



Universidad de Concepción  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Química



# OPTIMIZACIÓN DE LA DESORCIÓN DE COBRE UTILIZANDO GRÁNULOS DE BIOREACTORES

POR

Ignacio Alejandro Fernández Guglielmi

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de  
Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Químico

Profesora Guía:

Marlene Doris Roeckel von Bennewitz

Profesora de Comisión:

Katherina Fernández Elgueta

Abril, 2024

Concepción, Chile

©2024, Ignacio Alejandro Fernández Guglielmi

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

## Resumen

El lodo aeróbico granular (AGS) puede ser utilizado como un material adsorbente de metales pesados en el tratamiento de aguas. Sin embargo, la desorción de metales es aún un campo sin explorar. Este estudio se enfoca en la optimización del proceso de desorción de cobre, mediante un diseño experimental. La presencia de iones de cobre en efluentes industriales representa un desafío ambiental significativo debido a su toxicidad y persistencia.

El objetivo principal del estudio fue determinar las condiciones óptimas para maximizar el rendimiento de desorción de cobre desde AGS, utilizando un diseño experimental *Full Factorial* de dos factores y tres niveles. La metodología incluyó la caracterización de AGS, cinética de desorción, descripción del diseño aplicado y ensayos de adsorción y desorción. Se realizaron ensayos de adsorción de cobre con concentraciones entre 1 mg/L a 500 mg/L. Los AGS adsorbieron una concentración de cobre de 0,56 mg/L. La optimización de la desorción se realizó variando la temperatura en un rango de 15 °C y 35 °C y la concentración del agente desorbedor (NaCl) entre 0,1 mol/L (5,84 g/L) y 1,9 mol/L (111 g/L), según la combinación de niveles establecidos por el diseño.

Los resultados revelaron que la concentración de NaCl es el factor más influyente en la desorción, con un modelo predictivo que sugiere que las condiciones óptimas para la desorción de cobre son una temperatura de 35 °C y una concentración de NaCl de 1,9 mol/L (111 g/L), alcanzando un porcentaje de desorción predictivo de 75,12% dentro de un tiempo de desorción de 1,5 horas.

Estos resultados demuestran que los AGS no sólo son efectivos para la adsorción de cobre, sino que también permiten su recuperación eficiente, ofreciendo un enfoque sustentable para el tratamiento de aguas residuales y la reutilización de metales valiosos, lo que permite avanzar en los sistemas de tratamiento de agua en procesos de economía circular.

## Summary

Aerobic Granular Sludge (AGS) can be used as an adsorbent material for heavy metals in water treatment. However, metal desorption remains an unexplored field. This study focuses on optimizing the copper desorption process through experimental design. The presence of copper ions in industrial effluents poses a significant environmental challenge due to their toxicity and persistence.

The main objective of the study was to determine the optimal conditions to maximize copper desorption performance from AGS using a Full Factorial experimental design with two factors and three levels. The methodology included AGS characterization, desorption kinetics, description of the applied design, and adsorption and desorption assays. Copper adsorption tests were conducted with concentrations ranging from 1 mg/L to 500 mg/L. The AGS adsorbed a copper concentration of 0,56 mg/L. Desorption optimization was performed by varying the temperature within a range of 15°C to 35°C and the concentration of the desorbing agent (NaCl) between 0,1 mol/L (5,84 g/L) and 1,9 mol/L (111 g/L), according to the combination of levels established by the design.

The results revealed that the NaCl concentration is the most influential factor in desorption, with a predictive model suggesting that the optimal conditions for copper desorption are a temperature of 35°C and a NaCl concentration of 1,9 mol/L (111 g/L), achieving a predictive desorption percentage of 75,12% within a desorption time of 1,5 hours.

These results demonstrate that AGS is not only effective for copper adsorption but also enables efficient recovery, offering a sustainable approach for wastewater treatment and the reuse of valuable metals, thus advancing water treatment systems in circular economy processes.

# Índice

Resumen.....	3
Summary .....	4
Lista de Tablas .....	6
Lista de Figuras.....	7
Simbología y Abreviaciones .....	8
1. Introducción .....	9
2. Objetivos .....	13
3. Metodología.....	14
3.1. Reactor BCR de nitrificación parcial-ANNAMOX .....	14
3.2. Caracterización sólido total de gránulos .....	14
3.3. Cinética de desorción .....	15
3.4. Diseño experimental de desorción de cobre.....	16
3.5. Ensayos de adsorción .....	20
3.6. Ensayos de desorción .....	21
3.7. Digestión ácida .....	22
3.8. Diagrama de flujo y análisis económico del proceso preliminar de recuperación de cobre.....	22
3.9. Análisis estadístico.....	24
4. Resultados y discusión .....	26
4.1. Caracterización de sólidos totales de gránulos .....	26
4.2. Ensayo de cinética de desorción.....	28
4.3. Diseño experimental de desorción de cobre.....	29

4.4.	Análisis económico del proceso preliminar de adsorción-desorción .....	36
5.	Conclusiones.....	40
6.	Bibliografía.....	42
7.	Anexos .....	46
	ANEXO 1: Procedimiento para montar ensayo de adsorción de cobre.....	46
	ANEXO 2: Procedimiento para montar ensayo de desorción de cobre.....	47
	ANEXO 3: Condiciones operativas específicas del reactor BCR “CANON” del laboratorio de bioingeniería UDEC .....	48
	ANEXO 4: Valores de cobre detectados en rellenos sanitarios a nivel mundial.....	48
	ANEXO 5: Resultados del experimento de cinética de desorción .....	49
	ANEXO 6: Análisis ANOVA del diseño experimental Full Factorial en MODDE 7 ...	50

## Lista de Tablas

<b>Tabla 3-1.</b>	Rango de diámetros de AGS del reactor BCR “CANON” UdeC (Guzmán-Fierro et al., 2021). .....	14
<b>Tabla 3-2.</b>	Tiempo de toma de mediciones para ensayo de cinética de desorción. ...	16
<b>Tabla 3-3.</b>	Factores y niveles del diseño experimental empleado para la desorción de cobre. ....	18
<b>Tabla 3-4.</b>	Diseño experimental Full Factorial $3^2$ para la desorción de cobre desde AGS (lodo granular aeróbico). ....	20
<b>Tabla 4-1.</b>	Resultados del experimento de secado de AGS (lodo granular aeróbico) húmedos para la obtención de sólidos totales en triplicado. ....	26
<b>Tabla 4-2.</b>	Equivalencia gST/ gGH de AGS (lodo granular aeróbico). ....	27
<b>Tabla 4-3.</b>	Resultados de los ensayos determinados por el diseño experimental Full Factorial para la desorción de cobre desde AGS.....	30
<b>Tabla 7-1.</b>	Condiciones operativas específicas del reactor BCR “CANON”. ....	48

<b>Tabla 7-2.</b> Rango de valor mínimo-máximo de cobre detectado en rellenos sanitarios en distintos países (Qian et al., 2024). .....	48
<b>Tabla 7-3.</b> Resultados ensayos de cinética de desorción con NaCl 1 mol/L luego de 1.5 horas de tratamiento a 25°C, pH 4,8 y 120 RPM con una concentración de Cu(II) inicial de 1 mg/L y una adsorción final de 0,85 mg/L.....	49
<b>Tabla 7-4.</b> Análisis de Varianza (ANOVA).....	50

## Lista de Figuras

<b>Figura 1-1.</b> Proceso de adsorción en sólido poroso (Elaboración propia). .....	10
<b>Figura 1-2.</b> Gránulos aeróbicos de reactores de nitrificación parcial-ANAMMOX. ....	12
<b>Figura 3-1.</b> Esquema de un diseño $3^2$ (NIST/SEMATECH, 2012).....	18
<b>Figura 3-2.</b> Diagrama de flujo del proceso preliminar de adsorción-desorción de cobre con AGS. ....	22
<b>Figura 4-1.</b> Comparación AGS húmedo vs. AGS seco. ....	27
<b>Figura 4-2.</b> Comportamiento en el tiempo de la desorción de mg de cobre con respecto a los mg cargados en los AGS expresado en % de desorción.....	28
<b>Figura 4-3.</b> Superficie de respuesta del modelo predictivo empleado.....	34
<b>Figura 4-4.</b> “SweetSpot” del modelo predictivo.....	35
<b>Figura 4-5.</b> Diagrama de flujo del proceso preliminar de adsorción-desorción de cobre con condiciones de desorción óptimas.....	37
<b>Figura 4-6.</b> Diagrama de flujo del proceso preliminar de adsorción-desorción de cobre con AGS. ....	37

## Simbología y Abreviaciones

AGS: Lodo aeróbico granular.

AS: Lodo activado.

C: Concentración de NaCl.

D: Desorción.

N: Número total de datos.

NaCl: Cloruro de sodio

gST: Unidad de medida, Gramos de sólido total.

gGH: Unidad de medida, Gramos de gránulo húmedo.

EPS: Sustancias poliméricas extracelulares.

BCR: Reactor de columna de burbujas.

Cu(II): Cobre.

Cr(VI): Cromo hexavalente.

NaCl: Cloruro de sodio.

RSM: Diseño experimental de superficie de respuesta.

SEM: Error estándar de la media.

SS: Suma cuadrados.

$s^2$ : Varianza

T: Temperatura.

U: Utilidad

Y: Respuesta del proceso del diseño experimental.

$x_i, x_j$ : Factores del diseño experimental.

$x_k$ : Valor individual del conjunto de datos.

$\bar{x}$ : Media del conjunto de datos.

$\beta_0$ : Término de intersección del diseño experimental.

$\beta_j$ : Término de influencia del factor en la respuesta del diseño experimental.

$\sigma$ : Desviación estándar.



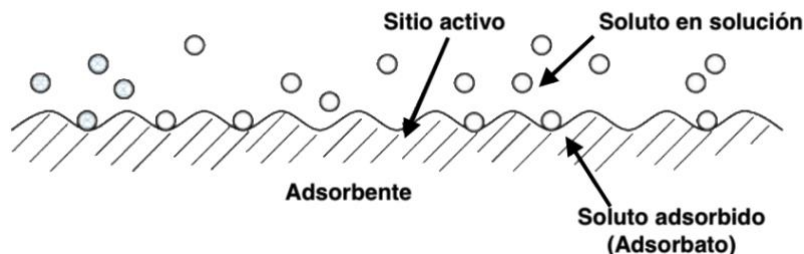
# 1. Introducción

El tratamiento de aguas residuales industriales representa un desafío constante para la preservación del medio ambiente y la salud pública. La creciente cantidad de iones de cobre (Cu(II)) presentes en las emisiones industriales ocupan un lugar destacado en los efluentes líquidos debido a su toxicidad y persistencia en el medio ambiente.

Se han detectado relaves mineros con leyes de cobre de hasta 0,24% (Seguridad Minera, 2022), lo cual es bastante considerando que se manejan toneladas de este desecho. Los relaves pueden lixiviar el agua y los suelos circuncidantes, alcanzando concentraciones de cobre que superan 1 mg/L. Esto puede causar efectos gastrointestinales leves en humanos, como vómitos y náuseas (OMS, 2017). Además, es perjudicial para los sistemas acuáticos, ya que comienzan a verse alterados desde 0,01 mg/L de concentración de Cu(II) (EPA, 2007). Por otro lado, el cobre es uno de los metales más valiosos del mundo. Posee un valor comercial de 130 USD/kg (Kitco Metals Inc., 2024) y se caracteriza por ser un material con excelentes propiedades conductivas, térmicas y anticorrosivas. Dicho lo anterior, la recuperación eficaz del Cu(II) de aguas residuales es de gran importancia no solo por el saneamiento de aguas, sino también por el valor comercial de este (Wang et al., 2024).

Se han desarrollado varias tecnologías para extraer iones de metales pesados del agua tales como precipitación, electroquímica, tecnología de membranas, coagulación química y adsorción. Ésta última destaca en comparación a las otras tecnologías, debido a que suele ser más económica en términos de costos operativos y de mantenimiento (Wang et al., 2018). La adsorción es un fenómeno físico-químico durante el cual átomos, moléculas o iones presentes en una solución acuosa o gaseosa (adsorbatos) se adhieren a la superficie de un material sólido o líquido (adsorbente). Este proceso ocurre debido a las fuerzas de atracción intermoleculares entre las moléculas del adsorbato y los átomos o grupos funcionales, también llamados sitios activos, presentes en la superficie del adsorbente (Metcalf & Eddy, 2014).

La Figura 1-1 a continuación, ilustra el proceso de adsorción en un adsorbente de sólido poroso, el cuál es comúnmente utilizado en el tratamiento de aguas:



*Figura 1-1. Proceso de adsorción en sólido poroso (Elaboración propia).*

La adsorción en un sólido poroso se desarrolla en tres etapas: macrotransporte, microtransporte y adsorción. El macrotransporte engloba el movimiento por convección y difusión de la materia orgánica (solutos) a través de la solución hasta alcanzar la interfase líquido-sólido. Por otro lado, el microtransporte hace referencia a la difusión del material orgánico a través del sistema de macroporos del sólido granular hasta alcanzar las zonas de adsorción que se hallan en los microporos y submicroporos de los gránulos. Finalmente, el equilibrio se alcanza cuando se igualan las tasas de adsorción y desorción, momento en el que se agota la capacidad de adsorción del sólido y las partículas quedan en la interfase entre el adsorbente y el fluido (Metcalf & Eddy, 2014).

El tratamiento de aguas residuales mediante el método de adsorción busca la retención de partículas adsorbato como contaminantes orgánicos o cationes metálicos en el adsorbente. La cantidad de adsorbato que puede retener un adsorbente está determinada principalmente por las características y la concentración del adsorbato, así como por la temperatura de operación. Para la recuperación de los metales pesados adsorbidos en el tratamiento, es clave el proceso de desorción.

La desorción es un proceso físico-químico mediante el cual los adsorbatos son liberados desde la superficie del adsorbente al medio circundante. En otras palabras, es el proceso inverso a la adsorción. Este proceso puede ocurrir de forma natural o

puede ser inducido mediante cambios en las condiciones operacionales, como temperatura, pH, concentraciones, agitación, fuerzas intermoleculares, etc. Para el estudio en cuestión, estas condiciones influyen en la ocurrencia de reacciones químicas cobre-adsorbente, la afinidad del metal por los sitios activos, la competencia iónica entre el Cu(II) y agentes desorbentes, entre otros.

Si bien existen varios sólidos porosos utilizados en el tratamiento de aguas, como carbón activado, zeolitas, resinas, arena y grava, recientemente ha surgido una nueva tecnología que ofrece claras ventajas sobre el sistema convencional de lodos activados típicos. Esta tecnología, conocida como lodos granulares aeróbicos (AGS), ha sido objeto de estudio y muestra un potencial prometedor para mejorar la eficiencia y la efectividad en el tratamiento de aguas residuales (Dababat et al., 2024).

El lodo granular aeróbico, por sus siglas en inglés, Aerobic Granular Sludge (AGS) es un consorcio de microorganismos auto agregados con propiedades de eliminación de contaminantes que se genera a partir de la aireación de lodo activado (AS) (Nancharaiah & Kumar, 2018). El lodo granular anaeróbico fue descubierto en 1976 siendo la primera conformación de biopelícula granular reportada. Posteriormente, en la década de 1990, se introdujo el concepto de lodo granular aeróbico (AGS) como tal (Guzmán-Fierro et al., 2023). Un conglomerado microbiano, agregado o biopelícula microbiana es un conjunto de microorganismos que crecen aglomeradas y rodeadas por una matriz extracelular que ellos mismos producen. Esta matriz está formada de proteínas y sustancias poliméricas extracelulares (EPS). Estos microorganismos se distinguen como microesferas de típicamente 0,5 a 4 mm de diámetro (Othman et al., 2013).

Los AGS se han estudiado como materiales absorbentes para el tratamiento de aguas residuales, ya que tienen la ventaja de tener una composición biológica que promueve una mayor actividad microbiana, una mayor eficiencia espacial y una mejor capacidad de biodegradación en comparación a los AS. Además de existir la posibilidad de su reutilización. Varios estudios han demostrado que la capacidad de eliminación de

caciones polivalentes contaminantes es incluso mayor que la de los materiales adsorbentes convencionales. Además se ha demostrado una eficiencia superior en el manejo de grandes volúmenes de aguas residuales (Adav et al., 2008).

La Figura 1-2 muestra la forma de los gránulos de nitrificación parcial-ANAMMOX, un tipo de AGS utilizado en el tratamiento de efluentes con alta carga de nitrógeno. Este tipo de gránulos tienen un alto potencial, ya que son la tecnología emergente más utilizada a escala industrial de reactores AGS (Lackner et al., 2014).



*Figura 1-2. Gránulos aeróbicos de reactores de nitrificación parcial-ANAMMOX.*

A pesar del considerable potencial del AGS como material biosorbente, su aplicación aún se encuentra en una etapa incipiente. Hasta la fecha, no se han llevado a cabo estudios que busquen mejorar la eficiencia de la desorción de metales valiosos de este material, centrándose únicamente en investigaciones relacionadas con la adsorción. Es fundamental abordar la capacidad de desorción de este lodo, ya que esto podría transformar el paradigma de la economía lineal en los sistemas de tratamiento convencionales, donde el lodo se considera simplemente un residuo, hacia un enfoque de economía circular, en el que el lodo se convierta en un recurso para la producción de nuevos biomateriales.

La presente investigación se centra en la optimización del proceso de desorción de cobre de gránulos de bioreactores previamente utilizados para el tratamiento de adsorción de iones presentes en efluentes líquidos.

## 2. Objetivos

Objetivo general:

- Determinar condiciones óptimas de desorción de cobre desde lodo granular mediante diseño experimental, maximizando el rendimiento de desorción.

Objetivos específicos:

- Demostrar la factibilidad de la desorción de Cu(II) desde gránulos aeróbicos obtenidos desde un reactor de nitrificación parcial-ANAMMOX utilizando NaCl como agente desorbente.
- Determinar la contribución de la temperatura y la concentración del agente desorbedor en el proceso de desorción de cobre a través de un diseño experimental *Full Factorial*.
- Analizar el potencial económico de un proceso preliminar de adsorción-desorción para la recuperación de Cu(II) a partir de gránulos aeróbicos utilizados como adsorbente utilizando NaCl como agente desorbente.

### 3. Metodología

#### 3.1. Reactor BCR de nitrificación parcial-ANNAMOX

Los AGS utilizados en esta investigación fueron extraídos del reactor de columna de burbujas (BCR) de nitrificación parcial-ANAMMOX “CANON” ubicado en el Laboratorio de Bioingeniería de la Universidad de Concepción. El BCR es alimentado continuamente y operado con aguas residuales sintéticas (ausencia de materia orgánica) compuestas de sustancias inorgánicas como cloruros, sulfatos y carbonatos. Las condiciones de operación están establecidas a una temperatura de 35 °C, con una baja concentración de oxígeno de 0,1-0,4 mg O<sub>2</sub>/L y un régimen de funcionamiento continuo. Condiciones operativas particulares del reactor se detallan en el Anexo 3 (Guzmán-Fierro et al., 2021).

Guzmán-Fierro et al. (2021) determinó que los lodos granulares del BCR se encontraban dentro de tres rangos de diámetros. Para ello, se analizaron más de 300 gránulos por muestra para cada rango. Los resultados se evidencian en la Tabla 3-1.

*Tabla 3-1. Rango de diámetros de AGS del reactor BCR “CANON” UdeC (Guzmán-Fierro et al., 2021).*

Rango de diámetro [mm]	Diámetro promedio [mm]	*SD [mm]	Superficie específica [mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ]
0,40–0,85	0,67	0,27	10,43
0,85–1,25	1,09	0,24	5,77
>1,25	1,56	0,45	4,34

\*SD: Desviación estándar.

#### 3.2. Caracterización sólido total de gránulos

Para determinar la relación sólido total por gránulo húmedo de los AGS sustraídos del reactor se realizó un experimento por triplicado con la siguiente metodología:

Se lavaron y posteriormente se secaron los crisoles de porcelana correspondientes en el horno (Estufa Binder Series ED- FD-FED, Arquimed, Chile) a 105 °C durante 1 hora.

Se retiran del horno y se dejan enfriar en un desecante aproximadamente 20 minutos. Una vez enfriados, se pesan los crisoles para tener registro de su masa sin AGS. Luego se pesan los gránulos húmedos según la concentración de biomasa que necesite el experimento, en este caso 0,5 gST/L. Pesados los gránulos húmedos, se trasladan los crisoles nuevamente al horno a 105 °C durante 12 horas. Retirados y enfriados, se vuelven a pesar y al resultado se le resta el valor del crisol previamente determinado para obtener el peso de AGS seco. Así, con la Ecuación 3-1 se obtiene la relación gST/gGH.

$$\text{Equivalencia } g^{ST}/g^{GH} = \frac{\text{Gránulo secos [g]}}{\text{Gránulo húmedos [g]}} \quad (3-1)$$

Donde:

gST: Unidad de medida, Gramos de sólido total.

gGH: Unidad de medida, Gramos de gránulo húmedo.

### 3.3. Cinética de desorción

Una vez cargados los gránulos, se realizaron ensayos de desorción con NaCl a una concentración 1 mol/L (58,44 g/L) con el fin de realizar estudios de cinética del proceso de desorción. Las condiciones de operación utilizadas para este ensayo fueron las condiciones empleadas en el diseño experimental (apartado 3.4.).

Para el ensayo de cinética de desorción se utilizaron los gránulos a una concentración de 0,5 gST/L (5,5343 gGH) en un matraz Erlenmeyer de 250 mL donde se agrega una solución de NaCl 1 mol/L (58,44 g/L) a pH 4,8. Inmediatamente se ingresó el matraz en el equipo incubador con agitación (Shaking Incubator BJPX-2008, Biobase, China) por 1,5 horas, a una temperatura constante de 25°C y una agitación de 120 RPM.

Se tomaron 12 muestras para determinar el comportamiento de la cinética de desorción. Las 12 mediciones fueron extraídas desde el sobrenadante de la solución

en intervalos ascendentes de 2,5, 10 y 15 minutos (ver Tabla 3-2). Previo al análisis, las muestras de cinética de desorción fueron sometidos a una digestión ácida.

El tiempo que se estimó para que la desorción alcance el equilibrio fue determinado luego de realizar un ensayo preliminar bajo las mismas condiciones, pero con una duración de 18 horas análogo al proceso de adsorción optimizado por Quiroz (2022). Se obtuvo que el mayor periodo de actividad se encontraba dentro de la primera hora.

**Tabla 3-2.** Tiempo de toma de mediciones para ensayo de cinética de desorción.

Número de medición	Tiempo transcurrido [min]
1	0
2	2,5
3	5
4	7,5
5	10
6	20
7	30
8	40
9	50
10	60
11	75
12	90

### 3.4. Diseño experimental de desorción de cobre

El modelo empleado es un diseño experimental *Full Factorial* de dos factores, tres niveles y tres puntos centrales con el objetivo de detectar de manera eficiente cuáles de los parámetros y sus respectivas combinaciones afectan en mayor o menor medida la desorción de Cu(II).



Se determinó un tiempo de contacto de 1,5 horas luego de concluir el ensayo de cinética de desorción. El pH se fijó en 4,8 para todas las pruebas para no afectar la forma y el diámetro de gránulo, ya que a pH muy ácido los gránulos se disuelven y a pH básico el cobre puede sedimentar sin el accionar de la sal (Quiroz, 2022). Los rangos de los factores de temperatura, concentración de biomasa y concentración de sal se escogieron según distintos ensayos de desorción de metales pesados (Wang et al., 2018; Tian et al., 2020).

Para seleccionar la sal se realizó un ensayo preliminar con sales comúnmente utilizadas en ensayos de desorción. Se experimentó con carbonato de sodio, bicarbonato de sodio y cloruro de sodio (Chen et al., 2018; Wang et al., 2013). Debido a que el carbonato y bicarbonato de sodio aumentaron las soluciones de AGS por sobre pH 7, éstas fueron descartadas de inmediato para mantener la integridad de los gránulos y evitar la desorción por precipitación. Al término de las pruebas, los AGS con pH básico adquirieron un color negro, lo que posiblemente pudo significar que hubo una inhibición de actividades metabólicas. Finalmente se seleccionó el cloruro de sodio (NaCl) para llevar a cabo el diseño experimental, ya que esta sal no presentó inconvenientes.

La concentración de cobre a desorber desde los AGS fue determinada a partir de un estudio que recopiló concentraciones de metales pesados en rellenos sanitarios a nivel mundial (Anexo 4). Se determinó que la concentración de Cu(II) generalmente se encuentra en un rango entre 0-1 mg/L (Qian et al., 2024). Por ello, se adsorbió los gránulos con 1 mg/L de cobre para que este estudio sea escalable a la mayor cantidad de rellenos sanitarios posibles.

Finalmente, los niveles para cada factor en el diseño experimental se determinaron según los siguientes criterios. Para la concentración de cloruro de sodio, se fijó un nivel alto de 1.9 mol/L (111 g/L) para que no exista riesgo de insolubilidad de la solución desorbente considerando que el punto de saturación del NaCl es de 360 g/L. Por otro lado, debido a las limitaciones del equipo incubador utilizado, no fue posible mantener temperaturas mayores que 35°C de manera constante, por lo que se fijó ese valor como

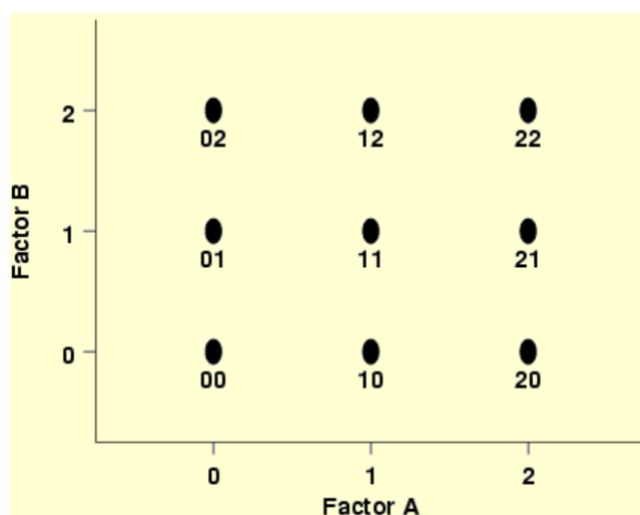
el máximo nivel. El mecanismo de enfriamiento del incubador dependía de un ventilador interno, por lo que tampoco fue posible descender a temperaturas menores a los 15°C.

La Tabla 3-3 a continuación exhibe los factores ingresados en el diseño experimental con sus respectivos niveles.

**Tabla 3-3.** Factores y niveles del diseño experimental empleado para la desorción de cobre.

Factor	Símbolo	Nivel bajo (0)	Nivel medio (1)	Nivel alto (2)
Temperatura [°C]	T	15	25	35
Concentración de sal [mol/L]	C	0,1	1	1,9

El diseño experimental de tres niveles está escrito como un diseño factorial  $3^k$ . Se consideran k factores, cada uno en 3 niveles. Las 9 combinaciones de tratamientos para este tipo de diseño se pueden mostrar gráficamente de la siguiente manera:



**Figura 3-1.** Esquema de un diseño  $3^2$  (NIST/SEMATECH, 2012).

Este método ajusta la respuesta del experimento empleando un polinomio simple expresado en la Ecuación 3-2 (Grich et al., 2024).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (3-2)$$

Donde:

$Y$ : Respuesta del proceso.

$x_i, x_j$ : Factores del diseño.

$\beta_0$ : Término de intersección.

$\beta_i$ : Término de influencia del factor en la respuesta.

Desarrollando la ecuación en base a los factores determinados anteriormente se obtiene:

$$D = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 C + \beta_{12} TC \quad (3-3)$$

Donde:

$D$ : Desorción [%].

$T$ : Temperatura [°C].

$C$ : Concentración de NaCl [mol/L].

El porcentaje de desorción experimental de los gránulos previamente cargados será obtenido con la Ecuación 3-4:

$$\text{Desorción [\%]} = \frac{\text{Concentración de cobre desorbida [mg/L]}}{\text{Concentración de cobre adsorbida [mg/L]}} \cdot 100 \quad (3-4)$$

En la Tabla 3-4 se puede observar la combinación de factores y niveles que entregó el diseño experimental para la desorción de cobre desde AGS.

**Tabla 3-4.** Diseño experimental Full Factorial 3<sup>2</sup> para la desorción de cobre desde AGS (lodo granular aeróbico).

Nº Experimento	Temperatura [°C]	Concentración de sal [mol/L]
1	15	0,1
2	25	0,1
3	35	0,1
4	15	1
5	25	1
6	35	1
7	15	1,9
8	25	1,9
9	35	1,9
10	25	1
11	25	1
12	25	1

Los últimos 3 experimentos son un triplicado de los niveles medios para evaluar la reproducibilidad de los ensayos. Los resultados entregados por el diseño experimental fueron analizados en el software *MODDE 7*.

### 3.5. Ensayos de adsorción

Se realizaron ensayos de adsorción de Cu(II) a una concentración inicial de 1 mg/L con la finalidad de cargar de metal los AGS, para luego realizar ensayos de desorción.

Para los ensayos de adsorción se vierten los gránulos a una concentración de 0,5 gST/L (1,1069 gGH) en un matraz aforado de 50 mL en el cual se agrega una solución de Cu(II) 1 mg/L a pH 4,8. Luego, la solución es traspasada a un matraz Erlenmeyer el cual es trasladado al equipo incubador con agitación (Shaking Incubator BJPX-2008, Biobase, China) por 18 horas para asegurar la completa adsorción, a una temperatura constante de 22°C y una agitación de 120 RPM. Las condiciones de operación

utilizadas son las requeridas para obtener una adsorción de cobre óptima, según el estudio de adsorción de metales pesados realizado por Quiroz (2022).

Finalizada la adsorción se tomaron muestras de 10 mL de cada matraz y se sometieron a digestión ácida para luego enviar las muestras al laboratorio de Servicio y Asistencia Tecnológica (SAT) de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Concepción. Los resultados obtenidos corresponden a la concentración de cada catión, en mg/L, concentración perteneciente al sobrenadante de la solución. La cantidad de cobre adsorbida es la diferencia entre la concentración inicial añadida y la concentración encontrada en el sobrenadante. La metodología de digestión ácida será descrita en el apartado 3.6. El procedimiento puede revisarse en detalle en el Anexo 1.

### 3.6. Ensayos de desorción

Se ejecutaron ensayos de desorción con NaCl según la metodología propuesta por Wang et al. (2013). Para ello, los gránulos previamente cargados con cobre son separados de la solución sobrenadante y trasladados a un nuevo matraz aforado de 50 mL en el cual se agrega una solución de cloruro de sodio a concentración requerida según experimento, a pH 4,8 análogo a la adsorción. La solución se vierte en un matraz Erlenmeyer de 50 mL y se lleva al interior del equipo incubador con agitación (Shaking Incubator BJPX-2008, Biobase, China) por 1,5 horas, a una temperatura determinada según el diseño y una agitación de 120 RPM.

Terminada la desorción se tomaron muestras de 10 mL de cada matraz y se sometieron a digestión ácida para luego enviar las muestras al laboratorio de Servicio y Asistencia Tecnológica (SAT) de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Concepción. Los resultados obtenidos corresponden a la concentración de cobre, en mg/L, concentración perteneciente al sobrenadante de la solución. El procedimiento puede revisarse en detalle en el Anexo 2.

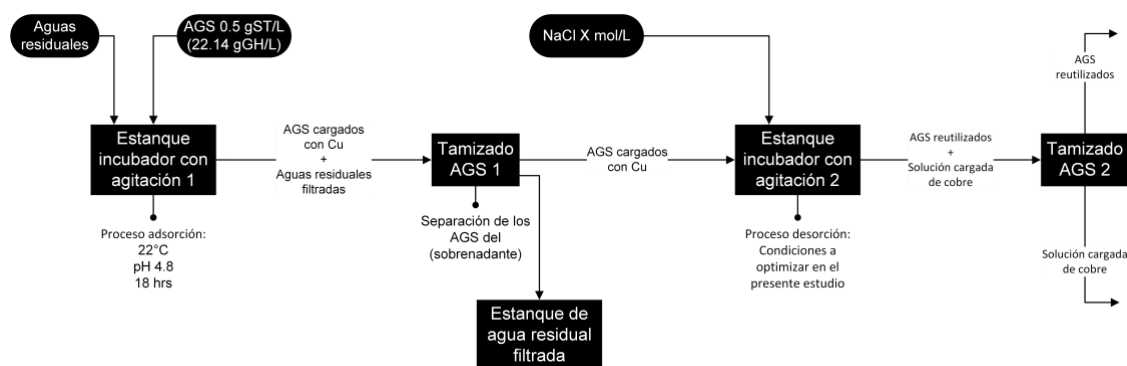
### 3.7. Digestión ácida

La digestión ácida de las muestras se realizó con el objetivo de eliminar los residuos orgánicos que pudiera arrastrar la muestra a analizar.

Para ello se sigue los lineamientos del Laboratorio SAT de la Facultad de Química de la Universidad de Concepción determinados por la metodología EPA 3005A (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 1992). El procedimiento se lleva a cabo en un tubo de ensayo para cada muestra, en los cuales se añaden 2,5 mL de ésta, 1,5 mL de ácido nítrico concentrado (HNO<sub>3</sub>) (65%) y 1 mL de agua desionizada. Una vez se añadido el ácido, los tubos se insertan en la placa del calentador para tubos de ensayo (Termo-reactor DQO, HI839800, Italia) a 105 °C durante 15 minutos. Finalizado el tiempo en el reactor, las muestras ya digestionadas se traspasan a tubos Falcon que posteriormente son enviados a analizar.

### 3.8. Diagrama de flujo y análisis económico del proceso preliminar de recuperación de cobre

Para el tratamiento de aguas residuales industriales preliminar, el proceso debe llevarse a cabo según el diagrama expuesto en la Figura 3-2.



*Figura 3-2. Diagrama de flujo del proceso preliminar de adsorción-desorción de cobre con AGS.*

El agua residual a tratar debe ingresarse a un recipiente incubador con agitación que sea capaz de mantener una temperatura y agitación constantes. A la vez, deben

ingresarse la cantidad de gránulos aeróbicos correspondientes tal que dentro del recipiente haya una concentración de 0,5 gST AGS/L.

Transcurrido el tiempo que requiere el proceso de adsorción a las condiciones requeridas, es necesario separar los AGS cargados de cobre del agua residual ya filtrada con un tamizador ajustado al diámetro de la biomasa utilizada. El agua residual filtrada debe almacenarse en otro estanque para poder ser retratada o destinada a reúso dependiendo del éxito de la adsorción.

Para la reutilización de los AGS cargados y la recuperación del cobre, debe ingresarse los gránulos a un segundo estanque incubador con agitación, con agua desionizada y con el agente desorbente seleccionado, en este caso NaCl.

Luego del tratamiento de desorción, los gránulos deben separarse nuevamente en un segundo equipo de tamizado para poder regresar la biomasa al reactor de almacenamiento correspondiente. Por otro lado, la solución sobrenadante estará cargada del metal valioso que se desea recuperar.

Cabe destacar que en un caso industrial real, las aguas no sólo vendrán con cobre, sino también con otros metales pesados y contaminantes, los cuáles también pueden o no ser adsorbidos por los AGS a la hora del tratamiento de adsorción.

Un análisis económico sencillo para este proceso está representado por la Ecuación 3-5, que muestra el potencial económico máximo del proceso:

$$U \left[ \frac{US\$}{año} \right] = \text{Precio Venta Cu} \left[ \frac{US\$}{kg} \right] \cdot \text{Cu Recuperado} \left[ \frac{kg}{año} \right] + \text{Costo Agua} \left[ \frac{US\$}{m^3} \right] \cdot \text{Agua Residual Recuperada} \left[ \frac{m^3}{año} \right] - \text{Costo AGS} \left[ \frac{US\$}{kg} \right] \cdot \text{AGS Utilizado} \left[ \frac{kg}{año} \right] - \text{Costo Desorbente} \left[ \frac{US\$}{kg} \right] \cdot \text{Desorbente Utilizado} \left[ \frac{kg}{año} \right] \quad (3-5)$$

Donde:

$U$ : Utilidad [US\$/año].

### 3.9. Análisis estadístico

Para realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos en los experimentos que no corresponden al diseño experimental se utilizaron las siguientes ecuaciones.

Suma de cuadrados (SS): Sumatoria del cuadrado de las diferencias entre cada dato y la media del conjunto de datos.

$$SS = \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2 \quad (3-6)$$

Donde:

$SS$ : Suma cuadrados.

$x_i$ : Valor individual del conjunto de datos.

$\bar{x}$ : Media del conjunto de datos.

Varianza (MS): Medida de dispersión que representa la variabilidad de los datos con respecto a su media.

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2 \quad (3-7)$$

Donde:

$s^2$ : Varianza

$N$ : Número total de datos.



Desviación estándar (SD): Medida para cuantificar la variación o dispersión de un conjunto de datos.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2} \quad (3-8)$$

Donde:

$\sigma$ : Desviación estándar.

Error estándar de la media (SEM): Medida que cuantifica cuánto se espera que la media de la muestra varíe de la media real si se repitiera el experimento.

$$SEM = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (3-9)$$

Donde:

$SEM$ : Error estándar de la media.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Caracterización de sólidos totales de gránulos

Es fundamental establecer una equivalencia que defina cuantos gramos de sólidos totales (gST) contiene una determinada cantidad de gránulos húmedos (gGH). Esto se debe a que los AGS contienen una gran cantidad de agua, la cual depende de los procesos de tratamiento y del tipo de almacenamiento del gránulo. Cuantificar la biomasa en gST es más preciso porque descarta la variabilidad de la humedad y permite realizar comparaciones con otros estudios de gránulos de características similares.

Los resultados obtenidos una vez realizado el secado, enfriado y pesado de los AGS se aprecian en la Tabla 4-1.

*Tabla 4-1. Resultados del experimento de secado de AGS (lodo granular aeróbico) húmedos para la obtención de sólidos totales en triplicado.*

N° Crisol	AGS húmedo [gGH]	AGS seco [gST]
1	0,5005	0,0115
2	0,5002	0,0113
3	0,5002	0,0111
<b>Promedio</b>	<b>0,5003</b>	<b>0,0113</b>

El ensayo en triplicado obtuvo valores bastante similares de gST. Se promediaron las respectivas mediciones de AGS húmedo y AGS seco, y se calculó la equivalencia gST/gGH con la Ecuación 3-1 para continuar con el estudio de desorción.

$$\text{Equivalencia } gST/gGH = \frac{0,0113 [gST]}{0,5003 [gGH]} = 0,02258 \left[ \frac{gST}{gGH} \right]$$

El gránulo húmedo resultó ser 50 veces más pesado que el gránulo seco, evidenciando la gran cantidad de agua que éstos portan. En la Figura 4-1, es posible observar la significativa diferencia de masa entre los AGS pre y post secado.



*Figura 4-1. Comparación AGS húmedo vs. AGS seco.*

En este experimento se utilizó una concentración de 0,5 gST/L y se utilizaron matraces de 50 mL (diseño experimental) y 250 mL (cinética). El resultado de aplicar la equivalencia gST/ gGH a la concentración de biomasa deseada en el experimento para conocer la cantidad de gránulos húmedos del reactor BCR “CANON” requeridos se detalla en la Tabla 4-2.

*Tabla 4-2. Equivalencia gST/ gGH de AGS (lodo granular aeróbico).*

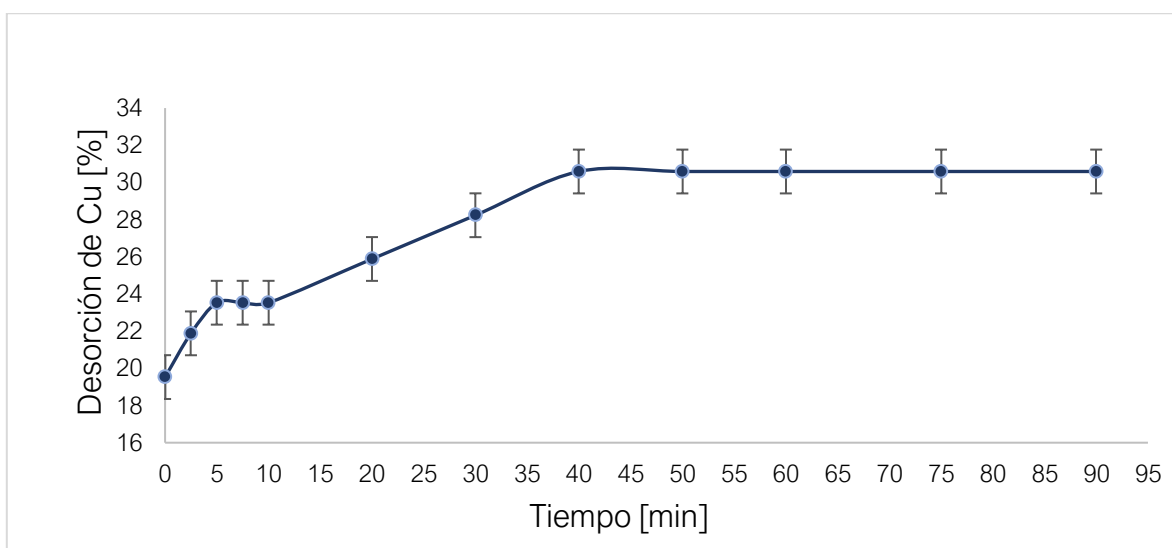
Tamaño matraz [mL]	AGS seco [gST/L]	AGS húmedo [gGH/L]
50	0,5	1,1069
200	0,5	5,5343

## 4.2. Ensayo de cinética de desorción

El estudio de la cinética de desorción permite estimar el tiempo que requieren los AGS para liberar los iones de Cobre a la solución. Esta fue examinada liberando los cationes de cobre presentes en los gránulos aeróbicos previamente sometidos a un tratamiento de adsorción con 1 mg/L de Cu(II) en solución, cargados finalmente con 0,85 mg/L, durante 1,5 horas con una solución de NaCl.

El ensayo se realizó con las condiciones del nivel medio del diseño experimental, es decir, una concentración de sal de 1 mol/L (58,44 g/L) y una temperatura de 25 C°. Además, el pH de solución se fijó en 4,8 y se utilizó una agitación de 120 RPM.

Los porcentajes de desorción obtenidos para cada resultado se calcularon con la Ecuación 3-4. Los resultados obtenidos se exponen en la Figura 4-2, confeccionada con los datos del Anexo 5.



**Figura 4-2.** Comportamiento en el tiempo de la desorción de mg de cobre con respecto a los mg cargados en los AGS expresado en % de desorción.

Tal como se exhibe en los resultados, luego de 1,5 (90 minutos) horas la desorción no superó los 0,26 mg/L de desorción de cobre de los 0,85 mg/L adsorbidos inicialmente (31% de desorción). Esta remoción es baja en comparación a los resultados obtenidos en el diseño experimental, expuestos en la sección siguiente. Esto puede adjudicarse al tamaño del matraz, ya que al ser cinco veces mas grande que el utilizado en el ensayo propuesto para el diseño, el potencial volumétrico de agitación es menor a una agitación de 120 RPM. El ensayo de cinética se realizó en un matraz de 250 mL por la demanda de muestras que esta requería tomar para poder establecer un tiempo de desorción que alcance el equilibrio.

Se puede apreciar que desde los 40 minutos en adelante la desorción llegó al equilibrio con 30,59% de cobre desorbido, por lo tanto 1,5 horas (90 minutos) se estima un tiempo adecuado para realizar los ensayos del diseño experimental. En los resultados del ensayo de cinética de desorción de Cr(VI) desde AGS con Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 1 mol/L a 150 RPM realizado por Tian et al. (2020), se observa que se alcanzan porcentajes de remoción de 33% luego de 180 minutos. Se puede notar que en ambos casos el tiempo de desorción no es exagerado. El resultado obtenido va por la dirección correcta porque un tiempo de desorción acotado, al ser un proceso inducido, indica que las condiciones operacionales aplicadas son óptimas.

#### 4.3. Diseño experimental de desorción de cobre

Antes de llevar a cabo el diseño experimental, se comenzó realizando ensayos preliminares de adsorción/desorción con 500 mg/L (Wang et al., 2018). La cantidad de metal adsorbido luego del tratamiento alcanzó un promedio de un 50%, pero las desorciones no superaban el 1%. Esto se puede atribuir a que las concentración de sal, dadas las limitaciones de solubilidad, no era la suficiente para que las partículas compitieran por los sitios activos en los que el cobre se encontraba adsorbido. También se realizaron ensayos con concentraciones de cobre de 50 mg/L, y a pesar de obtener adsorciones más altas de hasta 90%, las desorciones nuevamente no superaron el 6%.

Con estos antecedentes, tal como se establece en el apartado 3.4., la concentración de cobre a desorber desde los AGS fue determinada en 1 mg/L de cobre.

Los experimentos de desorción se ejecutaron según la metodología propuesta en el Capítulo 3. Cada experimento presenta sus respectivas condiciones de operación en la Tabla 3-4, confeccionada por el software *MODDE 7* una vez ingresados los factores y niveles al programa.

Los AGS utilizados para este experimento fueron sometidos a un tratamiento de adsorción con una concentración inicial de 1 mg/L de cobre en solución. Se logró cargar los gránulos con una concentración de Cu(II) de 0,56 mg/L.

Los 12 ensayos del diseño experimental fueron sometidos a una digestión ácida. Los porcentajes de desorción obtenidos para cada resultado se calcularon con la Ecuación 3-4. Los resultados logrados presentados en la Tabla 4-3 exponen la concentración de cobre detectada en el sobrenadante de la solución de cada matraz.

**Tabla 4-3.** Resultados de los ensayos determinados por el diseño experimental Full Factorial para la desorción de cobre desde AGS.

Nº Experimento	Temperatura [°C]	Concentración de sal [mol/L]	Concentración de cobre detectada [mg/L]	Desorción [%]
1	15	0,1	0	00,00
2	25	0,1	0	00,00
3	35	0,1	0,25	45,00
4	15	1	0,2	35,71
5	25	1	0,26	46,43
6	35	1	0,28	50,00
7	15	1,9	0,34	60,71
8	25	1,9	0,34	60,71
9	35	1,9	0,43	77,50
10	25	1	0,28	50,00
11	25	1	0,26	46,43
12	25	1	0,3	53,57

Analizando los resultados es evidente que el porcentaje de desorción aumenta a medida que aumenta la temperatura y la concentración de NaCl. Se esperaba este

resultado, dado que Tian et al. (2020), que estudió la desorción de cromo hexavalente de AGS, observó que la concentración del agente desorbedor y la temperatura eran críticos para la eficacia del proceso.

Los experimentos número 1 y 2 no arrojaron resultados posiblemente por la baja cantidad de sal que se les aplicó. Aun así, con una temperatura de 35 °C y la mínima concentración de NaCl, se alcanzó una desorción del 45%. Los datos obtenidos resultan coherentes, ya que la efectividad de la desorción de metales aumenta conforme se aumenta la concentración de sal desorbente (Tian et al., 2020).

Los datos obtenidos demuestran que es factible la desorción de cobre desde gránulos aeróbicos obtenidos de un reactor de columna de burbujas (BCR) de nitrificación parcial-ANAMMOX “CANON” utilizando NaCl como agente desorbente.

Se ingresaron los resultados en *MODDE 7* para utilizar las herramientas de análisis que el software ofrece. Al momento de interpretar datos con análisis estadístico es importante que el modelo predictivo empleado se ajuste correctamente, para que éste entregue predicciones coherentes con los resultados experimentales obtenidos.

Para corroborar un buen ajuste, los valores de  $R^2$  y  $Q^2$  deben cumplir con los siguientes requisitos.  $R^2$  representa una medida que indica qué tan bien se ajustan los datos observados en un modelo. Su importancia radica en su capacidad para evaluar la bondad de ajuste del modelo, indicando cuánta variabilidad de la variable dependiente es explicada por el modelo. Los valores de  $R^2$  pueden variar entre 0 y 1, donde un valor más cercano a 1 indica un mejor ajuste del modelo. Por otro lado,  $Q^2$  evalúa la capacidad predictiva de un modelo en datos no vistos, lo que ayuda a determinar si el modelo puede hacer predicciones precisas en nuevas situaciones. Valores más cercanos a 1 indican un mejor ajuste del modelo a los datos de validación, mientras que valores negativos o cercanos a 0 sugieren una capacidad predictiva deficiente (Umetrics AB., 2003).

Los resultados de  $R^2$  y  $Q^2$  arrojados por el software *MODDE 7* fueron de 0,882 y 0,720 respectivamente. Lo anterior indica que el modelo se ajustó de forma correcta a los datos obtenidos y que la capacidad predictiva de este es aceptable.

La Ecuación 3-3 del modelo *Full Factorial* con los coeficientes entregados por *MODDE 7* reemplazados queda:

$$D = 43,83 + 12,68T + 25,65C - 7,05TC \quad (4-1)$$

Donde:

*D*: Desorción [%].

*T*: Temperatura [°C].

*C*: Concentración de NaCl [mol/L].

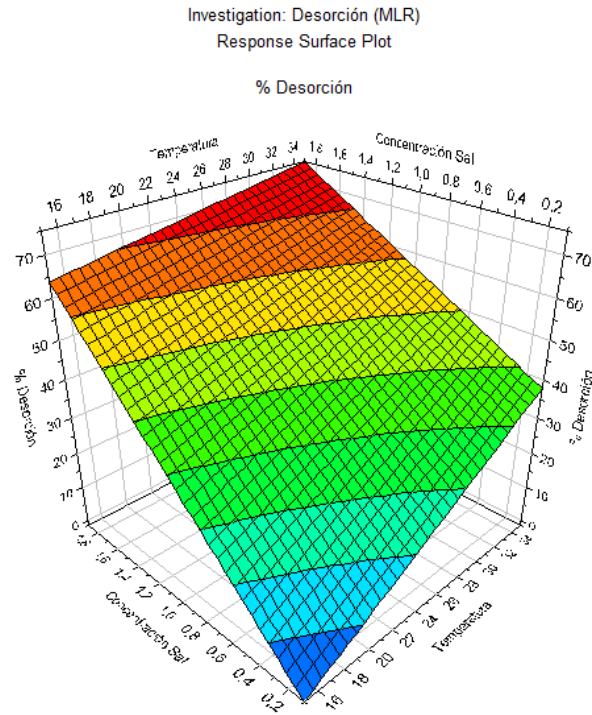
De los coeficientes se infiere que la concentración de NaCl es el factor que más influye a la hora de buscar un aumento en el porcentaje de desorción. Esto es esperable, ya que un incremento en la concentración de NaCl intensifica la competencia de los iones con el cobre por los sitios de adsorción, impactando directamente en la desorción a través de las fuerzas intermoleculares. Además, esto coincide con los estudios de desorción de cromo realizados por Chen et al. (2018), ya que al aumentar la molaridad de la concentración  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  de 0,05 M a 0,55 M, el porcentaje de desorción de Cr(VI) aumentó desde un 17% a un 38%. En otro estudio, se centraron en la sorción y desorción de cromo hexavalente utilizando el alga *Sargassum myriocystum* (Jayakumar et al., 2015). Decidieron estudiar la desorción del material sorbente para su reutilización. El sorbente cargado se trató con HCl a diferentes concentraciones. Al igual que en la presente investigación, el aumento de la concentración del agente desorbente aumentó la desorción. El porcentaje máximo de recuperación de Cr(VI) fue del 97,21% con una solución de HCl 0,2 M a 35°C. Sería interesante probar la remoción de metales pesados desde AGS con éste agente desorbente, evitando destruir la vida microbiana de los gránulos con un control adecuado de pH.



Por otro lado, que el factor que acompaña el cruce de factores sea negativo indica que la combinación de ellos implica una influencia negativa en cuanto a maximizar la desorción. Esto puede atribuirse a una posible competencia entre factores. En una reacción de desorción, un aumento en la temperatura podría aumentar la afinidad del cobre por los sitios de adsorción, mientras que un aumento en la concentración de NaCl podría aumentar la competencia por estos sitios. Esta competencia podría dar lugar a una interacción negativa entre la temperatura y la concentración (Wang, 2022).

Para determinar la significancia predictiva de las variables en el proceso, es necesario observar la tabla ANOVA entregada por el software utilizado (Anexo 6). El valor p indica la probabilidad de obtener un resultado igual o más extremo que el observado en caso de que la hipótesis nula fuera verdadera. Una hipótesis nula generalmente afirma que no hay efectos significativos de las variables en el resultado. Un valor p menor 0.05 indica que la variable tiene un efecto significativo en el resultado del experimento, es decir, que hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de que la variable no tiene efecto. La fila de "Regresión" en la tabla ANOVA indica la contribución conjunta de ambas variables predictoras al modelo (temperatura y concentración del agente desorbente). El valor p asociado a "Regresión" 0.000, por lo tanto, las variables predictoras tienen un efecto significativo en la variable de respuesta.

En la Figura 4-3, se presenta la superficie de respuesta de la desorción de cobre. Tal como se infiere de la ecuación, el modelo predictivo identifica que la concentración de sal tiene una influencia mayor en la respuesta en comparación con la temperatura.



**Figura 4-3.** Superficie de respuesta del modelo predictivo empleado.

Al utilizar una concentración de sal de 1,9 mol/L (111 g/L) (nivel alto) a 15 °C (nivel bajo), el modelo responde con una desorción del 64%; mientras que al usar una concentración de sal de 0,1 mol/L (5,84 g/L) (nivel alto) a 35 °C (nivel bajo), el modelo responde con una desorción de apenas 37%.

Al maximizar la Ecuación 4-1 en *MODDE 7*, se obtiene que luego de ocho iteraciones, el valor óptimo de temperatura y concentración de NaCl son 35 °C y 1,9 mol/L (111 g/L) respectivamente, entregando un porcentaje de desorción predictivo de 75,12 %. Lo anterior resulta efectivo, considerando que en aguas contaminadas con una concentración de cobre aproximada de 1 mg/L se podrían extraer 0,7512 mg/L en 1,5 horas.

En la Figura 4-4 se presenta el área óptima de operación para que se obtenga una respuesta satisfactoria.

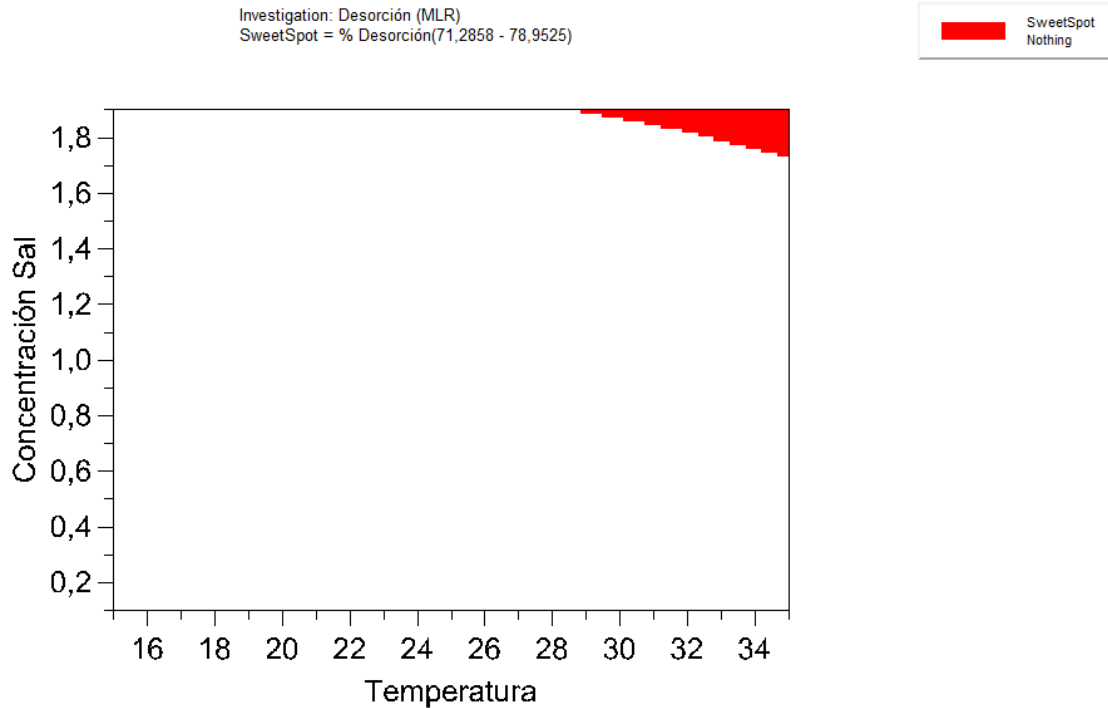


Figura 4-4. "SweetSpot" del modelo predictivo.

Cabe destacar que las condiciones óptimas para la desorción de Cu(II) desde AGS del reactor BCR "CANON" no necesariamente son ideales para todo proceso de remoción. Chen et al. (2018) encontró que las condiciones óptimas para la desorción pueden ser altamente dependientes de la naturaleza química del metal y de las características específicas del AGS.

Al comparar el diseño experimental *Full Factorial* con la metodología de superficie de respuesta (RSM) utilizada por Ahmady-Asbchin et al. (2013), quien estudió la biosorción de níquel y cobre con algas, es posible destacar que ambos métodos de optimización son robustos en cuanto a encontrar las condiciones óptimas de operación. El diseño *Full Factorial* evalúa todas las combinaciones posibles de niveles de factores, lo que provee una comprensión completa del proceso. El RSM es útil para explorar relaciones complejas y puede ser más eficiente en términos de número de experimentos requeridos. En este caso, el diseño *Full Factorial* funcionó perfecto al tener solo dos factores involucrados por lo que fue posible realizar la totalidad de

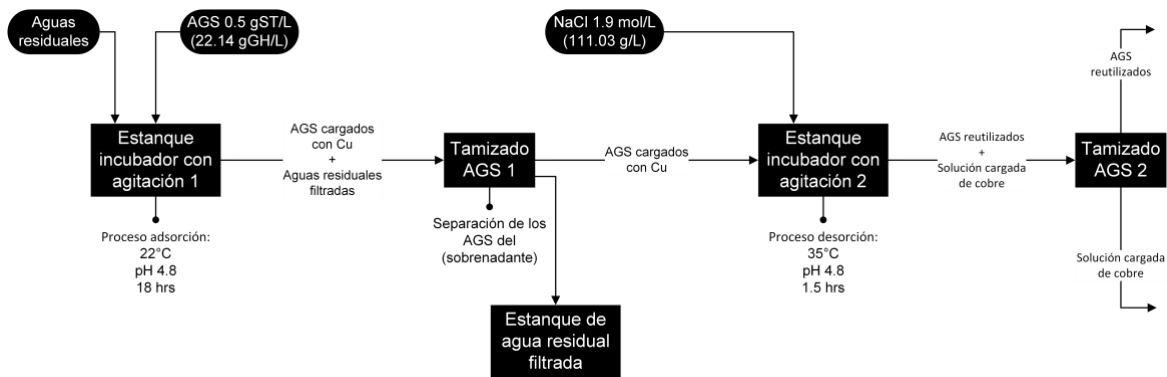
experimentos. Además, en este caso no existió la complejidad de relacionar varios efectos entre sí. Por lo tanto, se considera que el diseño aplicado para esta investigación es correcto, pero sería interesante aplicar un RSM evaluando los efectos del pH, agitación, temperatura y concentración de agente desorbente.

Se mencionó anteriormente que no se pudo probar valores mayores de temperatura y concentración de NaCl. Esto podría solucionarse utilizando un equipo calentador de mayor aislamiento e implementando compuestos que mejoren la capacidad de disolución como tensioactivos o ácidos no invasivos en el proceso para poder disolver mejor la sal a utilizar.

Por último, sería interesante llevar los AGS a condiciones extremas sin limitarse por mantener vivo el microorganismo. Un lodo granular aeróbico que ha perdido su actividad biológica, aún podría tener una capacidad significativa de adsorción debido a la presencia de sitios funcionales en su estructura, como grupos carboxílicos, aminos y sulfhídricos, los cuales pueden interactuar con los metales pesados (Guzmán-Fierro et al., 2023). Zahiri & Tasharofi (2021) utilizaron biomasa muerta para el tratamiento del agua subterránea y obtuvieron resultados de 90% de absorción y 80% de desorción de níquel. Comprobando que la vida de la biomasa, en ese caso el alga *Schizomeris leibleinii*, no es estrictamente necesaria.

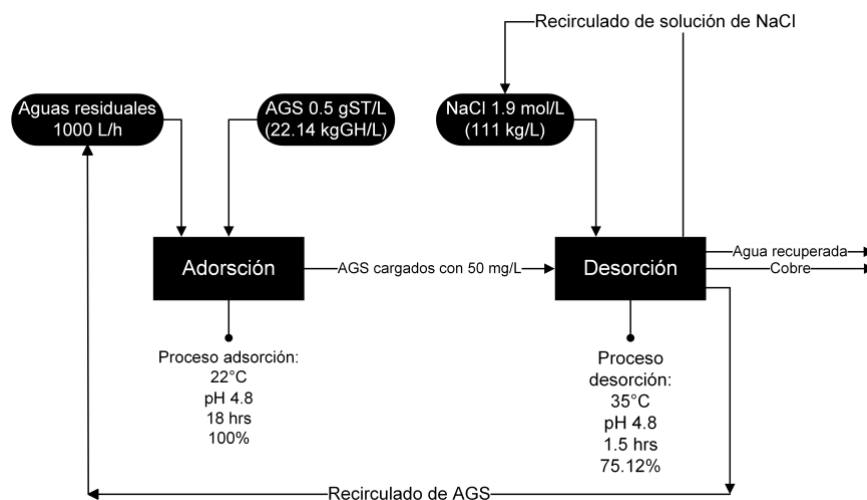
#### 4.4. Análisis económico del proceso preliminar de adsorción-desorción

El proceso preliminar de la adsorción-desorción de cobre con las condiciones optimizadas en este trabajo se describe en la Figura 4-5.



**Figura 4-5.** Diagrama de flujo del proceso preliminar de adsorción-desorción de cobre con condiciones de desorción óptimas.

Para realizar un análisis económico de este proceso preliminar y verificar su viabilidad económica, se utiliza la Ecuación 3-5 expuesta en el capítulo 3. Se supone una base de cálculo de 1000 L/ciclo de agua residual proveniente de relaves mineros con una concentración de 50 mg/L de cobre (Qian et al., 2024). El análisis se realizará en base a la simplificación del proceso representado por la Figura 4-6.



**Figura 4-6.** Diagrama de flujo del proceso preliminar de adsorción-desorción de cobre con AGS.

Considerando que se necesita una concentración de biomasa de 0,5 gST/L (22,14 gGH/L), para 1000 L/ciclo (1 m<sup>3</sup>/ciclo) de agua se necesita alrededor de 22,14 kg de AGS húmedo para un ciclo del proceso. Además, para esa cantidad de flujo se requiere 111 kg de NaCl (agente desorbente) para la una etapa de desorción.

Se estima que un ciclo del proceso de adsorción/desorción tiene una duración de 19,5 horas, considerando que el proceso de adsorción puede llegar a tardar hasta 18 horas para asegurar su totalidad (Quiroz, 2022), y que la cinética de desorción estableció el equilibrio 1,5 horas. Bajo estas condiciones, es posible recuperar 1230 L/día de aguas residuales (430 m<sup>3</sup>/año considerando 350 días de operación). En Calama, Chile el m<sup>3</sup> de agua en periodo no punta (1 Abril – 30 de Noviembre) tiene un valor de 1,36 US\$ (Asociación de Agua Potable de Antofagasta, 2024).

El estudio realizado en este informe determinó que en condiciones óptimas de operación se obtiene un 75,12% de remoción, es decir, de los 50 gramos totales presentes en el volumen de agua a tratar se recuperan aproximadamente 38 gramos de cobre cada 19,5 horas. En un día, podrían recuperarse hasta 47 gramos de Cu (16,45 kg/año considerando 350 días de operación).

El precio comercial actual del cobre es de 130 US\$/kg (Kitco Metals Inc., 2024) y el precio del cloruro de sodio es de 0,66 US\$/kg al comprar más de 25 kg (Materias Primas, 2024).

Se supone que el 100% de los AGS utilizados serán recuperados para su reuso luego del tratamiento de desorción, ya que a pesar de no desorber el 100% del cobre, al ser recirculados en el proceso seguirán adsorbiendo/desorbiendo cobre. Además, estos se obtienen de los mismos lodos de relleno sanitario que se desean tratar, por lo que de desprecia su costo. También se supuso una adsorción del 100% para cada ciclo del proceso.

En cuanto al NaCl, se supone que los 111 kg en solución para la etapa de desorción también pueden ser recirculados en su totalidad dentro del proceso.

Reemplazando los datos en la Ecuación 3-5 se obtiene que:

$$U \left[ \frac{US\$}{año} \right] = 130 \left[ \frac{US\$}{kg} \right] \cdot 16,45 \left[ \frac{kg}{año} \right] + 1,36 \left[ \frac{US\$}{m^3} \right] \cdot 430 \left[ \frac{m^3}{año} \right] - 0,66 \left[ \frac{US\$}{kg} \right] \cdot 111 \left[ \frac{kg}{año} \right]$$

Resolviendo la ecuación se obtiene una utilidad anual de:

$$U = 2650 \text{ US\$/año}$$

La utilidad anual de este proceso aporta ganancias a la industria. Así, se demuestra no solo la recuperación económica derivada de la venta de cobre recuperado y del tratamiento de agua sino también el cumplimiento con las normativas ambientales obligatorias.

Es importante destacar que la evaluación económica aquí presentada es preliminar y basada en una simplificación del proceso. Un estudio más detallado sobre la factibilidad económica de este tratamiento considerando equipos industriales, gastos de electricidad y eficiencia del proceso en general puede ser un caso de estudio relevante para el futuro. Se recomienda llevar a cabo un estudio detallado que abarque estos aspectos.

## 5. Conclusiones

Se demostró que es factible la desorción de cobre desde gránulos aeróbicos obtenidos de un reactor de columna de burbujas (BCR) de nitrificación parcial-ANAMMOX “CANON” alimentado con aguas residuales sintéticas, utilizando NaCl como agente desorbente tras llevar a cabo una serie de ensayos en laboratorio. Los resultados se validaron mediante un diseño experimental *Full Factorial* que proporcionó resultados consistentes de desorción.

Se realizaron ensayos de adsorción de Cu(II) a una concentración inicial de 1 mg/L con la finalidad de cargar de metal los AGS, para luego realizar ensayos de desorción. El proceso de desorción de cobre AGS está claramente influenciado por dos factores; la temperatura y la concentración de la sal en solución. Debido a que los gránulos del reactor BCR “CANON” se mostraron frágiles ante variaciones bruscas de pH y agitación, estos dos últimos factores no se estudiaron en detalle.

Se demostró que aumentos en la temperatura pueden acelerar la desorción del cobre desde los AGS, posiblemente facilitando la ruptura de las interacciones entre el cobre y los grupos funcionales en la matriz del lodo. La concentración de NaCl en solución demostró que a mayores concentraciones, ésta compite con el cobre por los sitios activos de adsorción en los AGS, liberando así los iones de cobre al sobrenadante.

De acuerdo con los datos entregados por el software de análisis estadístico *MODDE 7*, se determinó a partir de los coeficientes de la ecuación de respuesta del diseño, que de los dos factores evaluados, la concentración de desorbente tiene un mayor impacto en la efectividad de la desorción al poseer un coeficiente de 25,65 versus el coeficiente de la temperatura de 12,68. Además se determinó que las variables predictoras tienen un efecto significativo en la variable de respuesta.



El coeficiente de interacción obtenido es de -7,05. Al ser negativo, indica que la interacción entre los factores es desfavorable. Se requiere un equilibrio cuidadoso entre ambos factores para optimizar la desorción del cobre, ya que en una reacción de desorción, un aumento de temperatura aumenta la afinidad del cobre por los sitios de adsorción, mientras que un aumento en la concentración de NaCl aumenta la competencia por estos sitios.

Respecto al análisis económico preliminar, con el precio actual del cobre (130 US\$/kg) y un costo de NaCl de 0.66 US\$/kg, el proceso genera una utilidad anual de 2650 US\$ considerando la posibilidad de recircular el 100% del NaCl y reutilizar el AGS para minimizar los costos de insumos. Se estimó una recuperación de 16,45 kg de cobre y un tratamiento de 430 m<sup>3</sup> de agua al año. Así, se demuestra no solo la recuperación económica derivada de la venta de cobre recuperado y del tratamiento de agua sino también el cumplimiento con las normativas ambientales obligatorias.

Los resultados del software *MODDE 7* arrojaron que los valores óptimos de temperatura y concentración de NaCl para la desorción Cu(II) desde gránulos aeróbicos son 35 °C y 1,9 mol/L (111 g/L) respectivamente, entregando un porcentaje de desorción predictivo del 75,12 %. Es decir, que bajo estas condiciones, utilizando una concentración inicial de cobre de 1 mg/L con una adsorción final de 0,56 mg/L, es posible extraer 0,42 mg/L en 1,5 horas. El mayor valor de desorción fue del 77,50% mientras que los porcentaje más bajos fueron del 0% con 0,1 mol/L (5,84 g/L) de cloruro de sodio a 15 °C y 25°C, y luego del 35,71% con 1 mol/L (58,44 g/L) de NaCl a 15 °C.

## 6. Bibliografía

Adav, S. S., Lee, D. J., Show, K. Y., & Tay, J. H. (2008). Aerobic granular sludge: Recent advances. In *Biotechnology Advances* (Vol. 26, Issue 5, pp. 411–423).

<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.05.002>

Ahmady-Asbchin, S., Tabaraki, R., Jafari, N., Allahverdi, A., & Azhdehakoshpour, A. (2013). Study of nickel and copper biosorption on brown algae *Sargassum angustifolium*: Application of response surface methodology (RSM). *Environmental Technology* (United Kingdom), 34(16), 2423–2431.

<https://doi.org/10.1080/09593330.2013.772643>

Asociación de Agua Potable de Antofagasta. (2024). Tarifas actuales. Recuperado el 31 de Marzo de <http://www3.aguasantofagasta.cl/empresa/informacion-comercial/tarifas/tarifas-actuales.html>

Chen, K., Zhao, Z., Yang, X., Lei, Z., Zhang, Z., & Zhang, S. (2018). Desorption trials and granular stability of chromium loaded aerobic granular sludge from synthetic domestic wastewater treatment. *Bioresource Technology Reports*, 1, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.01.004>

Dababat, S., Berzio, S., Wichern, M., & Lübken, M. (2024). Characterization of the dewaterability of excess aerobic granular sludge. *Environmental Technology and Innovation*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103503>

EPA. (2007). Aquatic Life Ambient Freshwater Quality Criteria-Copper.

Grich, A., Bouzid, T., Naboulsi, A., Regti, A., Tahiri, A. A., el Himri, M., & el Haddad, M. (2024). Preparation of low-cost activated carbon from Doum fiber (*Chamaerops humilis*) for the removal of methylene blue: Optimization process by DOE/FFD design, characterization, and mechanism. *Journal of Molecular Structure*, 1295. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.136534>

Guzmán-Fierro, V., Arriagada, C., Gallardo, J. J., Campos, V., & Roeckel, M. (2023). Challenges of aerobic granular sludge utilization: Fast start-up strategies and cationic pollutant removal. In *Heliyon* (Vol. 9, Issue 2). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13503>

Guzmán-Fierro, V., Sanhueza, J., Arriagada, C., Pereira, L., Campos, V., Gallardo, J. J., & Roeckel, M. (2021). The prediction of partial-nitrification-anammox performance in real industrial wastewater based on granular size. *Journal of Environmental Management*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112255>

Jayakumar, R., Rajasimman, M., & Karthikeyan, C. (2015). Sorption and desorption of hexavalent chromium using a novel brown marine algae *Sargassum myriocystum*. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32(10), 2031–2046. <https://doi.org/10.1007/s11814-015-0036-8>

Kitco Metals Inc. (2024). *Copper Prices - Today's Spot Copper Price Chart - Kitco*. Recuperado el 18 de marzo de 2024 de <https://www.kitco.com>

Lackner, S., Gilbert, E. M., Vlaeminck, S. E., Joss, A., Horn, H., & van Loosdrecht, M. C. M. (2014). Full-scale partial nitrification/anammox experiences - An application survey. *Water Research*, 55, 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.02.032>

Materias Primas (2024). *Cloruro de sodio – Materias Primas*. Recuperado el 31 de marzo de 2024 de [https://materiasprimas.cl/producto/cloruro-de-sodio/?attribute\\_presentacion=25+Kgs](https://materiasprimas.cl/producto/cloruro-de-sodio/?attribute_presentacion=25+Kgs)

Metcalf, & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering (5ta ed.)*. McGraw Hill.

Nancharaiah, Y. v., & Kiran Kumar Reddy, G. (2018). Aerobic granular sludge technology: Mechanisms of granulation and biotechnological applications. In *Bioresource Technology* (Vol. 247, pp. 1128–1143). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.131>

NIST/SEMATECH. (2012). e-Handbook of Statistical Methods. <https://doi.org/https://doi.org/10.18434/M32189>

Organización mundial de la salud (OMS). (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth edition incorporating the first addendum*. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/254637/9789241549950-eng.pdf?sequence=1>

Othman, I., Anuar, A. N., Ujang, Z., Rosman, N. H., Harun, H., & Chelliapan, S. (2013). Livestock wastewater treatment using aerobic granular sludge. *Bioresource Technology*, 133, 630–634. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.149>

Qian, Y., Hu, P., Lang-Yona, N., Xu, M., Guo, C., & Gu, J. D. (2024). Global landfill leachate characteristics: Occurrences and abundances of environmental contaminants and the microbiome. *Journal of Hazardous Materials*, 461. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132446>

Quiroz, M. (2022). Evaluación de biosorción de cationes polivalentes con lodo aeróbico granular.

Revista Seguridad Minera. (2022, 31 de octubre). Relaves, protagonistas de minería secundaria. *Seguridad Minera*. <https://www.revistaseguridadminera.com/gestion-seguridad/relaves-protagonistas-de-mineria-secundaria/>

Tian, C., Wang, D., Wang, J., Lei, Z., Zhang, Z., & Shimizu, K. (2020). Desorption of hexavalent chromium from active aerobic granular sludge: Effects of operation parameters on granular bioactivity and stability. *Bioresource Technology Reports*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100457>

Umetrics AB. (2003). *MODDE 7.0.0.1 User Guide*. Recuperado el 18 de marzo de 2024.

Wang, H., Wu, G., Xiao, Y., Zhang, Z., Huang, L., Li, M., You, H., Chen, Z., Yan, J., Liu, X., & Zhang, H. (2024). Exploration of selective copper ion separation from wastewater via capacitive deionization with highly effective 3D carbon framework-anchored  $\text{Co}(\text{PO}_3)_2$  electrode. *Separation and Purification Technology*, 336. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.126205>

Wang, J., Ma, J., & Sun, Y. (2022). Adsorption of Methylene Blue by Coal-Based Activated Carbon in High-Salt Wastewater. *Water (Switzerland)*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/w14213576>

Wang, L., Liu, X., Lee, D. J., Tay, J. H., Zhang, Y., Wan, C. L., & Chen, X. F. (2018). Recent advances on biosorption by aerobic granular sludge. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 357, pp. 253–270). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.06.010>

Wang, L., Wan, C., Lee, D. J., Tay, J. H., Chen, X. F., Liu, X., & Zhang, Y. (2013). Adsorption-desorption of strontium from waters using aerobic granules. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44(3), 454–457. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2012.12.005>

Zahiri, M., & Tasharrofi, S. (2021). A novel green treatment of groundwater using dead biomass, *Schizomeris leibleinii*. *Regional Studies in Marine Science*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101845>

## 7. Anexos

### ANEXO 1: Procedimiento para montar ensayo de adsorción de cobre

- 1) Corrección de pH de aguas para desarrollar experimentos a pH 4,8.
- 2) Preparación de soluciones stock de sales de cobre:  
Se utiliza cloruro de cobre dihidratado ( $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).  
Masa molar de la sal: 170,48 g/mol  
Masa molar Cu: 63,55 g/mol  
Se prepara una solución stock de cloruro de cobre a una concentración de 0,5 g/L en un matraz de 100 mL.
- 3) Se pesan los gránulos húmedos según la concentración de biomasa que necesite el experimento, en este caso 0,5 gST/L.  
Se utiliza el valor de 0,0225863 gST/gGH encontrado experimentalmente, que da la proporción de los sólidos totales de la biomasa contenidos en el gránulo húmedo.
- 4) Se preparan los ensayos en matraces aforados de 50 mL. Primero se vierte una cama de agua al pH requerido, luego se introducen los gránulos y finalmente se vierten 0,1 mL de la solución stock de cobre para alcanzar la concentración de 1 mg/L. Por último se aforan los matraces.
- 5) Se vierte la solución desde el matraz aforado a un matraz Erlenmeyer de 50ml.
- 6) Se posicionan los matraces en la incubadora con agitación por 18 horas a 120 RPM y se toman las muestras (10 mL de la solución acuosa sobrenadante) al finalizar el tiempo.
- 7) Los resultados entregados por el laboratorio de Servicio y Asistencia Tecnológica (SAT), entregan la concentración final diluida detectada en mg/L. Para obtener la concentración real es necesario multiplicar los datos por sus respectivos factores de dilución. Estos se procesan calculando la cantidad de cobre adsorbido, restando la concentración del blanco (1 mg/L) con la concentración detectada en el sobrenadante.

## ANEXO 2: Procedimiento para montar ensayo de desorción de cobre

- 1) Corrección de pH de aguas para desarrollar experimentos a pH 4,8.
- 2) Preparación de soluciones stock de NaCl:  
Masa molar de la sal: 58,44 g/mol  
Se prepara una solución stock de cloruro de cobre a una concentración de 2 mol/L en un matraz de 250 mL. Para ello se requiere disolver 29,22 gramos de Cloruro de Sodio en 250 mL de agua desionizada.
- 3) Se separan los AGS cargados con cobre del sobrenadante y se vierten en matraces aforados de 50 mL limpios. Primero se vierte una cama de agua al pH requerido, luego se introducen los gránulos y finalmente se vierte la cantidad de solución stock de cobre requerida para alcanzar la concentración deseada (0,1 mol/L (5,84 g/L), 1 mol/L (58,44 g/L) o 1,9 mol/L (111 g/L)). Por último se aforan los matraces.
- 4) Se vierte la solución desde el matraz aforado a un matraz Erlenmeyer de 50mL.
- 5) Se posicionan los matraces en la incubadora con agitación por 1,5 horas a 120 RPM y se toman las muestras (10 mL de la solución acuosa sobrenadante) al finalizar el tiempo.
- 6) Los resultados entregados por el laboratorio de Servicio y Asistencia Tecnológica (SAT), entregan la concentración final detectada en mg/L. El resultado entregado es la cantidad de cobre desorbido desde los AGS y sólo deben multiplicarse por el respectivo factor de dilución correspondiente para obtener los mg/L desorbidos.

### ANEXO 3: Condiciones operativas específicas del reactor BCR “CANON” del laboratorio de bioingeniería UDEC

**Tabla 7-1.** Condiciones operativas específicas del reactor BCR “CANON”.

Condiciones	
pH (Tomado del licor mixto del BCR)	7,80
Nitrógeno de amonio total	0,61 g N/L
Demanda química de oxígeno	0,03 g O <sub>2</sub> /L
Tiempo de retención hidráulico	1,54 d
Tasa de carga orgánica	0,02 g O <sub>2</sub> /Ld
Tasa de carga de nitrógeno	0,34 g N/Ld
Tasa de carga de oxígeno-nitrógeno	2,86 gO <sub>2</sub> /gN
Remoción total de nitrógeno	82,20 %
Remoción de amonio	98,30 %
Remoción orgánica	57,82 %

### ANEXO 4: Valores de cobre detectados en rellenos sanitarios a nivel mundial

**Tabla 7-2.** Rango de valor mínimo-máximo de cobre detectado en rellenos sanitarios en distintos países (Qian et al., 2024).

País	Cobre (Cu) [mg/L]
US	0,01–0,73
China	0,0021–23,2
Croacia	0,058–0,064
Francia	0,22–0,73
India	< 1,95
Italia	3,048
Japón	0,06–0,1
Líbano	0,00247–0,1998
Malasia	0,39–0,79
Polonia	0,0457–0,1448
Eslovenia	0,066



## ANEXO 5: Resultados del experimento de cinética de desorción

**Tabla 7-3.** Resultados ensayos de cinética de desorción con NaCl 1 mol/L luego de 1.5 horas de tratamiento a 25°C, pH 4,8 y 120 RPM con una concentración de Cu(II) inicial de 1 mg/L y una adsorción final de 0,85 mg/L.

Tiempo [min]	Concentración de cobre detectada [mg/L]	Desorción [%]
1	0,166	19,53
2,5	0,186	21,88
5	0,2	23,53
7,5	0,2	23,53
10	0,2	23,53
20	0,22	25,88
30	0,24	28,24
40	0,26	30,59
50	0,26	30,59
60	0,26	30,59
75	0,26	30,59
90	0,26	30,59

Utilizando las ecuaciones de apartado 3.9. se obtuvo los siguientes datos estadísticos.

Para la variable de la concentración de cobre detectada [mg/L]:

- Suma de cuadrados (SS): 0,0132
- Varianza (MS): 0,00120
- Desviación estándar (SD): 0,0347
- Error estándar: 0.0100 mg/L

Para la desorción [%]:

- Suma de cuadrados: 183,35
- Varianza: 16,67
- Desviación estándar: 4,08
- Error estándar: 1,18 %

ANEXO 6: Análisis ANOVA del diseño experimental *Full Factorial* en *MODDE 7*

**Tabla 7-4.** Análisis de Varianza (ANOVA).

% Desorción	DF	SS	MS (varianza)	F	p	SD
Total	12	28859,1	2404,92			
Constante	1	23061,6	23061,6			
Total corregido	11	5797,5	527,046			22,957
Regresión	3	5112,21	1704,07	19,8929	0,000	41,280
Residual	8	685,297	85,6621			9,2553
Falta de ajuste (Error del modelo)	5	650,248	130,05	11,1317	0,037	11,403
Error puro (Error de réplica)	3	35,0485	11,6828			3,4180
	N = 12	Q <sup>2</sup> =	0,720	N° cnd.=	1,7321	
	DF = 8	R <sup>2</sup> =	0,882	Y-miss=	0	
		R <sup>2</sup> (Ajustado) =	0,837	RSD=	9,2554	

Donde:

- DF (Grados de Libertad): Indica la cantidad de valores en el cálculo final de una estadística que pueden variar libremente.
- SS (Suma de Cuadrados): Una medida de la varianza total en los datos.
- MS (Cuadrado Medio o Varianza): El promedio de los cuadrados de los errores (SS dividido por DF).
- F: Una relación de varianzas que sigue la distribución F bajo la hipótesis nula.

- $p$ : La probabilidad de observar el estadístico  $F$ , asumiendo que la hipótesis nula es cierta.
- SD (Desviación Estándar): Una medida de la cantidad de variación o dispersión en un conjunto de valores.

La tabla está dividida en diferentes componentes del ANOVA:

- Total: La varianza general en los datos.
- Constante: La varianza explicada por la media general.
- Total Corregido: La varianza total menos la varianza explicada por la media general.
- Regresión: La varianza explicada por el modelo.
- Residual: La varianza no explicada por el modelo, también conocida como varianza de error.
- Falta de Ajuste: La parte de la varianza residual que se debe a que el modelo no se ajusta a los datos.
- Error Puro (Error de Réplica): La parte de la varianza residual que se debe a la aleatoriedad o la variabilidad inherente en los datos.

La sección inferior de la tabla proporciona métricas adicionales:

- $N$ : El número de observaciones.
- $Q^2$ : Una medida de la precisión predictiva del modelo.
- $R^2$ : La proporción de la varianza explicada por el modelo.
- $R^2$  Ajustado ( $R^2$  Adj.): Una versión modificada de  $R^2$  que ha sido ajustada por el número de predictores en el modelo.
- $N^\circ$  cond.: El número de condición, que puede indicar problemas de multicolinealidad si es muy alto.
- Y-miss: La cantidad de datos faltantes en la variable dependiente.
- RSD (Desviación Estándar Residual): Una medida de la dispersión de los errores del modelo.

La tabla también indica que el modelo parece tener un buen ajuste, con un valor  $R^2$  de 0,806, lo que significa que el modelo explica el 80,6% de la variabilidad de los datos. Además, el valor p asociado al estadístico F de la regresión es 0, lo que sugiere que el modelo es estadísticamente significativo.

## RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento	: Departamento de Ingeniería Química.
Carrera	: Ingeniería Civil Química.
Nombre del memorista	: Ignacio Alejandro Fernández Guglielmi.
Título de la memoria	: Optimización de la desorción de cobre utilizando gránulos de bioreactores.
Fecha de la presentación oral	:
Profesor Guía	: Marlene Doris Roeckel von Bennewitz
Profesor Revisor	: Katherina Fabiola Fernández Elgueta
Concepto	:
Calificación	:

### Resumen:

El lodo aeróbico granular (AGS) puede ser utilizado como un material adsorbente de metales pesados en el tratamiento de aguas. Sin embargo, la desorción de metales es aún un campo sin explorar. Este estudio se enfoca en la optimización del proceso de desorción de cobre, mediante un diseño experimental. La presencia de iones de cobre en efluentes industriales representa un desafío ambiental significativo debido a su toxicidad y persistencia.

El objetivo principal del estudio fue determinar las condiciones óptimas para maximizar el rendimiento de desorción de cobre desde AGS, utilizando un diseño experimental *Full Factorial* de dos factores y tres niveles. La metodología incluyó la caracterización de AGS, cinética de desorción, descripción del diseño aplicado y ensayos de adsorción y desorción. Se realizaron ensayos de adsorción de cobre con concentraciones entre 1 mg/L a 500 mg/L. Los AGS adsorbieron una concentración de cobre de 0,56 mg/L. La optimización de la desorción se realizó variando la temperatura en un rango de 15 °C y 35 °C y la concentración del agente desorbedor (NaCl) entre 0,1 mol/L (5,84 g/L) y 1,9 mol/L (111 g/L), según la combinación de niveles establecidos por el diseño.

Los resultados revelaron que la concentración de NaCl es el factor más influyente en la desorción, con un modelo predictivo que sugiere que las condiciones óptimas para la desorción de cobre son una temperatura de 35 °C y una concentración de NaCl de 1,9 mol/L (111 g/L), alcanzando un porcentaje de desorción predictivo de 75,12% dentro de un tiempo de desorción de 1,5 horas.

Estos resultados demuestran que los AGS no sólo son efectivos para la adsorción de cobre, sino que también permiten su recuperación eficiente, ofreciendo un enfoque sustentable para el tratamiento de aguas residuales y la reutilización de metales valiosos, lo que permite avanzar en los sistemas de tratamiento de agua en procesos de economía circular.