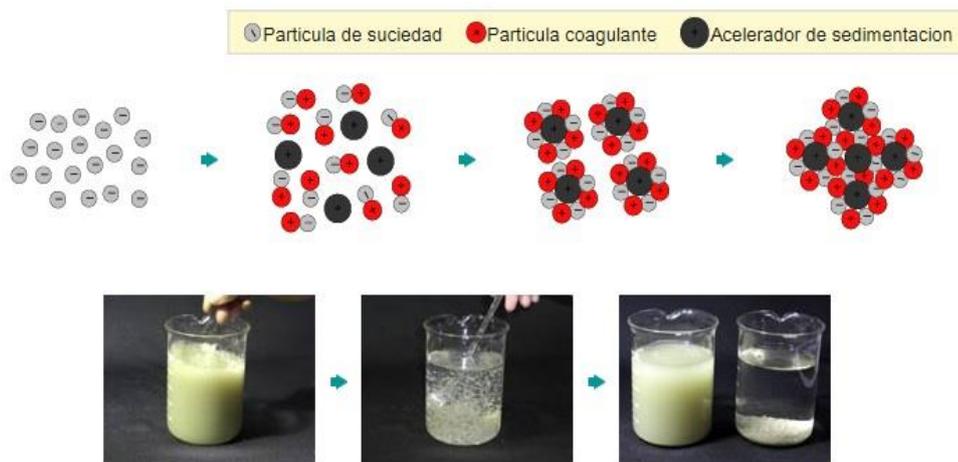
### **2.2.10. Floculación**

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, en el cual se agita la masa coagulada para permitir el crecimiento y la aglomeración de los flóculos recién formados, con el objetivo de aumentar su tamaño y peso para que sedimenten con facilidad. Los flóculos, inicialmente pequeños, se agrupan para formar aglomerados más grandes que pueden sedimentar. La floculación se favorece mediante una agitación lenta que permite que los flóculos se unan gradualmente;

un mezclado demasiado intenso puede romper los flóculos y dificultar su reagrupación en el tamaño y la fuerza óptimos. Además de aumentar el tamaño de las partículas de los flóculos, la floculación también incrementa su peso (Sánchez, S., et al., 2004).

## Figura 2

### Proceso de floculación



Fuente: Sánchez, S., et al 2004

### 2.2.10.1. Tipos de Floculación

Hay 2 tipos de floculación:

- Floculación Pericinética: Este tipo de floculación es resultado del movimiento natural de las moléculas de agua, inducido por la energía térmica. Este movimiento es comúnmente conocido como el movimiento browniano.
- Floculación Ortocinética: En este caso, la floculación se basa en las colisiones entre partículas debido al movimiento del agua, el cual es provocado por una energía externa a la masa de agua, pudiendo ser de origen mecánico o hidráulico. Después de la



coagulación del agua, es necesario que se produzca la aglomeración de los microfloculos; para lograr esto, primero ocurre la floculación pericinética, seguida por la floculación ortocinética.

#### **2.2.10.2. Parámetros de floculación**

Los parámetros que caracterizan la floculación son los siguientes

- Floculación Ortocinética: Este tipo de floculación se produce como resultado del grado de agitación proporcionado, ya sea mecánica o hidráulicamente.
- Gradiente de Velocidad: Se refiere a la energía necesaria para generar la mezcla adecuada durante el proceso de floculación.
- Número de colisiones: Hace referencia a la cantidad de choques entre los microfloculos durante la floculación.
- Tiempo de retención: Es el período durante el cual el agua permanece dentro de la unidad de floculación, siendo crucial para la efectividad del proceso.
- Densidad y tamaño de floculos: Son parámetros importantes que influyen en la sedimentación de los floculos formados durante la floculación.
- Volumen de lodos: Se refiere a la cantidad de lodos generados durante el proceso de floculación, y es importante que los floculos formados no sedimenten dentro de las unidades de floculación. .

#### **2.2.11. Cinética de adsorción**

En el proceso de adsorción, las moléculas de adsorbato se difunden sobre las partículas del adsorbente, a la capacidad de adsorción en equilibrio (basado en



un tiempo de contacto), es decir, a la velocidad con la cual la molécula específica pasa de la fase líquida a la fase sólida (Matus *et al*, 2011).

La cinética de adsorción describe la velocidad de atrapamiento del adsorbato, lo cual controla el tiempo de residencia de éste en la interfase solido-disolución y además su conocimiento permite predecir la velocidad a la cual el contaminante se remueve del efluente tratado, las cuales se determinan por experimentación y no pueden ser interferidas en ningún caso (Pinzón y Vera 2009). La adsorción de un adsorbato se efectúa según una sucesión de cuatro etapas cinéticas (López, 2003).

1. El primer paso implica el transporte del adsorbato o soluto en la fase líquida, lo cual suele ser rápido debido a la agitación presente.
2. El segundo paso consiste en el transporte a través de la película fija o capa superficial del líquido en el exterior del adsorbente, conocido como difusión de película.
3. La tercera etapa comprende la difusión en el poro, que puede ocurrir de dos maneras: difusión en el líquido dentro del poro y/o en sitios activos a lo largo de la superficie de las paredes del poro, denominada difusión superficial.
4. Por último, se produce la adsorción del soluto en la superficie interna del adsorbente.

#### **2.2.12. Modelos cinéticos de adsorción**

Son esenciales para determinar la dinámica del proceso de adsorción, existen gran variedad de modelos, sin embargo entre los más utilizados para describir procesos de adsorción en fase líquida se encuentran: los modelos de pseudo primer orden, pseudo segundo orden y difusión intrapartícula; siendo estos

los modelos que representan adecuadamente este tipo de mecanismo, mediante el coeficiente de correlación arrojado de la gráfica correspondiente al modelo, considerando que si  $R^2 = 1$  o entre más cercano se encuentre a 1 indica mejor ajuste (Gonzales *et al.*, 2011), al comprobar resultados experimentales obtenidos se llega a la comprensión de la cinética de adsorción de cloruros sobre carbón activado.

### 2.2.12.1. Modelo pseudo-primer orden

Fue el primer modelo basado en la capacidad de adsorción del sólido y supone que a cada ion se le asigna un sitio de adsorción en la matriz del adsorbente, en este modelo al igual que en el modelo de pseudo segundo orden se asume que la diferencia de concentraciones de adsorbato presentes en la solución y en la superficie, es la fuerza responsable de que ocurra un proceso de adsorción (Sun-Kou *et al.*, 2014), además se considera la transferencia de masa como la etapa controlante en el proceso, lo que quiere decir que la variación de la velocidad de adsorción en función del tiempo es directamente proporcional a la diferencia entre la concentración de equilibrio del adsorbato en la solución y la concentración del mismo sobre la superficie del carbón activado (Gallardo *et al.*, 2018), este modelo se rige bajo la siguiente ecuación, propuesta por Lagergren (Ariza *et al.*, 2016).

Ecuación pseudo-primer orden.

$$\frac{d_q}{d_t} = K_1 * (q_{eq} - qt)$$

Donde:

$qt$  = cantidad adsorbida en un tiempo  $t$  (mg/g)



$q_{eq}$  = cantidad adsorbida en el tiempo de equilibrio. (mg/g)

$k_1$  = constante de velocidad de adsorción. (min<sup>-1</sup>).

Integrando la ecuación y aplicando como condiciones de contorno a  $t = 0$ ,  $qt = 0$  y a  $t = t$   $qt = qt$ ; se obtiene la siguiente ecuación, según el desarrollo matemático (Yuh-Shan 2006), mostrado a continuación.

$$\ln \frac{q_{eq}}{q_{eq} - qt} = K_1$$

$$qt = q_{eq}(1 - e^{-k_1 t})$$

Ecuación lineal del modelo de pseudo-primer orden.

$$\log q_{eq} - qt = \log(q_{eq}) - \frac{K_1}{2,303} * t$$

Para comparar los valores de  $qe$  experimentales contra los teóricos se deben deducir los valores de  $K_1$  a partir de la pendiente y el intercepto, si se encuentra gran diferencia entre estos valores, la cinética de pseudo primer orden no describirá este sistema, lo cual se explica por la limitante de la difusión entre poros (Gonzales *et al.*, 2011).

#### 2.2.12.2. Modelo pseudo-segundo orden

Asume el mecanismo de adsorción como la etapa limitante (Gallardo et al., 2018), este modelo se basa en la capacidad de adsorción de equilibrio del sólido y se asocia a un mecanismo en donde la adsorción ocurre en más de un sitio activo del adsorbente, este modelo se representa por la ecuación para la velocidad cinética desarrollada por Ho y Mackay. En los últimos años este modelo se ha aplicado para describir el proceso de adsorción



de contaminantes presentes en solución acuosa sobre adsorbentes sólidos (Yuh-Shan ,2006). Con el objetivo de comprender el fenómeno de adsorción se presentan a continuación, la siguiente ecuación pseudo-segundo orden.

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2 * (q_{eq} - q_t)^2$$

Esta ecuación señala que la velocidad de adsorción es directamente proporcional al cuadrado de sitios disponibles. Esta ecuación se integra y se obtiene la siguiente ecuación pseudo-segundo orden.

$$\frac{t}{q_{eq}} = \frac{1}{K_2 * q_{eq}^2} + \frac{1}{q_{eq}} t$$

Donde:

$K_2$  = constante cinética de Pseudo-segundo orden (g/mg min)

$h$  = velocidad inicial de adsorción (mg/g min)

$$h = K_2 * q_{eq}^2$$

Para deducir las constantes cinéticas se debe graficar  $t/qt$  Vs  $t$ , obteniendo la concentración de equilibrio, denominada  $q_{eqcal}$  y la constante de la ecuación; solo si se obtiene una línea recta. Si el valor de la concentración en equilibrio  $q_{eqcal}$  está cerca al valor de la concentración experimental  $q_{eqcal}$ , la cinética se representa por el modelo cinético de segundo orden (Ariza et al., 2016).

## 2.2.13. Isotermas de adsorción

### 2.2.13.1. Isoterma de la adsorción de Langmuir

Esto refiere cuantitativamente la formación de un adsorbato de monocapa en la superficie exterior del adsorbente, y después de eso no tiene lugar más adsorción; De este modo, Langmuir representa la distribución de equilibrio de los iones metálicos entre las fases sólida y líquida; La isoterma de Langmuir es legítima para la adsorción en monocapa sobre una superficie que contiene un número finito de sitios idénticos; El modelo asume energías uniformes de adsorción sobre la superficie y no transmigración del adsorbato en el plano de la superficie, Langmuir representó la siguiente ecuación (Olatunya *et al.*, 2012).

$$q_e = \frac{q_o K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad \text{Ec.1}$$

Los parámetros de adsorción de Langmuir se determinaron transformando la ecuación de Langmuir (1) en una forma lineal.

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q_o} + \frac{1}{Q_o K_L C_e} \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

$C_e$  = la concentración de equilibrio del adsorbato ( $\text{mg/L}^{-1}$ )

$q_e$  = la cantidad de metal adsorbido por gramo del adsorbente en equilibrio ( $\text{mg/g}$ ).

$Q_o$  = capacidad máxima de cobertura en monocapa ( $\text{mg/g}$ )

$K_L$  = constante de isoterma de Langmuir ( $\text{L/mg}$ ).

Los valores de  $q_{\max}$  y  $K_L$  se calcularon a partir de la pendiente y la intersección de la gráfica de Langmuir de  $1/q_e$  versus  $1/C_e$ . Las características esenciales de la isoterma de Langmuir pueden expresarse en términos del parámetro de equilibrio  $R_L$ , que es una constante adimensional denominada factor de separación o parámetro de equilibrio (Olatunya *et al.*, 2012).

$$R_L = \frac{1}{1+(1+K_L C_0)} \quad \text{Ec.3}$$

Donde:

$C_0$  = concentración inicial

$K_L$  = la constante relacionada con la energía de adsorción (Langmuir Constante). El valor de  $R_L$  indica que la naturaleza de adsorción es desfavorable si  $R_L > 1$ ), lineal si  $R_L = 1$ , favorable si  $0 < R_L < 1$ , irreversible si  $R_L = 0$

### 2.2.13.2. Isoterma de la adsorción de Freundlich

Esto se usa comúnmente para describir las características de adsorción para la superficie heterogénea. Estos datos a menudo se ajustan a la ecuación empírica propuesta por Freundlich (Olatunya *et al.*, 2012).

$$Q_e = K_f C_e^{1/n} \quad \text{Ec.4}$$

Donde:

$K_f$  = constante de isoterma de Freundlich (mg/g)

$n$  = intensidad de adsorción.



$C_e$  = la concentración de equilibrio de adsorbato (mg/L)

$Q_e$  = la cantidad de metal adsorbido por gramo del adsorbente en equilibrio (mg/g)

La ecuación de linealización de la ecuación 4 se representa de la siguiente manera (Olatunya *et al.*, 2012).

$$\log Q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad \text{Ec. 5}$$

La constante  $K_f$  proporciona una estimación aproximada de la capacidad de adsorción, mientras que  $1/n$  representa la fuerza de adsorción en el proceso. Si  $n = 1$ , la partición entre las dos fases es independiente de la concentración. Un valor de  $1/n$  por debajo de uno indica una adsorción normal, mientras que por encima de uno sugiere una adsorción cooperativa. La función tiene un máximo asintótico a medida que la presión aumenta sin límite. Con el aumento de la temperatura, tanto  $K_f$  como  $n$  cambian para reflejar que la cantidad adsorbida aumenta más lentamente y se requieren presiones más altas para saturar la superficie. Estos parámetros deben determinarse mediante el ajuste de los datos, y la regresión lineal suele utilizarse para ello. El método de mínimos cuadrados lineales y las ecuaciones transformadas linealmente se han aplicado ampliamente para correlacionar los datos de sorción, donde  $1/n$  es un indicador de heterogeneidad; cuanto menor sea  $1/n$ , mayor será la heterogeneidad esperada. Esta expresión se reduce a una isoterma de adsorción lineal cuando  $1/n = 1$ . Un valor de  $n$  entre uno y diez indica un proceso de sorción favorable (Olatunya *et al.*, 2012).



### 2.2.14. Diseño experimental

Es una técnica estadística que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental. Se manipulan deliberadamente una o más variables, vinculadas a las causas, para medir el efecto que tienen en otra variable de interés. (Rosas, 2015)

### 2.2.15. Modelamiento matemático de primer orden

Método integral de análisis de datos. En el método de análisis se ensaya siempre una ecuación cinética particular, se integra y se compara los datos de concentración  $C$  frente al tiempo  $t$ . (Rosas, 2015)

$$-r_0 = -\frac{dC_A}{dt} = f(k, C) \quad \text{Ec.6}$$

$$-r_0 = -\frac{dC_A}{dt} = kf(C) \quad \text{Ec.7}$$

$$-\frac{dC_A}{f(C)} = kdt \quad \text{Ec.8}$$

$$C_A = C_{A0}(1 - X) \quad \text{Ec.9}$$

$$\int_{C_0}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A} = -k \int_0^t dt \quad \text{Ec.10}$$

$$\ln C_A - \ln C_{A0} = -kt \quad \text{Ec.11}$$



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. LUGAR DE EJECUCION

El proyecto de investigación utilizará como muestras las aguas de la bahía interior de la ciudad de Puno y el desarrollo del estudio de investigación se realizará en el ámbito de la ciudad de Puno y en los laboratorios de química de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano.

Ubicación:

Departamento: Puno

Provincia: Puno

Distrito: Puno

Los análisis se realizaron en los Laboratorios Servicios Analíticos Químico-Metalúrgico (RHLAB S.A.C.) - Juliaca

#### 3.2. MATERIALES

##### 3.2.1. Materia prima

Las aguas de la bahía interior de Puno, está ubicada a 15°50'34" S y 69°59'43" W, tiene una extensión de 16,1 km<sup>2</sup>, una profundidad media de 2,7 m; La bahía interior de Puno es somera y de poco flujo, características que combinadas con las altas entradas de nutrientes provenientes de los desagües de la ciudad de Puno; aguas contaminadas con metales pesados con iones cobre (Constantini et al., 2004).



### 3.2.2. Materiales y equipos

- Papel filtro
- Pipeta
- Bureta
- Mortero de Ágata
- Pipetas de 50, 20 y 5 ml.
- Probetas de 100 y 50 ml.
- Matraces Erlenmeyer de 250 ml.
- Tubos de ensayo
- Embudo de vidrio
- Vasos de precipitados
- Tubos de ensayo
- Vasos de vidrio
- Embudos
- Papel filtro Whatman N° 42

### 3.2.3. Reactivos

- $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , Sulfato de aluminio, como coagulante
- $\text{H}_2\text{O}$ , Agua destilada
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , Hidróxido de calcio, como floculante

Los reactivos sulfato de aluminio e hidróxido de calcio, ambos se adquirieron del laboratorio de Servicios Analíticos Químico-Metalúrgico (RHLAB S.A.C.).



### 3.2.4. Equipos e instrumentos

- Agitador “Jar-Test”, Marca CAT M6.1 (0-1600) rpm
- pH metro, Marca FISHER SCIENCE EDUCATION
- Espectrofotómetro de Absorción atómica
- Equipo de filtración, papel Filtro de 0,45µm
- Balanza analítica, Marca METTLER TOLEDO AB2 04 Max. 210 g Min. 10 mg

### 3.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La parte experimental se realizó de acuerdo a las siguientes experiencias:

1. Técnicas de muestreo
2. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos
3. Caracterizar la concentración de cobre (II) proveniente de las aguas residuales en la bahía de la ciudad de Puno.
4. Determinar los parámetros óptimos de pH, velocidad y tiempo de adsorción del proceso de remoción de cobre por floculación y precipitación alcalina.

#### 3.3.1. Técnicas de muestreo

Para realizar la toma de muestra se siguió un protocolo para nuestro tipo de agua, es decir, se utilizó la Norma Técnica Peruana (NTP) 214.060 para AGUAS RESIDUALES: Protocolo de muestreo de aguas residuales no domésticas que se descargan en la red de alcantarillado.

- Condición del punto de muestreo
- Consideración para el muestreo: tipo de muestra

- Preservación y almacenamiento de la muestra

Las diferentes muestras se tomaron en la Bahía interior de la ciudad de Puno de acuerdo a lo siguiente:

**a. Muestreo de las aguas residuales de la ciudad de Puno**

Se han tomado muestras de las aguas en la bahía interior de la ciudad de Puno en diferentes puntos, para los análisis químicos se colectaron un total de 8 muestras, cada muestra de 200 cm<sup>3</sup> se guardó en recipientes de polietileno, conservándose en refrigeración para su traslado al laboratorio.

La ubicación geográfica de los lugares de muestreo son los siguientes.

- 1- Toma de muestra de agua en el terminal de salida de carros interprovincial a 3 m de profundidad
- 2- Toma de muestra de agua a un costado de la isla Esteves a 2 m de profundidad
- 3- Toma de muestra de agua en el terminal portuario, salida a la isla de los Uros a 3 m de profundidad.

**Figura 3** Bahía interior de Puno



**Figura 4** Puntos de muestreo





### 3.4. CARACTERIZACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE COBRE (II) PROVENIENTE DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA BAHÍA INTERIOR DE LA CIUDAD DE PUNO

Esta parte de la metodología se basó en caracterizar la muestra de las aguas de la bahía interior de la ciudad de Puno, del Distrito de Puno, Provincia de Puno, Departamento de Puno.

- Análisis químico para ver las cantidades de Cu de acuerdo a la Ley General de Aguas D.L. N° 17752 y sus modificaciones al reglamento según el Decreto Supremo 004-2017-MINAM.

Los análisis se realizaron en los Laboratorios Servicios Analíticos Químico-Metalúrgico (RHLAB S.A.C.) - Juliaca

#### Tabla 2

*Valores límite de las aguas destinadas a la descarga de efluentes líquidos en ríos y lagos*

Metal	Valor límite de agua de descarga en lagunas y lagos
Cu (II)	Max. 0,1 mg/L

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

#### a. Análisis químicos de las aguas de la bahía interior de la ciudad de Puno

De acuerdo al análisis espectroscópico efectuado en las aguas de la bahía interior de la ciudad de Puno, la cantidad de cobre supera los límites máximos permisibles para el agua de descarga al lago.

**Tabla 3***Análisis químico del agua de la bahía interior de la ciudad de Puno*

Metal	Unidad de Medida	Análisis de las aguas residuales de la bahía interior	Límites máximos permisibles de descarga en los ríos y lagos D.S. 004-2017-MINAM
		Promedio de 8 muestras de Cu (mg/L)	Cu (mg/L)
Cobre	mg/L	0,175	0,1

Fuente: Laboratorios Servicios Analíticos Químico-Metalúrgico (RHLAB S.A.C.) - Juliaca

### 3.5. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE pH, VELOCIDAD Y TIEMPO DE ADSORCIÓN DEL PROCESO DE REMOCIÓN DE COBRE POR FLOCULACION Y PRECIPITACION ALCALINA.

#### 3.5.1. Parámetros de recuperación de Cu (II)

El modelo factorial propuesto ha demostrado una predicción adecuada para todos los puntos de diseño. Por lo tanto, hemos seleccionado tres variables que, según pruebas exploratorias, tienen un efecto significativo y mejoran la recuperación de iones de cobre mediante floculación y precipitación alcalina. Estas variables son el pH, la velocidad de agitación y el tiempo de residencia.

Dado que se busca evaluar el impacto de las tres variables en el rendimiento de remoción de cobre, se llevaron a cabo pruebas preliminares para determinar los niveles de cada una de ellas, como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 4***Variables para el diseño experimental*

<b>SIMBOLO</b>	<b>NOMBRES DE LAS VARIABLES</b>	<b>UNIDAD</b>
X <sub>1</sub>	pH	Escalar
X <sub>2</sub>	Velocidad de agitación	Rpm
X <sub>3</sub>	Tiempo de mezcla	minutos

**3.5.2. Proceso de precipitación alcalina (coagulación - floculación)**

El modelo factorial propuesto predice adecuadamente todos los puntos de diseño, por lo cual elegimos 3 variables. La precipitación alcalina es el método utilizado en esta tesis gracias a las características y las ventajas que presenta sobre otros métodos. Los compuestos químicos que se utilizaron como agente coagulante fue el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y, como precipitantes el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Tapia *et al.*, 2015).

La coagulación se llevó a cabo con la adición de sales de aluminio, este proceso es esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva, depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla. (Vargas, 2004).

Este proceso tiene como objetivo la recuperación del cobre de las aguas de la bahía del lago de la ciudad de Puno, para lo cual se utilizó para este propósito el equipo de prueba de jarras según lo siguiente:

1. Se tomaron 8 muestras de agua residual de la bahía del lago de la ciudad de Puno en vasos de precipitados de 200 mL cada uno.



2. Una vez instalado el equipo de jarras, se adicionó a cada muestra el sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) como coagulante, mililitro a mililitro hasta que se observó una buena formación de coágulos (se añadió diferentes dosis del mismo de forma que las concentraciones sean 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 mg/L, con una agitación de 120 rpm durante 20 minutos, se ajustó el pH de cada muestra a un pH distinto (3,45; 5; 6; 7,3; 8,5; 9; 10; 11).

**Tabla 5**

*Tratamiento de adición de coagulante*

Nº de Pruebas	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (mg/L)	pH
1	20	3,45
2	30	5,0
3	40	6,0
4	50	7,3
5	60	8,4
6	70	9,0
7	80	10,0
8	90	11,0

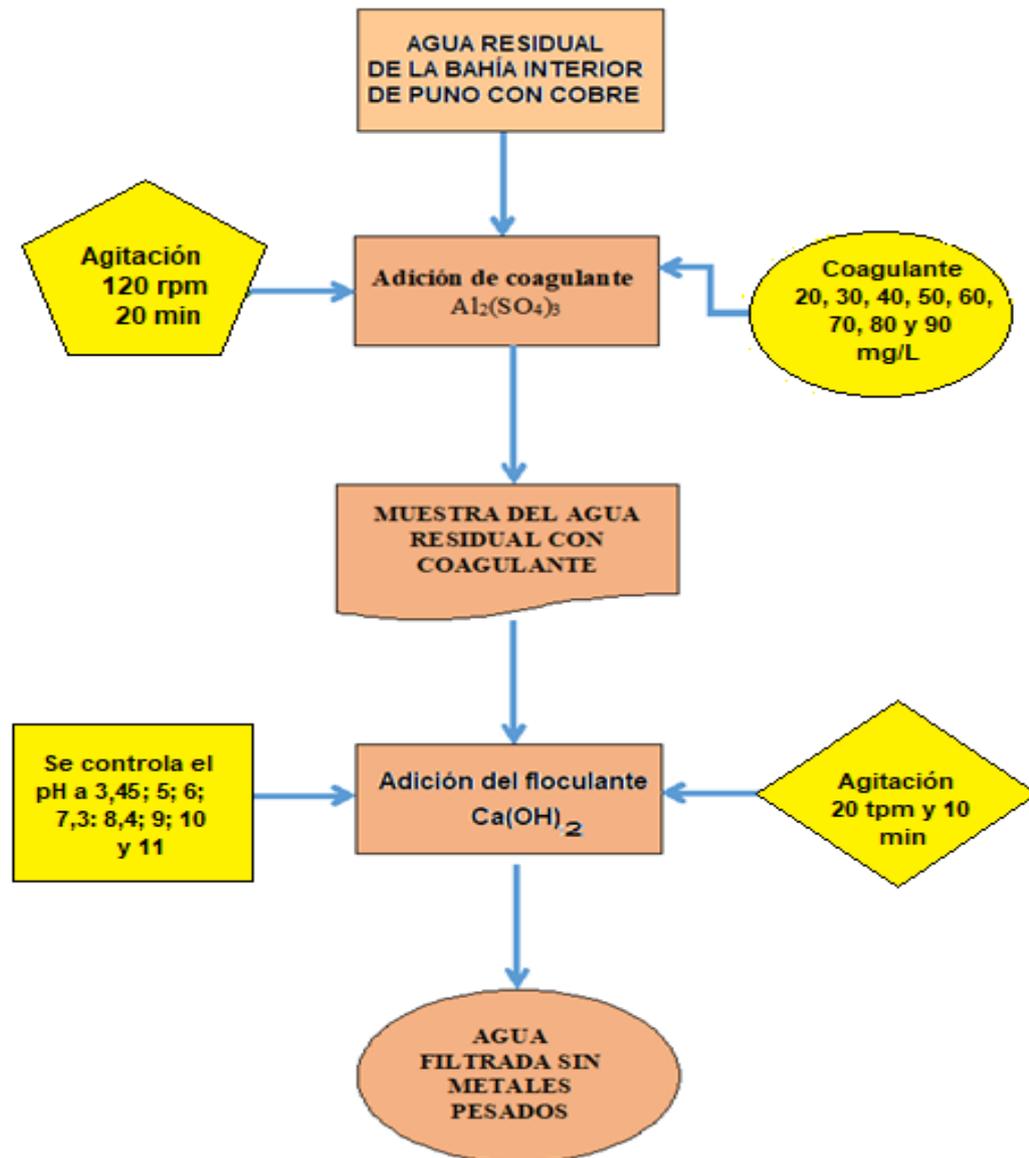
3. Se registró la concentración de la sustancia utilizada y se midió el pH.
4. Luego de transcurrido el tiempo de 20 min, se levantó el agitador, teniendo mucho cuidado de no romper los coágulos y se procedió a un ajuste del pH a diferentes valores para la floculación con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .
5. En cada uno de los vasos de precipitados del equipo de prueba de jarras, que contenían los coágulos formados se adicionó el hidróxido de calcio como coagulante, con una agitación suave de 20 rpm durante 10 min, una



- vez formados los flóculos estos se sedimentan automáticamente.
6. Se dejó sedimentar por 30 minutos y se registró el pH al cual había una mejor formación de coágulos.
  7. Se decantó y filtró el contenido de cada vaso de precipitado para luego ser llevados para su análisis a los Laboratorios de Servicios Analíticos Químico-Metalúrgico (RHLAB S.A.C.) ubicada en la ciudad de Juliaca.

### **Figura 5**

*Diagrama de flujo del proceso de precipitación alcalina de las aguas de la bahía interior de la ciudad de Puno*



Los experimentos de precipitación se llevaron a cabo bajo las condiciones óptimas que se detallan en la tabla siguiente:

**Tabla 6**

*Condiciones de operación en los experimentos de coagulación-floculación*

COAGULACIÓN	FLOCULANTE
20-100 mg/L $Al_2(SO_4)_3$ (10 %)	20 mg/L de $Ca(OH)_2$
Velocidad de agitación: 120 rpm	Velocidad de agitación: 20 rpm



---

Tiempo:20 min

Tiempo:10 min

---

### **3.6. DETERMINAR EL MODELO MATEMÁTICO Y LA CINÉTICA DE RECUPERACION DE COBRE DE LAS AGUAS DE LA BAHÍA INTERIOR DE PUNO POR PRECIPITACIÓN ALCALINA**

#### **3.6.1. Desarrollo del modelo matemático por experimentación y estadística**

##### **- Diseño factorial $2^k$**

El diseño factorial de experimentos es una técnica estadística que permite una planificación eficiente de la experimentación. Con un número mínimo de ensayos, este diseño permite determinar la importancia de cada variable independiente evaluada, así como el efecto de sus interacciones. Además, proporciona un modelo matemático empírico que sirve como base para un posterior proceso de optimización. Para llevar a cabo el desarrollo matemático experimental en nuestro estudio, hemos empleado el programa Statgraphics Centurión XVI.

En nuestro caso, los factores serán optimizados mediante experimentos factoriales generales, donde se consideran dos factores con dos niveles cada uno. El número total de experimentos a realizar se define mediante la siguiente relación:

$$N = 2^K$$

Donde:

N: Número de Experimentos.

K: Número de Variables.



Por lo que este diseño estadístico será utilizado en la investigación por adecuarse a los ensayos a realizar.

- **Identificación de las variables de trabajo**

Se ha propuesto un modelo factorial el cual predice adecuadamente todos los puntos de diseño, por lo trabajamos con 3 variables que de acuerdo a las pruebas exploratorias intervienen y mejoran la remoción de iones cobre por precipitación alcalina. Estas variables son: velocidad de agitación, tiempo de residencia en el reactor y pH.

Para evaluar el efecto de las tres variables en el rendimiento de la remoción de cobre, se llevaron a cabo pruebas preliminares para determinar los niveles de cada variable, los cuales se detallan en la siguiente tabla.

**Tabla 7***Variables para el diseño experimental*

<b>SIMBOLO</b>	<b>NOMBRE DE LAS VARIABLES</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>X mín. ( - )</b>	<b>X máx. ( + )</b>
X <sub>1</sub>	• pH	Escalar	3,45	11
X <sub>2</sub>	• Velocidad de agitación	Rpm	15	120
X <sub>3</sub>	• Tiempo de mezcla	Minutos	10	30

Para un diseño factorial  $2^3$  para tres variables originales (velocidad, tiempo de mezcla y pH), El método experimental a usar, se llevó a cabo tomando en cuenta las siguientes variables:

$$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+b_4X_1X_2+b_5X_1X_3+b_6X_2X_3+b_7X_1X_2X_3$$

Dónde:

Y = Variable respuesta Rendimiento

X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub> = Variables codificadas de entrada de velocidad, tiempo y pH

X<sub>1</sub>X<sub>2</sub>, X<sub>1</sub>X<sub>3</sub>, X<sub>2</sub>X<sub>3</sub>, X<sub>1</sub>X<sub>2</sub>X<sub>3</sub> = Interacciones entre las tres variables principales

Primero se determinaron los valores de X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> y X<sub>3</sub> en función de las variables de entrada del proceso, y luego se calcularon los valores de b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub> y b<sub>2</sub> (estimadores de los coeficientes de regresión) en relación con la variable respuesta, el rendimiento de extracción (Y).

### 3.6.2. Rendimiento de recuperación de cobre

La variable respuesta del diseño factorial se cuantifica en el porcentaje de rendimiento de cobre se determinó de la siguiente manera:



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

Dónde:

%R = Rendimiento de Cu

$W_1$  = Peso inicial de Cu

$W_2$  = Peso de Cu recuperado

**Tabla 8**

*Cálculo del % de rendimiento para el diseño factorial para el Cu*

Nº DE PRUEBA	$W_1$ (mg)	$W_2$ (mg)	RENDIMIENTO %
1	0.175	0.01728948	90.1203
2	0.175	0.01713023	90.2113
3	0.175	0.01712113	90.2165
4	0.175	0.01696188	90.3075
5	0.175	0.01656323	90.5353
6	0.175	0.01581370	90.6225
7	0.175	0.01637738	90.6415
8	<b>0.175</b>	0.01641063	<b>90.9636</b>

Conforme a lo establecido, el diseño factorial es de 08 corridas experimentales previamente combinadas, lo que nos da una visión de los efectos de las variables que permitirá visualizar los efectos y resultados finales.

### 3.6.3. Matriz de diseño

Con los datos de la tabla anterior, determinamos el número de pruebas experimentales a realizar combinando los valores máximo y mínimo de los dos factores establecidos. Para un diseño 2<sup>3</sup>, se realizan 8 pruebas experimentales, con 3 réplicas en el punto central de diseño, que corresponden a las pruebas 9, 10 y 11 de la matriz. Así, las siguientes combinaciones se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 9***Matriz de diseño factorial  $2^3=8$  para el Cu*

N° DE PRUEBA	DISEÑO	COMBINACION DE NIVELES			VARIABLE RESPUESTA (RENDIMIENTO %) "Y"
		pH X <sub>1</sub>	Tiempo X <sub>2</sub>	Velocidad X <sub>3</sub>	
1	[1]	3.5	10	15	90.1203
2	a	11	10	15	90.2113
3	b	3.5	30	15	90.2165
4	ab	11	30	15	90.3075
5	c	3.5	10	120	90.5353
6	ac	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>120</b>	<b>90.9636</b>
7	bc	3.5	30	120	90.6415
8	abc	11	30	120	90.6225

**3.6.4. Determinación de la cinética de adsorción de cobre (II)****3.6.4.1. Cinética de la adsorción**

La cinética de la adsorción describe la velocidad de atrapamiento del adsorbato, lo cual controla el tiempo de residencia de éste en la interfase sólido-disolución y además su conocimiento permite predecir la velocidad a la cual el contaminante se remueve del efluente tratado, por tal razón se requiere el conocimiento de las leyes de velocidad que describen el sistema de adsorción, las cuales se determinan por experimentación y no pueden ser inferidas en ningún caso. (Ho y McKay, 1999).

**3.6.4.2. Identificación del modelo cinético**

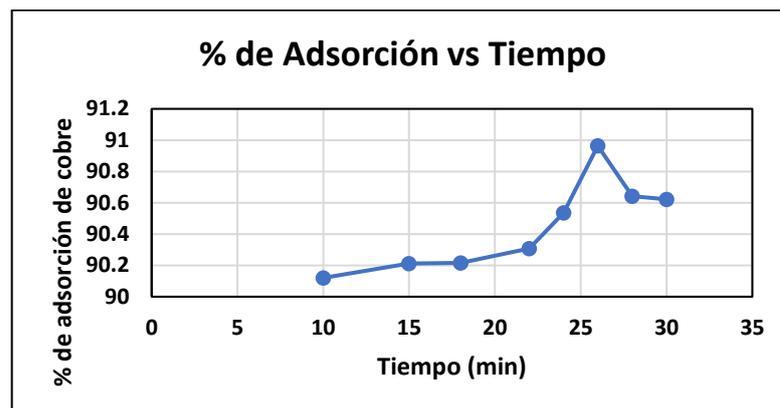
En la Figura 6, se muestran los resultados experimentales obtenidos, referidos al % de Adsorción Vs. Tiempo. En esta gráfica se observa que la cantidad de cobre adsorbida por unidad de masa de sólido adsorbente en función del tiempo, sigue una tendencia exponencial y se

encuentra favorecida con el aumento del pH. Alcanza el mayor porcentaje de adsorción a los 26 min.

Obtenidos los resultados experimentales, se procedió al análisis matemático de los mismos a fin de identificar el modelo cinético que mejor describe el proceso de adsorción en consideración. Para ello se realizó el tratamiento matemático de los mismos, con el fin de establecer qué modelo predice con mayor exactitud la cinética de adsorción.

**Figura 6**

*% de adsorción de cobre vs tiempo*



### 3.6.4.3. Modelo cinético de pseudo-primer orden

La expresión matemática correspondiente a la cinética de primer orden reversible se basa en la suposición de que a cada ión metálico se le asigna un sitio de adsorción del material adsorbente, lo cual en términos de velocidad de reacción se expresa como:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 * (q_e - q_t)$$

Donde:



$q_t$  = Cantidad adsorbida en el equilibrio (mmol/g)

$t$  = Tiempo (min)  $q_e$  (mmol/g) es la cantidad adsorbida y

$k_1$  = Constante cinética de primer orden (min<sup>-1</sup>)

Integrando la ecuación y aplicando como condiciones de contorno

a:

$$q_t = q_e * (1 + e^{-k_1*t})$$

### Tabla 10

*Datos para el modelo cinético de pseudo-primer orden*

N° de pruebas	Tiempo	q	Log de q
1	10	0.01728948	-1.76221807
2	15	0.01713023	-1.76623693
3	18	0.01712113	-1.7664677
4	22	0.01696188	-1.77052614
5	24	0.01656323	-1.7808551
6	26	0.0158137	-1.8009665
7	28	0.01637738	-1.78575571
8	30	0.01641063	-1.78487488

Teniendo en cuenta la tendencia exponencial de las curvas representadas en la Figura 6, se podría esperar que los datos cinéticos se ajustaran a un modelo cinético de primer orden.

#### 3.6.4.4. Modelo cinético de pseudo-primer orden

Este modelo fue desarrollado por Ho y McKay (1999), quienes propusieron que el adsorbato se adsorbe en dos sitios activos de la biomasa. Desde entonces, numerosas investigaciones han informado de un

mejor ajuste de los datos experimentales a este modelo, con coeficientes de correlación superiores a los de otros modelos probados. En este caso, la ecuación de velocidad de la cinética de adsorción se expresa como:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 * (q_e - q_t)^2$$

Integrando la ecuación anterior y manteniendo constantes las condiciones de contorno descritas para el modelo anterior, se tiene:

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 * q_e^2} + \frac{t}{q_e}}$$

Donde

$k_2$  es la constante cinética de Pseudo segundo orden (g/mmol.min)

$h = k_2 * q_e^2$  siendo  $h$  (mmol/g.min) la velocidad inicial de adsorción.

Basándonos en la revisión bibliográfica realizada, donde se ha informado un ajuste adecuado de los datos experimentales de procesos de adsorción de metales pesados desde una fase líquida a una fase sólida mediante un modelo cinético de pseudo segundo orden, podríamos anticipar que los datos cinéticos de esta experimentación se ajustarían a un modelo cinético de pseudo segundo orden. Sin embargo, en la Figura 14 se observa que los datos experimentales obtenidos no se ajustan de manera aceptable a este modelo. Esto se confirma con el valor del coeficiente de correlación, que es de 0,930, lo que indica que los datos experimentales no se ajustan adecuadamente a este modelo.



**Tabla 11**

*Datos para el modelo cinético de pseudo-segundo orden*

<b>N° de pruebas</b>	<b>Tiempo</b>	<b>q</b>	<b>Log de q</b>
1	10	0.01728948	578.386395
2	15	0.01713023	875.644986
3	18	0.01712113	1051.33248
4	22	0.01696188	1297.02604
5	24	0.01656323	1448.99274
6	26	0.0158137	1644.144
7	28	0.01637738	1709.67517
8	30	0.01641063	1828.08338



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. CONCENTRACION DE COBRE PROVENIENTE DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA BAHIA INTERIOR DE LA CIUDAD DE PUNO

##### 4.1.1. Caracterización inicial de las aguas de las aguas residuales en la bahía interior de la ciudad de puno

El primer objetivo consistió en caracterizar las muestras de agua residual de la bahía interior de la ciudad de Puno, la parte experimental se efectuó en el Laboratorio de Control de Calidad de Aguas de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA – Puno.

Los análisis de las muestras se realizaron en los Laboratorios Servicios Analíticos Químico-Metalúrgico (RHLAB S.A.C.) - Juliaca

**Tabla 12**

*Resultado de las pruebas de recuperación de Cu en las muestras de agua de la bahía interior de la ciudad de Puno*

Parámetro (mg/L)	Aguas de la bahía interior de la ciudad de puno		% promedio de recuperación
	Valor inicial, promedio de 8 muestras	Valor final recuperado promedio de 8 muestras	
Cobre	0,175	0.01670845	90.4523125

Fuente: Laboratorios Servicios Analíticos Químico-Metalúrgico (RHLAB S.A.C.) - Juliaca

**Tabla 13***Cobre recuperado de la muestra tratada*

<i>Nº de muestras</i>	<i>pH</i>	<i>% de recuperación de Cu de aguas de la bahía interior</i>
<i>1</i>	<i>3.45</i>	<i>90.1203</i>
<i>2</i>	<i>5.0</i>	<i>90.2113</i>
<i>3</i>	<i>6.0</i>	<i>90.2165</i>
<i>4</i>	<i>7.2</i>	<i>90.3075</i>
<i>5</i>	<i>8.3</i>	<i>90.5353</i>
<i>6</i>	<i>9.0</i>	<i>90.9636</i>
<i>7</i>	<i>10.0</i>	<i>90.6415</i>
<i>8</i>	<i>11.0</i>	<i>90.6225</i>

#### **4.2. PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL pH, VELOCIDAD Y TIEMPO DE ADSORCIÓN DEL PROCESO DE REMOCIÓN DE COBRE POR FLOCULACION Y PRECIPITACION ALCALINA.**

En el proceso de recuperación de cobre por floculación y precipitación alcalina, es importancia el pH, así como el factor tiempo de agitación.

La adición del catión metálico a través del sulfato de aluminio provoca un aumento automático del pH, tanto más alta sea la dosis del coagulante, y mayor sea la alcalinidad del agua.

Para determinar cómo influye el pH en el proceso de recuperación de cobre de las aguas de la bahía interior de la ciudad de Puno, utilizamos el modelo matemático por experimentación y estadística, se observa en el anexo C, el pH 11 conlleva para las aguas de la bahía a una velocidad de agitación de 120 rpm, tiempo de 10 min con un  $R^2=86,2791\%$

**Tabla 14***Concentración de cobre recuperado de las muestras tratadas por precipitación alcalina*

Nº de Pruebas	pH	Tiempo min	Velocidad	Concentración de Cu recuperado (mg/L)	RENDIMIENTO %
1	3,45	10	15	0.01728948	90.1203
2	11	10	15	0.01713023	90.2113
3	3,45	30	15	0.01712113	90.2165
4	11	30	15	0.01696188	90.3075
5	3,45	10	120	0.01656323	90.5353
6	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>120</b>	<b>0.0158137</b>	<b>90.9636</b>
7	3,45	30	120	0.01637738	90.6415
8	11	30	120	0.01641063	90.6225

La tabla 14 muestran el porcentaje de recuperación de cobre y su rendimiento, luego del proceso de precipitación alcalina con una concentración de cobre recuperado de 0.0158137 mg/L y un porcentaje de recuperación de 90,9636 %, para una velocidad de 120 rpm, tiempo de 10 min y un pH de 11.

#### **4.3. MODELO MATEMÁTICO Y CINÉTICA DE RECUPERACION DE COBRE DE LAS AGUAS DE LA BAHÍA INTERIOR DE PUNO POR PRECIPITACIÓN ALCALINA**

##### **4.3.1. Modelo matemático para la recuperación de cobre por precipitación alcalina**

El modelo matemático ha sido validado a través de los resultados experimentales y según el análisis estadístico realizado con el software Statgraphics Centurión XVI. De acuerdo con este análisis, se concluye que el pH=11 es la variable más significativa en el proceso de adsorción de cobre de las aguas de la bahía interior de la ciudad de Puno.



El coeficiente de correlación obtenido ha sido  $R^2 = 86,2791\%$  y el modelo matemático hallado es:

$$Y = 90.0149 + 0.0195795 * \text{pH} - 0.00053125 * \text{Tiempo} + 0.00454119 * \text{Velocidad}$$

#### 4.3.2. Cinética de la recuperación de remoción de cobre

Los datos experimentales de la cinética de adsorción fueron ajustados a los modelos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden. Estas curvas cinéticas fueron establecidas a partir de muestras de agua residual conteniendo cobre (II) de concentración inicial conocida variando parámetros como dosis del sorbente y concentración inicial del adsorbato. Los parámetros cinéticos obtenidos por la aplicación de los modelos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden, tales como las constantes cinéticas  $k_1$  y  $k_2$ , el coeficiente de correlación  $R^2$  y las capacidades de adsorción de cobre (II) en el equilibrio  $q_1$  y  $q_2$ , se encuentran en las tablas 11 y 12.

#### 4.3.3. Modelo cinético de pseudo primer orden

De acuerdo a nuestros resultados, se obtuvo una remoción del 99,86 % del total de iones cobre (II) de la solución a los 20 min.

El objetivo es determinar las constantes que rigen el modelo de pseudo primer orden, para lo cual es necesario graficar  $\log (q_e - q_t)$  en función del tiempo, como se muestra en la figura 7, luego se ha obtenido una ecuación lineal, en la que el intercepto es  $\log q_e$  y la pendiente es  $k_1$ . A partir de la concentración de cobre presente en el adsorbente, graficamos la respectivas variables asociadas al modelo de pseudo primer orden, obteniéndose una ecuación linealizada a la

respectiva concentración, en este caso el ejemplo es a una concentración inicial de 0,175 mg/L.

La diferencia entre  $q_{exp}$  y  $q_{cal}$ , se hace necesario despejar los diferentes valores que se ha obtenido en la recta, tal como se puede observar a continuación:

$$Y=0,0002x-1,815$$

$$R^2 = 0,9886$$

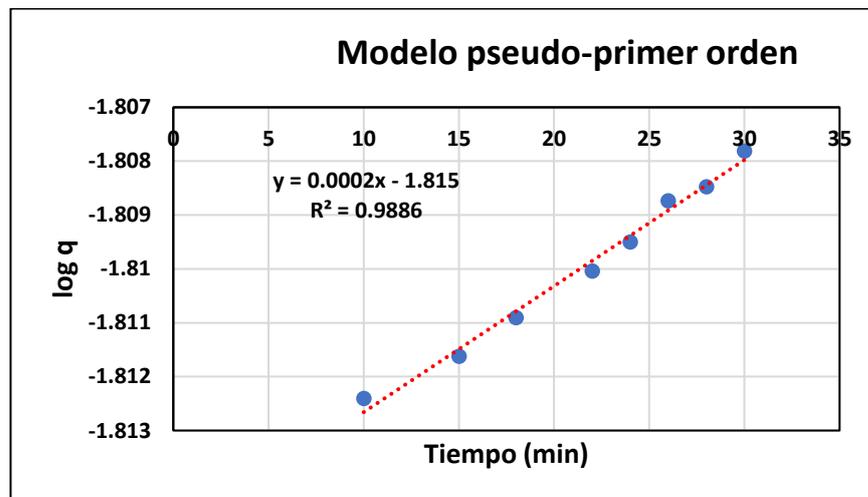
➤ Concentración en el adsorbato calculado

$$q_{cal} = Exp^{-1.815} = 0,1628$$

$$\frac{K_1}{2,303} = 0,0002 = K_1 = 0,0004606 \text{ min}^{-1}$$

**Figura 7**

*Modelo de primer orden para la adsorción de cobre*

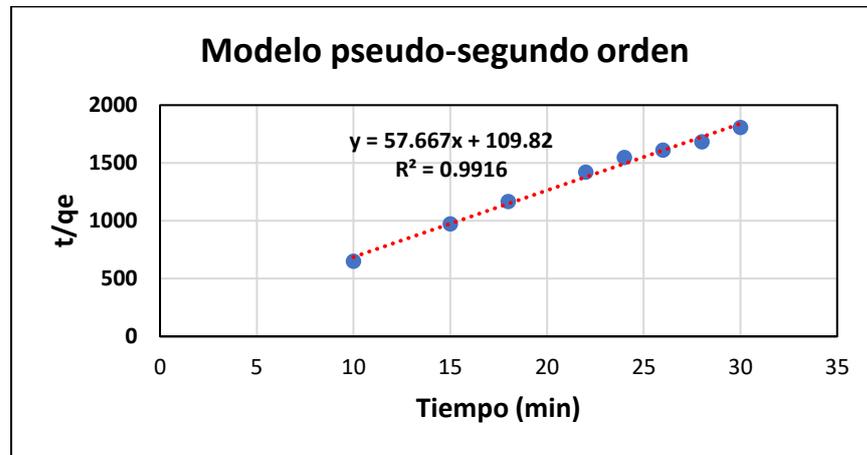


#### 4.3.4. Modelo cinético de pseudo segundo orden

De acuerdo a la figura 8, se puede observar que existe ajuste lineal en el modelo de pseudo-segundo orden cuyo coeficiente de correlación es de 0,9916.

**Figura 8**

*Modelo de segundo orden para la adsorción de cobre*



Los valores de  $K_2$  se calculan a una concentración inicial de 0,175 mg/L, con estos datos se obtuvo la siguiente ecuación lineal

$$Y=57,667x+109,82$$

$$R^2 = 0,9916$$

La constante asociada a la velocidad de adsorción se calculó de acuerdo a lo siguiente:

$$\frac{1}{q_e} = 57,667 \quad q_e = \frac{1}{57,667} = 0,01734094$$

$$\frac{1}{K_2 * q_e^2} = \frac{1}{57,667 * 0,01734094^2} = 30,2812 \text{ mg/g.min}$$

**Tabla 15***Valores de los modelos pseudo-primer orden y pseudo segundo orden*

<b>Modelo cinético</b>	<b>K<sub>1</sub> y K<sub>2</sub></b>	<b>q<sub>e</sub></b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>Primer orden</b>	0,0004606 min <sup>-1</sup>	0,1628	0,9986
<b>Segundo orden</b>	0,2812 min <sup>-1</sup>	0.01734094	0,9916

De acuerdo a un análisis de las cinéticas de pseudo-primer y segundo orden, podemos observar en la tabla 16 los valores de **K<sub>1</sub>**, **K<sub>2</sub>**, **q<sub>e</sub>** y **R<sup>2</sup>**, por lo que se puede explicar que el fenómeno de adsorción para el cobre con este modelo de regresión es de primer orden por el valor del coeficiente de regresión que es más cercano a 1 con un valor de 99,86.

**Tabla 16***Efectos estimados para Y*

<b>Efecto</b>	<b>Estimado</b>	<b>Error Estd.</b>	<b>V.I.F.</b>
<b>promedio</b>	90.4523	0.049781	
<b>A: pH</b>	0.147825	0.0995619	1.0
<b>B: Tiempo</b>	-0.010625	0.0995619	1.0
<b>C: Velocidad</b>	0.476825	0.0995619	1.0

Errores estándar basados en el error total con 4 Gl.

Esta tabla presenta las estimaciones para cada uno de los efectos y las interacciones estimadas. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, que mide su error de muestreo. Es importante destacar que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande es igual a 1.0000. En un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores tendrían un valor de 1. Factores de 10

o más suelen interpretarse como indicativos de una seria confusión entre los efectos.

**Tabla 17**

*Análisis de varianza para Y*

<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Razó n-F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>A: pH</b>	0.0437045	0.0437045	2.20	0.2118
<b>B: Tiempo</b>	0.000225781	0.000225781	0.01	0.9202
<b>C: Velocidad</b>	0.454724	0.454724	22.94	<b>0.0087</b>
<b>Error total</b>	0.0793006	0.0198252		
<b>Total (corr.)</b>	0.577955			

R-cuadrada = 86.2791 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 75.9884 por ciento

Error estándar del estimador = 0.1

Error absoluto medio = 0.0826187

Estadístico Durbin-Watson = 2.25752 (P=0.5781)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.250737

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Y en piezas separadas para cada uno de los efectos, luego prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 2 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, lo que indica que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0 por ciento.

El estadístico R-cuadrada indica que el modelo, ajustado de esta manera, explica el 86.2791 % de la variabilidad en Y. El estadístico R-cuadrada ajustada, más apropiado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es del 86.2826%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.0115392. El error medio absoluto (MAE) de 0.0826187 representa el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) evalúa los residuos para determinar si existe alguna correlación significativa basada en el orden de los datos en el archivo. Dado que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

### Tabla 18

*Coefficiente de regresión para Y*

<b>Coefficiente</b>	<b>Estimado</b>
constante	90.0149
A: pH	0.0195795
B: Tiempo	-0.00053125
C: Velocidad	0.00454119

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

$$Y = 90.0149 + 0.0195795 * \text{pH} - 0.00053125 * \text{Tiempo} + 0.00454119 * \text{Velocidad}$$

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

### Tabla 19

*Optimizar respuesta*

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
---------------	-------------	-------------	---------------

pH	3.45	11.0	11.0
Tiempo	10.0	30.0	10.0
Velocidad	15.0	120.0	120.0

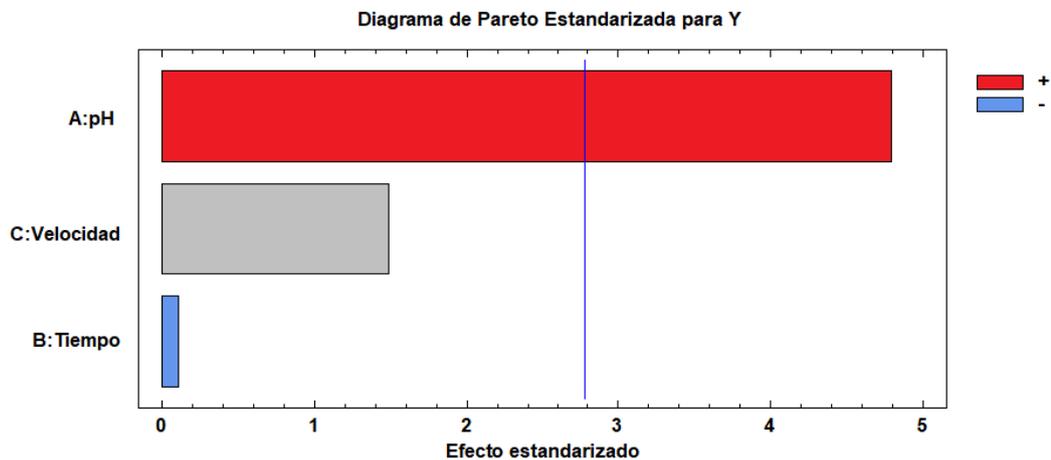
Meta: maximizar Y

Valor óptimo = 90.77

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Y sobre la región indicada.

### Figura 9

*Diagrama de Pareto*



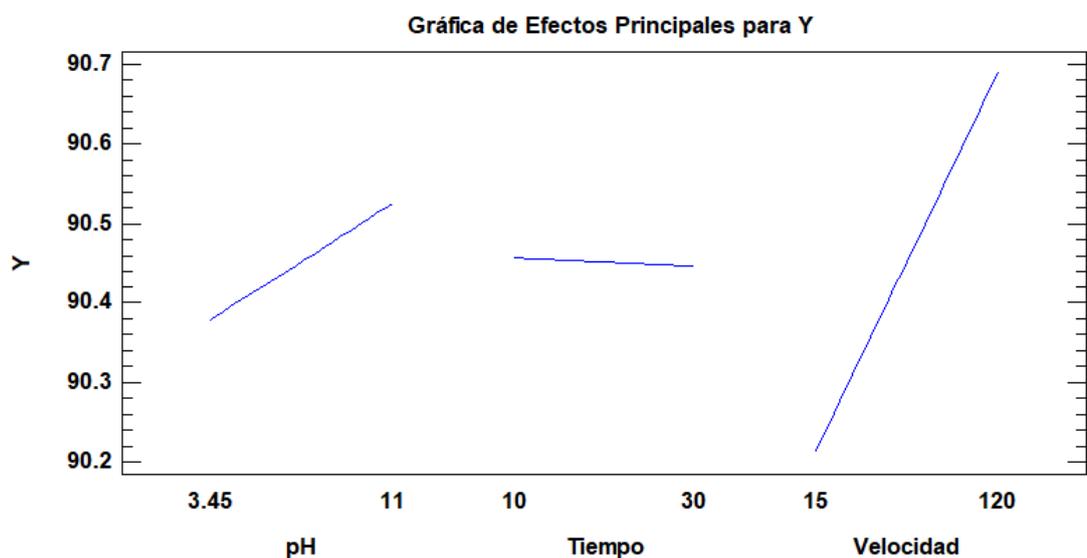
Esta ventana ilustra la ruta ascendente, que representa el trayecto desde el centro de la región experimental actual hasta el punto en el cual la respuesta estimada experimenta cambios notables con variaciones mínimas en los factores experimentales. Este tramo señala posiciones óptimas para llevar a cabo experimentos adicionales con el fin de aumentar o reducir el rendimiento. La figura 9 exhibe el diagrama de Pareto, una representación gráfica del análisis de varianza que detalla los factores más significativos y su impacto respectivo.

La recuperación (adsorción) de Cu, representada por el color rojo, guarda una relación directamente proporcional con la variable de respuesta, es decir, la

capacidad de adsorción de Cu. El gráfico incluye una línea vertical cuya posición se determina según un intervalo de confianza específico (89 %). Cualquier efecto que sobrepase esta línea será de considerable importancia para el proceso. Del diagrama se desprende claramente que el pH es la variable de mayor influencia, seguido por las cuadraturas del Tiempo.

### Figura 10

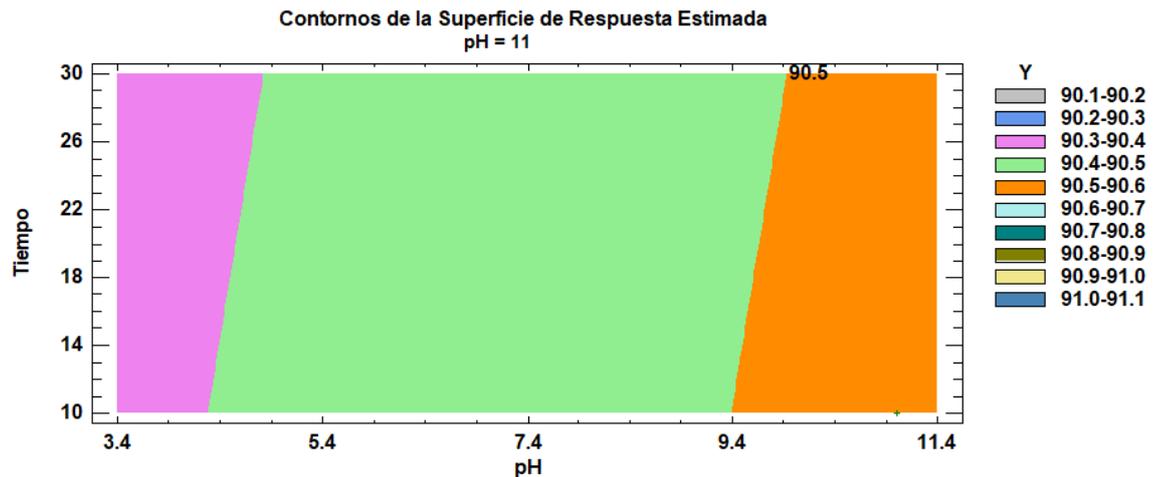
*Gráfica de efectos principales para Y*



En la figura 10, se observa que no hay interacción entre la combinación de las variables, lo que indica que estas variables son independientes, lo cual es consistente con la superficie respuesta. Las variables pH y velocidad muestran una tendencia hacia la regresión directa, mientras que el tiempo muestra una regresión inversa.

### Figura 11

*Contornos de superficie de la respuesta estimada*



Visualizando la figura (apolíneas) 11, podemos interpretar que el valor óptimo para el pH es 11; para el tiempo es 120 min. Esta ventana muestra la ruta ascendente (o descendente). Este es el camino del centro de la región experimental actual a lo largo de la cual la respuesta estimada varía rápidamente con una variación mínima en los factores experimentales.

#### 4.4. DISCUSIÓN

Apaza (2013), aplicando el proceso de precipitación alcalina utilizando hidróxido de calcio, obtuvo los siguientes resultados más relevantes obtenidos para el diseño experimental de superficie de respuestas: pH (9,77) para  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , respecto a la velocidad de mezcla (40 rpm) y para la velocidad de agitación (20 minutos), con estas variables se logró una eficiencia de remoción Pb (99,10%), Zn (99,50%) utilizando  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . De acuerdo al diseño experimental de superficie de respuestas se obtiene para el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  un: pH 9,77; velocidad de 30 rpm y tiempo de agitación 19,2 min.

En nuestro trabajo se utilizó un tiempo de 10 min con un pH de 11 a una velocidad de 120 rpm, recuperando un 90,9636 % de cobre, por el proceso de floculación y precipitación alcalina, los resultados difieren posiblemente por la diferencia de valores utilizados.



Chagua *et al.*, (2016), determinó la remoción de cobre presente en el agua, con una cantidad de cobre igual a 0.012 mg/L. Luego realizó el análisis físico – químico del agua determinando el comportamiento de la temperatura en la remoción, los tratados con Cu con un valor de 12.25 a 17.35°C. El comportamiento de pH en la remoción fueron los tratados con Cu de 2.58 a 3.68 de pH. Obtuvo la remoción de cobre por la planta, obteniendo la remoción de 5.00 a 0.93 ppm de Cobre. Los resultados indican que la planta nativa *Scirpus Californicus* (Totora) tiene la capacidad de almacenar en su estructura elementos contaminantes como son los metales, obteniéndose para el cobre una remoción de 81.50%, concluyendo que existe una relación logarítmica entre tiempos de contacto y % de remoción.

En nuestro trabajo utilizamos como coagulante el sulfato de aluminio como coagulante y como floculante el hidróxido de calcio para la remoción de cobre a temperatura ambiental, se obtuvo el modelo matemático para dicha investigación y se obtuvo la como resultado la cinética de primer orden con valores de  $K_1=0,0004606 \text{ min}^{-1}$ ,  $q_{e1}=0,1628$  y  $R_1=0,9986$  y difiere con los resultados de Chagua porque el utilizó como coagulante la planta nativa *Scirpus Californicus* (Totora) y en nuestro trabajo el sulfato de aluminio.

Tapia *et al.* (2015) investigaron la adsorción de Cu (II) a partir de una solución acuosa utilizando perlas de pectina. En su estudio, produjeron perlas esféricas de gel de pectina al gotear una solución al 4,0% de pectina, con un pH de 3,4, sobre una mezcla de alcohol al 96% y una solución 0,2 M de cloruro de calcio en una proporción de 1:1. El pH óptimo para la adsorción de los iones de Cu (II) se encontró en el intervalo de 4,5 a 5. Los datos experimentales de adsorción del Cu (II) por las perlas de pectina se ajustaron al modelo de Langmuir. Los valores de las constantes de la ecuación de Langmuir fueron  $q_{max}=8,77 \text{ mg/g}$  para la máxima capacidad de adsorción y  $b=0,027$  para la constante de



Langmuir. Según el estudio de la cinética del proceso de adsorción, se determinó que el equilibrio del proceso de adsorción se alcanza a los 250 minutos.

En nuestro trabajo de investigación cinética de recuperación y remoción de cobre (II) por floculación y precipitación alcalina de las aguas residuales en la Bahía de la ciudad de Puno, en relación a otros trabajos de investigación desarrollados para la recuperación de cobre y otros metales a través del desarrollo experimental de precipitación alcalina, utilizando sulfato de aluminio como coagulante e hidróxido de calcio como floculante, se obtuvo una recuperación del 90,9636 % a un tiempo de trabajo de 10 min, pH de 11 a una velocidad de 120 rpm, se obtuvo un modelo matemático cuyo coeficiente es de  $R^2=92,1615$  %.

Se trabajo con cinéticas de pseudo-primer orden y pseudo segundo orden, obteniéndose los siguientes los valores de  $K_1=0,0004606 \text{ min}^{-1}$ ,  $K_2=30,2812 \text{ min}^{-1}$ ,  $q_1=0,1628$ ,  $q_2=0.01734094$  y  $R_1=0,9986$  y  $R_2=0,9916$ , lo que determina que el trabajo de investigación tiene una cinética del primer orden.

Mi trabajo difiere del trabajo de investigación de Tapia quien utilizo como coagulante solución acuosa por perlas de pectina en cambio nosotros utilizamos sulfato de aluminio como coagulante y como floculante el hidróxido de calcio.

## V. CONCLUSIONES

- Las propiedades físicas y químicas del agua residual de la Bahía de la ciudad de Puno se caracterizaron mediante análisis químicos. Se determinó la cantidad de Cu II de acuerdo con la Ley General de Aguas D.L. N° 17752 y sus modificaciones al reglamento según el Decreto Supremo 004-2017-MINAM, que establece un límite máximo permisible de 0,175 mg/L. Después del proceso de precipitación alcalina, se logró recuperar una cantidad de 0,0158137 mg/L, lo que representa un 90,9636 % de recuperación.
- Los parámetros físico-químicos evaluados en el proceso de recuperación y remoción del cobre por el método de floculación y precipitación alcalina, utilizando  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  como floculante alcanzaron una velocidad de agitación óptima de 120 rpm, un tiempo de 20 minutos con una concentración de coagulante de 20 a 100 mg/L a un pH de 11, siendo el factor más significativo, la eficiencia de remoción de Cu II del 90,9636 %.
- Para determinar el modelo matemático del diseño experimental se utilizó el programa estadístico Statgraphics, el coeficiente de correlación obtenido fue de  $R^2=86,2791$  %. Por consiguiente, se concluye que el proceso de recuperación de cobre es adecuado, obteniéndose el siguiente modelo matemático.

$$Y = 90.0149 + 0.0195795 * \text{pH} - 0.00053125 * \text{Tiempo} + 0.00454119 * \text{Velocidad}$$

En el proceso de precipitación alcalina, la cinética química de recuperación de cobre II, se obtuvo los siguientes valores del modelo de pseudo primer orden y pseudo segundo orden de acuerdo a lo siguiente:

Modelo cinético	$K_1$ y $K_2$	$q_e$	$R^2$
Primer orden	0,0004606 $\text{min}^{-1}$	0,1628	0,9986



<b>Segundo orden</b>	30,2812	min <sup>-1</sup>	0.01734094	0,9916
--------------------------	---------	-------------------	------------	--------

El valor de correlación ( $R^2$ ) correspondiente al segundo orden arrojado es de 0.9916 en cambio el valor de  $R^2$  correspondiente al modelo de primer orden es superior a 0,9986, indicando que los iones cobre se adsorben en más de un sitio activo con el coagulante sulfato de aluminio, lo cual nos permite asumir que el proceso cumple con el pseudo-primer orden por el  $R^2$  que es más cercano al valor de 1.



## VI. RECOMENDACIONES

- Los gobiernos locales deben implementar regulaciones y establecer programas de control en colaboración con las empresas mineras para prevenir la liberación de contaminantes en el río mediante la recuperación de sus relaves.
- Se sugiere llevar a cabo análisis sobre metales pesados que no han sido evaluados en la presente investigación.
- Es importante desarrollar programas de remediación de relaves mineros como medida para prevenir la contaminación de las aguas del lago y restaurar la región a su estado natural anterior.
- Se requiere realizar estudios para determinar la concentración de las fuentes de aguas subterráneas.
- Se recomienda realizar evaluaciones de los pobladores, ganado y plantas que se encuentran en las orillas del lago para determinar el nivel de contaminación en la zona.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de Adsorbentes no convencionales. Universidad de la Frontera. Facultad de Ingeniería, Ciencias y Administración, Temuco, Chile
- Apaza A. (2013). Remoción de metales plomo (Pb) y zinc (Zn) de las aguas del río T'oro Q'ocha por precipitación alcalina en la ciudad de Juliaca. (Tesis de pregrado). UNA-Puno.  
[https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/1774/Apaza\\_Asqui\\_Derly\\_Willer.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/1774/Apaza_Asqui_Derly_Willer.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Alvaro O. (2011). Remoción de níquel presente en aguas efluentes industriales mediante utilización de sustratos de aserrín de pino. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia.  
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/881/1709>
- Ariza, L., Torres, Lady, & Blanco, D. (2016). Adsorption Kinetics of 2-Nitrophenol from Aqueous Solution on Activated Carbon. *Revista de Ciencias*, 20(2), 65–75.  
<http://www.scielo.org.co/pdf/rcien/v20n2/0121-1935-rcien-20-02-00065.pdf>
- Murgel, S. (1984). *Limnología sanitaria estudio de la polución de aguas continentales*. Washington, D.C. secretaria general de los estados americanos.
- Constantini, M., Sabetta, L., & Rossi, L. (2004). Spatial variability of the decomposition rate of *Schoenoplectus tatora* in a polluted area of Lake Titicaca. *Journal Of Tropical Ecology*, 20(3), 325–335.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1017/S0266467403001214>
- Cosme M. (2017). Influencia del tipo y concentración de coagulante en la remoción de plomo. Universidad Nacional del Centro del Perú. (Tesis de pregrado), Huancayo.  
<https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3794/Cosme%20Marticorena-Zevallos%20Osores.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cortes, R. (2007). Efecto de la modificación de una zeolita natural mexicana en la sorción de cadmio y 4-clorofenol. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México.



[https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/39/027/39027968.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/027/39027968.pdf)

- Cueva C. (2014). Diseño de experimentos en la remoción de metales pesados en aguas. (Tesis de Pregrado). UNI, Lima. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/4444>
- Chagua R. (2016). Evaluación de remoción de cobre y zinc por la planta nativa scirpus californicus (totora) en la comunidad de Pomachaca – Tarma. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú. <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/1939/Chagua%20Orosco%20-%20Tardio%20Osorio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Duffus, J.H. (2002). Heavy Metals a meaningless term? Pure and Applied Chemistry, 74 (5), pp.793-807. <http://dx.doi.org/10.1351/pac200274050793>
- Gallardo, E., Maioco, S., & Francois, N. (2018). Remoción de un colorante básico por adsorción con quitosano y con un material compuesto de quitosano-zeolita. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires; 4,5. <https://www.ina.gob.ar/ifrh-2014/Eje2/2.10.pdf>
- Gonzalez, J., Giraldo, L., Moreno, C. (2011). Adsorción de fenol en soluciones acuosas empleando monolitos de carbón activado de cascara de coco: Isotermas y cinéticas de adsorción. En: Afinidad LXVIII, N° 45. 2011. 291-292 p. ISSN 0001-9704. <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/268109/355689>
- Heinke, G. & Glynn, H. (1999). Ingeniería ambiental. México, PRENTICE HALL. [https://biblioasesorbogota.files.wordpress.com/2013/04/ingenieria-ambiental\\_glynn.pdf](https://biblioasesorbogota.files.wordpress.com/2013/04/ingenieria-ambiental_glynn.pdf)
- Lara, R. (2007). Control de la Contaminación por Metales Pesados de las aguas residuales. México: LIMUSA. <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>
- López, R. (2016). Recuperación de manganeso presente en las aguas residuales proveniente de la mina Geza Minerales Asís, por coagulación y floculación. (Tesis de pregrado). UNA, Puno. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5062>



- López, V., Moreno, C., Rivera, J., & Radovic, L. (2003). Ionic strength effects in aqueous phase adsorption of metal ions on activated carbons [4]. *Carbon*, 41(10), 2020-2022. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(03\)00184-2](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(03)00184-2)
- Matus, I., Paniagua, L., & Benavente, M. (2011). Estudio de la cinética de adsorción de Cu y Hg a partir de soluciones binarias usando quitosano. Trabajo de investigación. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5006258.pdf>
- Meza, R., & Mallaupoma, M. (2018). Adsorción de iones Cu (II) desde soluciones acuosas utilizando nanoarcillas. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del centro del Perú, Huancayo. <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3775/Meza%20Ramos-Mallaupoma%20Mu%c3%b1oz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ministerio de Salud (2013). Obtenido-Contaminación con Metales Pesados 30/03/13. [www.minsa.gob.pe/portada/est\\_san/cmposq.htm](http://www.minsa.gob.pe/portada/est_san/cmposq.htm)
- Moreno, E., Argota, G., Alfaro, R., Aparicio, M., Atencio, S., & Goyzueta, G. (2017). Determinación interactiva de metales totales en las aguas de la bahía interior del Lago Titicaca- Puno Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 19(2), 125-134. <https://dx.doi.org/10.18271/ria.2017.271>
- Olatunya, A., Dada, A., Olalekan, A., & Dada, O. (2012). Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of Zn<sup>2+</sup> Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk. *IOSR-JAC*, 8. <https://www.iosrjournals.org/iosr-jac/papers/vol3-issue1/J0313845.pdf>
- Pinto, J. (2008). Nuevas alternativas para la simplificación y mejora de la metodología de análisis de metales pesados en muestras ambientales. Trabajo de Investigación. Universidad de Barcelona, España. <https://rodin.uca.es/bitstream/handle/10498/15649/JJPintoGanformina.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pinzón, B., & Vera V. (2009). Modelamiento de la cinética de bioadsorción de Cr (III) usando cascara de naranja. Universidad de Pamplona. <https://www.redalyc.org/pdf/496/49612068033.pdf>



- Ribeiro, M., Paim, T., & Rocha, S. (2008). Utilización de hidróxido de magnesio en la precipitación de metales pesados. Revista de la facultad de ingenierías. Universidad de Atacama. Chile.  
<https://revistaingenieria.uda.cl/Publicaciones/220003.pdf>
- Rivera, L. (2001), Validación de parámetros de pH y tiempos de mezclado y asentamiento para el proceso de precipitación de metales pesados en efluentes de aguas usadas en Baxter Caribe inc. Tesis ciencias ambientales. Universidad del Turabo. Puerto Rico.
- Sun-Kou, M., Valencia, D., Flores, A., Doing, A., & Orejón, J. (2014). Adsorción de metales pesados empleando carbones activados preparados a partir de semillas de Aguaje. Revista de la Sociedad Química del Perú, 80(4), 225-236.  
[http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1810-634X2014000400002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2014000400002&lng=es&tlng=es).
- Tapia, N. (2007), Biosorción del Plomo (I) por cascara de naranja “Citrus Cinensis” pretratada, Universidad Mayor de San Marcos.  
<https://core.ac.uk/download/pdf/323353409.pdf>
- Tapia, H., Huizar, R., Yarango, R., & Rojas, N. (2015). Estudio de la adsorción de Cu (II) a partir de solución acuosa por perlas de pectina. Tesis de pregrado. UNMSM, Lima.  
<https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/download/11326/10156/39638>
- Vargas, L. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Organización Panamericana de la Salud, Lima.  
[https://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1\\_tomo1\\_indice.pdf](https://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1_tomo1_indice.pdf)
- Vilca C. (2018). Recuperación de cadmio y zinc en la unidad minera el cofre con el reactivo mpp50 por coagulación – floculación. (Tesis de pregrado). UNA, Puno.  
[https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/11155/Vilca\\_Cabana\\_Sebastian\\_Ramiro.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/11155/Vilca_Cabana_Sebastian_Ramiro.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Yañez, F. (2007). Grandinvest Art. Clarificación DAF Tratamiento químico grupo andino de inversiones SAC.



Ho Y. S. (2006). Review of second-order models for adsorption systems. *Journal of hazardous materials*, 136(3), 681–689.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.12.043>



## ANEXOS

## ANEXO 1. Estándares de Calidad Ambiental (ECA)

**Tabla 20**

*Estándares de Calidad Ambiental (ECA) Categoría 4 aprobados con decreto supremo N° 004-2017-MINAM.*

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
Cianuro Libre	mg/L	52		0,0052	0,0052	0,001	0,001
Clorofila A	mg/L	8		**	**	**	**
Conductividad	( $\mu$ S/cm)	0		1 000	1 000	**	**
Fenoles	mg/L			2,56	2,56	5,8	5,8
Fósforo total	mg/L	5		0,05	0,05	0,124	0,062
Nitratos (NO <sub>3</sub> -) (c)	mg/L			13	13	200	200
Amoniaco Total (NH <sub>3</sub> )	mg/L			(1)	(1)	(2)	(2)
Nitrógeno Total	mg/L	5		**	**	**	**
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L			≥ 5	≥ 5	≥ 4	≥ 4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	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			≤ 100	≤ 400	≤ 100	≤ 30
Sulfuros	mg/L	2		0,002	0,002	0,002	0,002
Temperatura	°C			Δ 3	Δ 3	Δ 2	Δ 2
<b>INORGÁNICOS</b>							
Antimonio	mg/L			0,64	0,64	**	**
Arsénico	mg/L			0,15	0,15	0,036	0,036
Bario	mg/L			0,7	1	1	**
Cadmio Disuelto	mg/L	0,25		0,00025	0,00025	0,0088	0,0088
Cobre	mg/L			0,1	0,1	0,05	0,05
Cromo VI	mg/L	1		0,011	0,011	0,05	0,05
Mercurio	mg/L	0,1		0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Níquel	mg/L	2		0,052	0,052	0,0082	0,0082
Plomo	mg/L	25		0,0025	0,0025	0,0081	0,0081
Selenio	mg/L	5		0,005	0,005	0,071	0,071
Talio	mg/L	0,8		0,0008	0,0008	**	**
Zinc	mg/L	0,12		0,12	0,12	0,081	0,081



## ANEXO 2. Cálculos de la metodología de investigación

### CALCULOS DE LA METODOLOGIA DE INVESTIGACION

#### ➤ RENDIMIENTO DE RECUPERACION DEL COBRE

El rendimiento de recuperación del cobre se calculó con la siguiente

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

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 precipitación alcalina

**Tabla 21**

*Calculo del % de rendimiento para el diseño factorial matemático*

Concentración Inicial de cobre (mg/L)	Concentración final de Cu (mg/L)	RENDIMIENTO %
0,175	0.01728948	90.1203
0,175	0.01713023	90.2113
0,175	0.01712113	90.2165
0,175	0.01696188	90.3075
0,175	0.01656323	90.5353
0,175	0.0158137	90.9636
0,175	0.01637738	90.6415
0,175	0.01641063	90.6225

$$1. \% = \frac{0,175 - 0.01728948}{0,175} \times 100 = 90.1203$$

$$2. \% = \frac{0,175 - 0.01713023}{0,175} \times 100 = 90.2113$$



$$3. \% = \frac{0,175-0,01712113}{0,175} \times 100 = 90.2165$$
$$4. \% = \frac{0,175-0,01696188}{0,175} \times 100 = 90.3075$$
$$5. \% = \frac{0,175-0,01656323}{0,175} \times 100 = 90.5353$$
$$6. \% = \frac{0,175-0,0158137}{0,175} \times 100 = 90.9636$$
$$7. \% = \frac{0,175-0,01637738}{0,175} \times 100 = 90.6415$$
$$8. \% = \frac{0,175-0,01641063}{0,175} \times 100 = 90.6225$$

### ANEXO 3. Panel fotográfico

**Figura 12**

*Toma de muestras en el terminal de salida de carros interprovincial*



**Figura 13**

*Toma de muestra de agua a un costado de la isla Esteves*



**Figura 14**

*Toma de muestras de agua en el puerto de salida a los Uros*



**Figura 15**

*Pesando el coagulante sulfato de aluminio*



**Figura 16**

*Tomado de pH de cada una de la muestra de agua conteniendo Cu*



**Figura 17**

*Colocando las muestras de agua en el equipo Jar-Tes para su agitación*



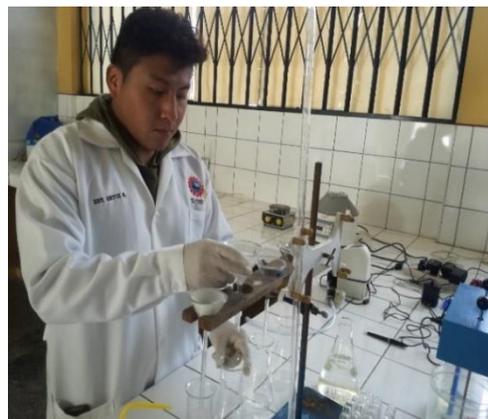
**Figura 18**

*Proceso de filtración de las muestras después de la precipitación alcalina*



**Figura 19**

*Filtración de las muestras luego de la precipitación alcalina*



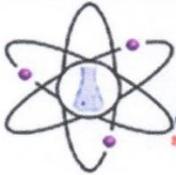
**Figura 20**

*Muestras listas para ser llevados a su análisis final*





## ANEXO 4. Certificado de análisis



**RHLAB S.A.C.**  
SERVICIOS ANALÍTICOS QUÍMICO - METALÚRGICO

**RH-M91-1264**

### INFORME DE ENSAYO

---

**DATOS DEL CLIENTE**

A SOLICITUD DE : **Bach. RONMEL DIONEL ORTIZ COILA**

ASUNTO : **Determinación Analítica del contenido metálico total en la muestra**

**CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DE LA MUESTRA**

DENOMINACIÓN DE LA MUESTRA : **Muestra agua residual Bahía de la ciudad de Puno**

CANTIDAD DE MUESTRAS : **01**

SOLICITUD DE ENSAYO : **Análisis Químico elemento cobre (II) por**

MOTIVO : **Cinética de recuperación y remoción de cobre (II) por**  
**floculación y precipitación alcalina de las aguas residuales**  
**en la bahía de la ciudad de Puno,**

RECEPCIÓN DE MUESTRAS : **Botella de vidrio, debidamente conservado**

FECHA DE REALIZACIÓN DEL ENSAYO : **15/07/2022 al 21/07/2022**

---

**DETALLE DEL INFORME**

---

#### RESULTADO DE ENSAYO

Fecha de Muestreo		22/07/2022
Nombre de Muestra		Muestra de agua residual
Parámetro	Unidad	Resultado
ENSAYOS DE METALES – Metales Totales por Espectrofotometría de Absorción Atómica		
Cobre (Cu)	mg/L	0,174

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

---

**MÉTODOS DE REFERENCIA**

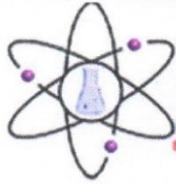
- \* Determinación de cobre (Cu) en agua – Método Espectrofotometría de Absorción Atómica



**RHLAB S.A.C.**  
Ing. *[Signature]*  
GERENTE GENERAL

---

**Av. Mártires del 4 de Noviembre N° 2414 (Salida Puno - Frente a Covisur)  
Cel 978645481 - 935008040**



## INFORME DE ENSAYO

### DATOS DEL CLIENTE

A SOLICITUD DE : **Bach. RONMEL DIONEL ORTIZ COILA**  
 ASUNTO : Determinación Analítica del contenido metálico total en la muestra

CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DE LA MUESTRA  
 DENOMINACIÓN DE LA MUESTRA : Muestra agua residual Bahía de la ciudad de Puno  
 CANTIDAD DE MUESTRAS : 08  
 SOLICITUD DE ENSAYO : Análisis Químico elemento Cobre (Cu)  
 MOTIVO : Cinética de recuperación y remoción de cobre (II) por floculación y precipitación alcalina de las aguas residuales en la bahía de la ciudad de Puno.

RECEPCIÓN DE MUESTRAS : Botella de vidrio, debidamente conservado

FECHA DE REALIZACIÓN DEL ENSAYO : 02/08/2022 al 09/08/2022

DETALLE DEL INFORME

### RESULTADO DE ENSAYO

Fecha de Muestreo	10/08/2022	
Hora de Muestreo		
Parámetro	Unidad	Cobre (Cu)
ENSAYOS DE METALES – Metales Totales por Espectrofotometría de Absorción Atómica		
Muestra 01	mg/L	0.01728948
Muestra 02	mg/L	0.01713023
Muestra 03	mg/L	0.01712113
Muestra 04	mg/L	0.01696188
Muestra 05	mg/L	0.01656323
Muestra 06	mg/L	0.01581370
Muestra 07	mg/L	0.01637738
Muestra 08	mg/L	0.01641063

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

### MÉTODOS DE REFERENCIA

- \* Determinación de cobre (Cu) en agua – Método Espectrofotometría de Absorción Atómica

**RHLAB S.A.C.**  
  
 Ing. Gladys Huayrapata Bique  
 GERENTE GENERAL

Av. Mártires del 4 de Noviembre N° 2414 (Salida Puno - Frente a Covisur)  
 Cel 978645481 - 935008040



## ANEXO 5. Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Rommel Dionel Ortiz Coila,  
identificado con DNI 75497920 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 denominada:

" Cinética de Reuperación y Remoción de Cobre (II) por  
floculación y precipitación alcalina de las aguas residuales  
en la bahía 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 25 de enero del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



## ANEXO 6. Autorización para el depósito de tesis en el repositorio institucional



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

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

Por el presente documento, Yo Rommel Dionel Ortiz Coila  
identificado con DNI 75497920 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 denominada:

“ Cinética de recuperación y remoción de cobre (II) por  
floculación y precipitación alcalina de las aguas residuales  
en la bahía de la ciudad de Puno ”

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

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 25 de enero del 20 24

FIRMA (obligatoria)



Huella