

Programa Universitario de Investigación en Desarrollo Industrial  
(nombre del programa universitario de investigación de la Digi)

Reducción de metales pesados en residuos líquidos utilizando reacciones precipitométricas y reuso de un subproducto en un ensayo de agregados para concretos.  
nombre del proyecto de investigación

4.8.63.0.50

Partida presupuestaria

DES5-2022

código del proyecto de investigación

Centro de Investigaciones de Ingeniería

unidad académica o centro no adscrito a unidad académica avaladora

Ing. José Ricardo De León Solís

nombre del coordinador del proyecto y equipo de investigación contratado por Digi

Guatemala, 28/02/2023

lugar y fecha de presentación del informe final dd/mm/año

## **Autoridades**

Dra. Alice Burgos Paniagua  
Directora General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar  
Coordinador General de Programas

Inga. Liuba María Cabrera Ovalle de Villagrán  
Coordinadora del Programa de Investigación

## **Autores**

Ing. José Ricardo De León Solís

Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación (Digi), 2022.  
El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la Digi de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria 4.8.63.0.50 con código DES5-2022 en el Programa Universitario de Investigación en Desarrollo Industrial.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.

## 1 Índice general

1	Índice general .....	3
2	Resumen y palabras clave .....	3
3	Introducción .....	4
4	Planteamiento del problema .....	6
5	Delimitación en tiempo y espacio .....	7
	5.1 Delimitación en tiempo .....	7
	5.2 Delimitación espacial .....	8
6	Marco teórico .....	8
7	Estado del arte .....	10
8	Objetivos (generales y específicos) .....	10
9	Hipótesis (si aplica) .....	11
10	Materiales y métodos .....	12
	12.1 Enfoque de la investigación .....	12
	12.2 Método .....	12
	12.3 Recolección de la información .....	14
	12.4 Técnicas e instrumentos .....	14
	12.5 Procesamiento y análisis de la información .....	15
11	Resultados y discusión .....	15
12	Referencias .....	21
13	Vinculación .....	23
14	Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual .....	23
15	Aporte de la propuesta a los ODS .....	23
16	Declaración del Coordinador del proyecto de investigación .....	23
17	Aval de la Directora del instituto, centro o departamento de investigación .....	24
18	Visado de la Dirección General de Investigación .....	25

## 2 Resumen y palabras clave

El presente trabajo compara dos procesos para tratar el residuo del ensayo de la demanda química de oxígeno y producir cristales de sulfato de sodio aptos para su uso en el ensayo de solidez de agregados bajo la norma ASTM C88/C88M. Se realizó la predicción teórica del porcentaje de metales pesados residuales en los cristales de sulfato de sodio obtenidos en cada proceso empleando conocimientos establecidos como el equilibrio de solubilidad y de oxidorreducción. El primer proceso estudiado fue el desarrollado por Benitez-Pacheco y el segundo fue una modificación del proceso anterior sugerido por el grupo de investigación que realizó estas predicciones. Las predicciones teóricas sugieren que ambos procesos son capaces de producir cristales con cantidades residuales de metales pesados que cumplen con lo requisitos de la norma, pero el segundo proceso reduce los metales pesados 3 órdenes magnitud más que el primero.

Palabras clave: DQO, tratamiento de desechos, desechos de laboratorio, economía circular, simbiosis industrial, sostenibilidad ambiental.

Abstract and keywords

The present work compares two processes to treat the chemical oxygen demand test residue and produce sodium sulfate crystals suitable for use in the aggregate soundness test under the ASTM C88/C88M standard. Theoretical predictions of the percentage of residual heavy metals in the sodium sulfate crystals obtained in each process were made using established knowledge such as solubility and oxidation-reduction equilibrium. The first process studied was the one developed by Benitez-Pacheco and the second was a modification of the previous process suggested by the research group that made these predictions. Theoretical predictions suggest that both processes are capable of producing crystals with residual amounts of heavy metals that meet the requirements of the standard, but the second process reduces the heavy metals 3 orders of magnitude more than the first process.

Keywords: COD, waste treatment, laboratory wastes, circular economy, industrial symbiosis, environmental sustainability.

### **3 Introducción**

La demanda química de oxígeno (DQO) es uno de los parámetros ambientales medidos con más frecuencia en aguas residuales y cuerpos de agua para determinar la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica biodegradable o no biodegradable presente en el agua (Besagas & Rosario, 2010). El reactivo utilizado para medir el DQO contiene ácido crómico, sulfato de mercurio, sulfato de plata y ácido sulfúrico. Estos componentes son agentes tóxicos para las distintas formas de vida. El ácido crómico es una de las especies químicas que contienen cromo hexavalente (Cr(VI)). Estos compuestos son carcinógenos tanto en animales como en humanos y su potencialidad aumenta con aquellos que poseen alta solubilidad en agua (Costa, 1997). El sulfato de mercurio provoca anuria (no excreción de orina) (Magos & Clarkson, 2006) en humanos. Debido a que cualquier compuesto con mercurio puede originar la producción de metilmercurio en el agua (Dean et al., 1971), puede llegar a tener efectos neurotóxicos. Además, bajo esta forma química, permanece en el cuerpo por un largo periodo debido a que tiene una vida media de 50 días (Magos & Clarkson, 2006). Los compuestos de plata son especialmente tóxicos para las formas de vida acuáticas. La toxicidad de estos compuestos depende tanto del estado de oxidación de la plata, así como del anión que lo acompaña (Eisler, 1996; Ratte, 1999). El sulfato de plata es un orden de magnitud menos tóxico que el nitrato de plata, pero mucho más tóxico que el tiosulfato de plata que resultó ser inocuo a la concentración más alta a la que fue ensayado (Ratte, 1999). El ácido sulfúrico y otros ácidos fuertes pueden alterar ecosistemas acuáticos y sus efectos varían entre la reducción de la diversidad en las comunidades y la eliminación de todos los organismos en ciertas comunidades (Dillon et al., 1984). Debido a la toxicidad de estos reactivos, algunos estudios han abordado el tratamiento del residuo generado durante los ensayos de laboratorio. La agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA) desarrolló un método para separar el mercurio del residuo por precipitación con tiosulfato de sodio (Dean et al., 1971). Sin embargo, este método no permite recuperar el mercurio precipitado (Aslam & Walker, 1982). En su método, separan el mercurio y la plata del reactivo empleando cloruro de sodio para precipitar la plata y sulfuro ferroso para precipitar el mercurio. El precipitado de cloruro de plata fue tratado con zinc en polvo para formar plata metálica en polvo y el precipitado de sulfuro de mercurio fue tratado con ácido clorhídrico, agua regia, etanol al 50% (v/v), hidróxido de sodio 6N y ácido sulfúrico diluido para obtener

sub sulfato de mercurio (Aslam & Walker, 1982). Otros estudios abordan la recuperación del mercurio y del cromo. Besagas y Del Rosario (2010) emplearon limaduras de hierro para reducir el Cr(VI) a Cr(III), que es una forma no tóxica del cromo, y la precipitación del cloruro de mercurio, seguida de la digestión de este precipitado en ácido sulfúrico concentrado para obtener sulfato de mercurio (Besagas & Rosario, 2010). Djaenudin y Wiyani (2019) eliminaron cromo, mercurio y hierro del reactivo empleando únicamente hidróxido de sodio (Djaenudin & Wiyani, 2019). A pesar de existir estudios que abordan el tratamiento y el reuso del residuo de la DQO, todos lo hacen de forma parcial. Ninguno de los estudios mencionados intenta desarrollar un método para separar y recuperar el cromo, el mercurio y la plata en un mismo proceso y ninguno considera el tratamiento del ácido sulfúrico, que representa hasta un 90% del contenido total. El presente proyecto de investigación contempla un proceso que separe en una sola etapa el Cr (VI), Hg (II) y Ag (I) contenido en el residuo de la DQO utilizando zinc en polvo.

Asimismo, el proceso desarrollado buscará minimizar y reusar los desechos generados, conforme a los objetivos de la Economía Circular. Geissdoerfer y colaboradores (2017), define la Economía Circular (EC) como un sistema regenerativo en el que se minimiza la entrada de recursos y los residuos, las emisiones y las fugas de energía mediante la ralentización, el cierre y el estrechamiento de los ciclos de materia y energía (Geissdoerfer et al., 2017). Los estudios en EC han surgido debido a la necesidad de hacer un mejor uso de los recursos, los desechos y las fugas, pasando de un modelo lineal a uno circular, con la idea de beneficiar tanto a los actores económicos, como al ambiente (Geissdoerfer et al., 2017). Besagas y Del Rosario (2010), utilizaron el concepto de EC y lo emplearon para identificar el efecto de enmascaramiento del sulfato de mercurio recuperado de desechos de DQO. En este estudio se compararon la DQO medida en tres lotes de una solución sintética que contenía cloruro de sodio, uno de los cuales contenía el sulfato de mercurio recuperado (Besagas & Rosario, 2010). La reutilización de subproductos provenientes del manejo adecuado de desechos líquidos ha motivado esta propuesta de investigación. Dentro de las etapas del proceso desarrollado para este proyecto se encuentra la precipitación de metales pesados provenientes del desecho de líquido del DQO. Adicionalmente, se neutralizará el ácido sulfúrico para formar sulfato de sodio. Este compuesto será purificado y reutilizado en una prueba de solidez de los agregados en el concreto.

Esta propuesta se realizará por medio de un diseño con dos factores cruzados: el tipo de reactivo tratado (el blanco o el reactivo usado) y el tipo de proceso realizado (múltiple etapa o una etapa), con dos niveles cada uno (diseño 22). Además se va a estudiar la influencia de la cantidad de Zn(0) agregado como parte de los procesos en la composición de los cristales de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Debido a que el proceso de múltiple etapa y el proceso de una sola etapa tienen requerimientos de Zn(0) distintos, se utilizará una variable está anidada para identificar la influencia de esta variable en ambos procesos. En total se realizarán 5 repeticiones para cada una de las muestras; siendo en total 40 unidades experimentales. Las hipótesis serán evaluadas con un nivel de confiabilidad será del 95%. Las hipótesis nulas serán rechazadas si el valor de p asociado al resultado observado es igual o menor que el nivel de significancia ( $p \leq 0.05$ ).

## 4 Planteamiento del problema

El concepto de economía circular ha ganado importancia en la generación de proyectos relacionado a temas de sostenibilidad (Sauvé et al., 2016). La economía circular se basa en

un sistema regenerativo en donde las entradas de recursos, los desperdicios, las pérdidas de energía son minimizados por medio de la creación de ciclos de energía y de materiales (Morseletto, 2020). La aplicación de los principios economía circular para el desarrollo sostenible se ha utilizado en países como Rumania para renfocar el uso de desechos ecológicos, teniendo en cuenta los recursos ambientales existentes y el objetivo de generar cero desechos (Iuga, 2016). Otros países como China (Li & Li, 2011) e India (Singh et al., 2018) también han utilizado este enfoque para el desarrollo de proyectos que mitiguen el efecto de los desechos industriales o agroindustriales que se generan durante los procesos de producción. En América Latina, en especial para Guatemala, este enfoque se ha empleado para el análisis de procesos sociales, específicamente utilizado en jóvenes de las áreas más pobres de la ciudad capital (Kumble, 2019); pero todavía existe un área de oportunidad de emplear este concepto en procesos ambientales.

Un componente importante de la economía circular es la ecología industrial. Según Chertow y colaboradores (2008), la Ecología Industrial es un campo de estudio centrado en las etapas de los procesos de producción de bienes y servicios desde un punto de vista de la naturaleza, tratando de imitar un sistema natural conservando y reutilizando los recursos. Dado que un sistema involucra la interacción de varias partes, no es posible establecer estos sistemas por cuenta propia ya que se requiere la cooperación de varias industrias para establecer un ecosistema industrial, en el que los flujos de las materias primas sea un circuito cerrado. Sin embargo, es posible establecer uno de los eslabones necesarios para crear la cadena que permita crear este circuito.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales podrían convertirse en una parte importante de la sostenibilidad circular debido a la integración de la producción de energía y la recuperación de recursos durante la producción el agua limpia (Neczaj & Grosser, 2018). En las plantas de tratamiento de agua se cuantifica la demanda química de oxígeno (DQO). Este es uno de los parámetros ambientales medidos con más frecuencia para cuantificar la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica (biodegradable o no biodegradable) presente en el agua (Besagas & Rosario, 2010).

Para la medición del DQO se utilizan kits comerciales que en su mayoría contienen metales pesados tóxicos como mercurio, plata y cromo que se encuentran en una solución ácida obtenida por la adición de ácido sulfúrico concentrado (Chavalparit et al., 2008). El mercurio que se descarga a cuerpos acuáticos tiene la capacidad de convertirse en compuestos de metilmercurio, que son cien veces más tóxicos que sales inorgánicas de mercurio. El ion plata disuelto en agua es letal para las plantas acuáticas sensibles, invertebrados y teleósteos a concentraciones de agua de 1.2-4.9  $\mu\text{g/L}$  (Eisler, 1996). De igual manera el cromo en su forma hexavalente es un compuesto carcinógeno tanto en animales como en humanos y su potencialidad aumenta cuando posee alta solubilidad en agua (Costa, 1997). Debido a la alta toxicidad de estos compuestos diferentes estudios se han realizado para poder separarlos y disponerlos de una manera que no afecte al ser humano ni al medio ambiente. El cromo hexavalente ha sido reducido a cromo trivalente utilizando sílica gel y  $\text{Zn}(0)$ . Este estudio determinó que la reducción de  $\text{Cr(VI)}$  está relacionado con el pH de la solución, la carga de gel de sílice o  $\text{Zn}(0)$  y el área superficial de la sílica gel (Guo et al., 2012). Djaenudin y Wiyani (2019) precipitaron el cromo, mercurio y hierro presente en el reactivo del DQO utilizando hidróxido de sodio y variando el pH; sin embargo la concentración final de Hg aún excedía el estándar de calidad de las aguas residuales (Djaenudin & Wiyani, 2019). A pesar de dichos estudios sobre el tratamiento y el reúso del residuo de la DQO, existe un área de

oportunidad para desarrollar un método que estudie la remoción del cromo, mercurio y plata en una misma etapa de separación. Los estudios que se han ejecutado sobre el tema realizan los procesos de separación por separado (Benítez-Pacheco et al., 2012) y no han determinado el efecto de todos los iones en la eficiencia de la remoción de los metales pesados. Adicionalmente, no se ha estudiado la reutilización del ácido sulfúrico que es uno de los compuestos mayoritarios presentes en la solución. Este proyecto busca obtener un proceso de separación de los compuestos tóxicos de los kits comerciales para medir DQO por medio de reacciones de reducción-precipitación en una sola etapa de separación utilizando Zn(0). Adicionalmente, se pretende reutilizar el sulfato de sodio purificado obtenido de dichas reacciones para medir la solidez de los agregados utilizados en concreto, ya que este reactivo es uno de los productos que se puede emplear para realizar este ensayo. Se comparará los resultados de este ensayo empleado Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> grado reactivo y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> obtenidos de los procesos de purificación a estudiar como parte de esta propuesta. Este proyecto busca una alternativa para el manejo de desechos líquidos que contengan metales pesados y que integre los conceptos de economía circular y ecología industrial en procesos ambientales para Guatemala.

## 5 Delimitación en tiempo y espacio

### 5.1 Delimitación en tiempo

Duración del proyecto: 11 meses. Fecha de inicio: 1 de febrero de 2022. Fecha finalización: 31 de diciembre de 2022. La Tabla 1 muestra la delimitación en tiempo del proyecto.

**Tabla 1**

*Delimitación en tiempo del proyecto*

No.	Espacios	Actividades	Tiempo
1	Laboratorio de Química Escuela de Ingeniería Química	Tratamiento de los residuos líquidos de la DQO y de los blancos.	4
2	I2QB3, Universidad Mariano Gálvez	Determinación de las concentraciones de Cr, Hg, Ag y Zn en los sólidos	3
3	Centro de Investigaciones ingeniería	de de Elaboración del artículo científico e informe final	1
4	Facultad de Ingeniería – Universidad Mariano Gálvez	Divulgación de la información	1

## 5.2 Delimitación espacial

El tratamiento de los residuos líquidos, la determinación del porcentaje de sulfatos y la cantidad agua en los cristales se realizarán en el laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería de la USAC (edificio T5, Facultad de Ingeniería, USAC. Ciudad de Guatemala zona 12). El análisis de metales pesado se realizará en el I2QB3, en la Universidad Mariano Gálvez (UMG) (Edificio CS-1, finca el Zapote Zona 2, Ciudad de Guatemala).

## 6 Marco teórico

- Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO se ha definido como la cantidad de un oxidante (en términos de equivalencia de oxígeno) consumida durante la oxidación de materia orgánica por agentes oxidantes fuertes como dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) o permanganato de potasio ( $KMnO_4$ ). La determinación de DQO utilizando  $K_2Cr_2O_7$  se denomina  $DQOCr$ , que se utiliza principalmente para evaluar la calidad del agua en o cuerpos de agua moderadamente contaminados como aguas residuales o aguas residuales. Por otro lado, el análisis de DQO con  $KMnO_4$  se conoce como  $DQOMn$  o índice de permanganato y generalmente se prefiere en cuerpos de agua relativamente limpios como el agua de la superficie o del río. La DQO se considera como parámetro principal para las pruebas de calidad del agua (Hu & Grasso, 2004).

- Precipitación de especies en solución

La precipitación es la formación espontánea de un sólido a partir de una solución sobresaturada que lo contiene. Esto sólo es posible cuando la concentración del sólido en la solución es superior a su solubilidad. Una forma común de inducir este proceso es añadiendo una sustancia que reaccione químicamente con una de las especies en solución, formando un producto mucho menos soluble que el presente originalmente en la solución (Flowers et al., 2019).

- Reacciones de oxidorreducción

Las reacciones de oxidorreducción son un tipo de reacción química en la que los estados de oxidación de los átomos cambian. Como resultado de estos cambios en el estado de oxidación, se produce una transferencia de electrones entre especies químicas. Este tipo de reacciones requiere que esté presente un donador de electrones, llamado el agente reductor, y un aceptor de electrones, llamado el oxidante (Flowers et al., 2019).

- Amalgamas

Una amalgama es una aleación de mercurio con otro metal en el cual el metal se disuelve en el mercurio. Estas aleaciones pueden ser líquidas, pastosas o sólidas en función de la proporción de mercurio presente. El mercurio puede formar amalgamas con la mayoría de metales con excepción del hierro, platino, tungsteno y tántalo (Flowers et al., 2019).

- Equilibrio químico

El equilibrio químico se produce cuando, en una reacción química reversible del tipo  $A + B \rightleftharpoons C + D$ , donde A y B son los reactivos y C y D son los productos, la velocidad de reacción de los reactivos es igual a la velocidad de reacción de los productos. Esto implica que, en el equilibrio químico, la composición de los reactivos y productos no cambia

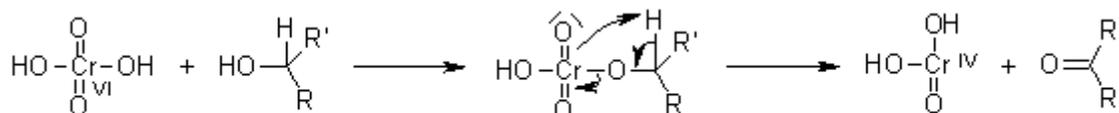
conforme avanza el tiempo. Las concentraciones relativas de reactivos y productos de sistemas en equilibrio químico no es la misma para cada uno de ellos. En unos sistemas la abundancia de los productos es mayor, en otros hay más reactivos que productos y en otros hay cantidades significativas de ambos. Una vez alcanzado, es posible calcular la constante de equilibrio, que es el cociente entre el producto de las concentraciones de los productos de la reacción y el producto de las concentraciones de los reactivos (Flowers et al., 2019).

- Procesos químicos esperados

Con base en los procesos descritos anteriormente y en los equilibrios químicos que se pueden producir en función de las especies químicas presentes en el reactivo de la DQO y en los reactivos que se le van a agregar, se espera que se produzcan una serie de reacciones de oxidorreducción y de precipitación, según Flowers (2019). Al agregar 2-propanol al reactivo de la DQO, éste reacciona con el cromo hexavalente según se muestra en la siguiente figura:

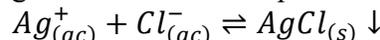
**Figura 1**

*Mecanismo de oxidación de alcoholes con ácido crómico*

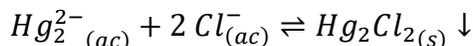


Este es el mecanismo de la oxidación de Jones para alcoholes secundarios (Flowers et al., 2019).

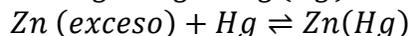
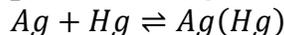
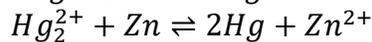
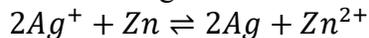
Cuando se emplea cloruro de sodio para separar los iones plata y mercuriosos, estos iones precipitan, produciéndose las siguientes reacciones químicas:



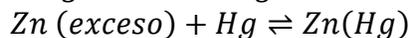
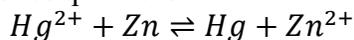
Y:



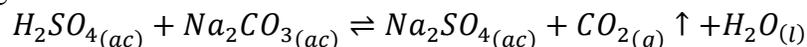
Cuando se agrega cinc para separar los iones plata y mercuriosos, se produce la reducción de estos iones a sus formas elementales, así como la amalgamación simultánea de la plata y el cinc en exceso, como se muestra en las siguientes reacciones químicas:



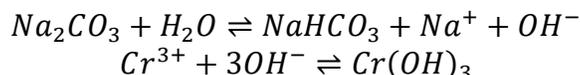
Cuando se agrega cinc para separar los iones mercúricos, se produce la reducción de estos a su forma elemental, así como la amalgamación simultánea de cinc en exceso con, como se muestra en las siguientes reacciones químicas:



Finalmente, al agregar  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al reactivo de la DQO, se neutraliza el  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , el componente mayoritario del reactivo, para formar el sulfato de sodio, según la reacción ácido-base siguiente:



Además de neutralizar el  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , como este reactivo se agrega después de la reducción del cromo hexavalente, el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  también reacciona con el ion  $\text{Cr}^{3+}$  resultante por medio de las siguientes reacciones:



## 7 Estado del arte

Como se mencionó en la introducción, los estudios realizados por Aslam y Walker (1982), Besagas y Rosario (2010), Dean y colaboradores (1971) y Djaenudin y Wiyani, (2019) abordan el tratamiento de uno o varios componentes del reactivo de la DQO. Además, el estudio de Benitez-Pacheco (2012) aborda el tratamiento de todos los componentes del reactivo. Este último ha sido el estudio más ambicioso en cuanto a alcance se refiere y ha servido como base para la elaboración de este proyecto.

No obstante, debido a que este estudio empleó viales del reactivo suministrados por casas distintas, con capacidad para medir concentraciones distintas de DQO, a distintos laboratorios, con distintas matrices de análisis, hace que la variabilidad de este estudio sea alta. Este es un problema que se desea rectificar en esta propuesta. El estudio de Besagas y Rosario (2010) evaluó la posibilidad de reusar el sulfato de mercurio en el reactivo de la DQO, uno de los componentes minoritarios del reactivo, lo que lo hace único en su alcance, dado que es el único que ha estudiados aspectos relacionados con la economía circular y la ecología industrial. Este último aspecto del estudio de Besagas y Rosario (2010) se desea emular al evaluar el reúso del sulfato de sodio, proveniente de la neutralización del ácido sulfúrico (el componente mayoritario del reactivo), en el ensayo de solidez de agregados. Este reúso fue propuesto por Benítez-Pacheco (2012) en la sección de recomendaciones de su estudio.

## 8 Objetivos

### General

Realizar la reducción-precipitación del cromo, mercurio y plata contenido en el residuo de la DQO utilizando  $\text{Zn}(0)$  en polvo y reutilizar el subproducto generado de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  en una prueba de solidez de agregados de concreto.

### Específicos

1. Determinar la eficiencia de separación de una sola etapa para la reducción-precipitación de cromo total, mercurio total y plata contenidos en el residuo de la DQO utilizando  $\text{Zn}(0)$  en polvo.
2. Comparar el proceso de separación de una sola etapa con el proceso de múltiples etapas por medio de la cuantificación cromo total, mercurio total, plata y zinc remanente en la solución.

3. Obtener  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  hidratado por medio de los procesos de reducción-precipitación de los residuos líquidos del ensayo de la DQO.
4. Comparar el desempeño de ambos procesos de separación en función de la cantidad de trazas de cromo total, mercurio total, plata y zinc presentes en los cristales de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .
5. Evaluar el efecto de los cristales de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  hidratado obtenidos mediante los procesos precipitométricos sobre la prueba de solidez bajo la norma ASTM C88 / C88M-18.

## 9 Hipótesis

### Hipótesis de investigación

- H1. El contenido de cromo total, mercurio total y plata disminuirá al realizar la reducción-precipitación con  $\text{Zn}(0)$  en polvo utilizando una sola etapa de separación.
- H2. El proceso de separación de una sola etapa disminuirá en mayor porcentaje la concentración de cromo total, mercurio total, plata y zinc en comparación con el proceso de múltiples etapas.
- H3. El proceso de reducción-precipitación producirán cristales de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  hidratado a partir del residuo líquido de la DQO con un rendimiento mayor al 50%.
- H4. La cantidad de trazas de cromo total, mercurio total, plata y zinc contenidas en los cristales de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  hidratado es menor utilizando el proceso de separación en una sola etapa, comparado con el proceso de múltiples etapas.
- H5. El uso de cristales de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  hidratado provenientes de los procesos de reducción-precipitación cumplen con las especificaciones del ensayo de solidez de agregados de concreto.

### Hipótesis Nula

- H1. El contenido de cromo total, mercurio total y plata no disminuirá al realizar la reducción-precipitación con  $\text{Zn}(0)$  en polvo en una sola etapa de separación.
- H2. El proceso de separación de una sola etapa no disminuirá en mayor porcentaje la concentración de cromo total, mercurio total, plata y zinc en comparación con el proceso de múltiples etapas.
- H3. El proceso de reducción-precipitación no producirán no cristales de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  hidratado a partir del residuo líquido de la DQO con un rendimiento mayor al 50%.
- H4. La cantidad de trazas de cromo total, mercurio total, plata y zinc contenidas en los cristales de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  hidratado no es menor utilizando el proceso de separación en una sola etapa, comparado con el proceso de múltiples etapas.
- H5. El uso de cristales de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  hidratado provenientes de los procesos de reducción-precipitación no cumplen con las especificaciones del ensayo de solidez de agregados de concreto.

## 10 Materiales y métodos

### 10.1 Enfoque de la investigación

El enfoque de la investigación que se empleará en este proyecto es cuantitativo. Los resultados obtenidos de estas mediciones, junto con el análisis estadístico de éstos, se van a emplear para probar o refutar las hipótesis del proyecto.

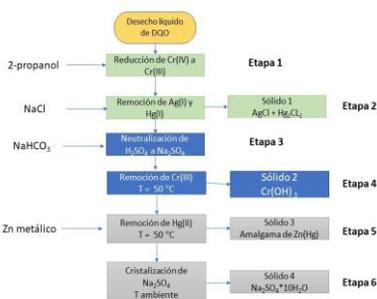
## 10.2 Método

- Proceso de separación de múltiples etapas

El objetivo de esta investigación es realizar la reducción-precipitación del Cr (VI), Hg (II) y Ag (I) contenidos en el residuo de la DQO utilizando Zn (0) en polvo y reutilizar subproducto generado de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> generado en una prueba de solidez de agregados de concreto. Para la reducción de los metales utilizando múltiples etapas se utilizará la metodología propuesta por Benítez-Pacheco y colaboradores (2012) ilustrada en la Figura 1. El primer paso de este proceso es (proceso I) es agregar 2-propanol para reducir el Cr(VI), formando Cr(III), acetona y agua. Se agregará este reactivo hasta alcanzar un potencial de oxidorreducción de -300 mV. A continuación, se agrega cloruro de sodio para precipitar los iones Ag(I) y Hg(I), formando AgCl, HgCl y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Las sales de plata y mercurio resultantes se separan utilizando papel filtro. Luego se agrega carbonato de sodio para neutralizar el ácido sulfúrico y precipitar los iones Cr(III) formando Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Cr(OH)<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub>. El hidróxido de cromo resultante también se separa por filtración. Dado que la reacción de neutralización del ácido sulfúrico es exotérmica, la solución se calienta espontáneamente. Si hace falta la temperatura de la solución se ajusta para que esté a 50°C. Posteriormente se agrega zinc metálico granular, el cual reduce el Hg(II) a Hg(0), lo cual le permite formar una amalgama con el zinc restante. La amalgama, al ser insoluble, también se separa por medio de filtración. Finalmente, se enfría la solución para cristalizar el Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> formado previamente y luego se seca en un horno.

**Figura 1**

*Diagrama de flujo para el proceso del tratamiento del desecho líquido de DQO (Proceso I).*



- Reducción-precipitación con Zn(0) en polvo (una sola etapa de separación)

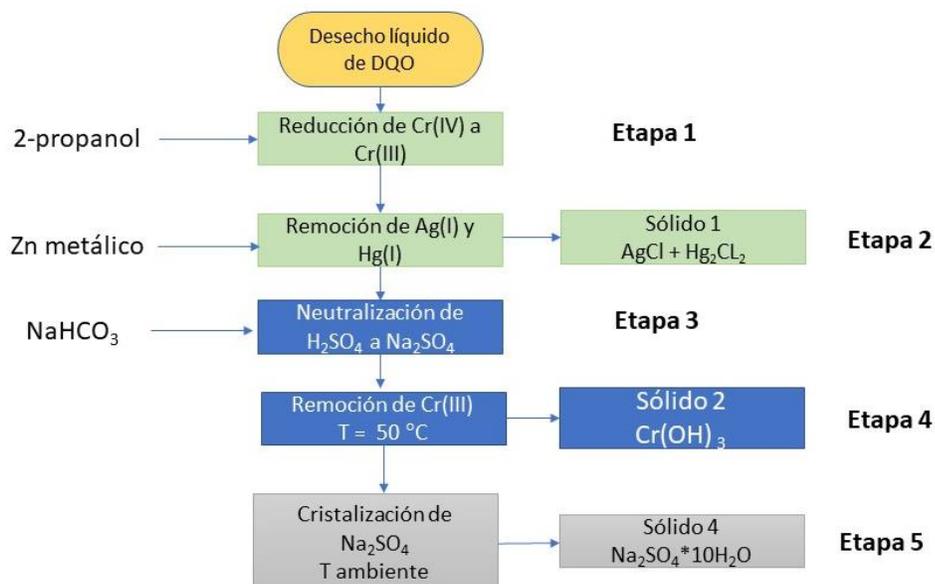
Este proyecto estudiará una modificación a la metodología propuesta por Benítez-Pacheco y colaboradores (2012), ilustrada en la Figura 2 (proceso II). Después de la adición de 2-propanol, en lugar de agregar cloruro de sodio para precipitar los iones Ag(I) y Hg(I), se añadirá Zn en polvo para reducir simultáneamente los iones Ag(I), Cr(III), Hg(I) y Hg(II) y formar amalgamas de Zn, Ag y Cr.

Para evaluar la eficiencia de cada proceso, se tomará una muestra líquida del reactivo previo al tratamiento (muestra líquida 1), se tomará una muestra de la solución previo a la

cristalización del  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (muestra líquida 2), y se analizarán todos los subproductos sólidos obtenidos en cada proceso para determinar la cantidad de cromo total, mercurio total, plata y zinc. La razón por la cual se mide cromo total en lugar de  $\text{Cr(VI)}$  y mercurio total en lugar de  $\text{Hg(II)}$  es porque no se cuenta con un método que pueda distinguir en las distintas valencias de un mismo metal. La cuantificación de los metales se realizará por medio de espectroscopía de absorción atómica. El detalle de los análisis a realizar por muestra se encuentra en la Tabla 2

**Figura 2**

*Diagrama de flujo para el proceso del tratamiento del desecho líquido de DQO. Modificación de etapa 2 para la reducción de pasos para el tratamiento (Proceso II).*



**Tabla 2**

*Detalle de los análisis de metales a realizar por cada muestra*

Tipo de muestra	Proceso I	Proceso II
Muestra líquida 1	[Ag], [Cr], [Hg]	[Ag], [Cr], [Hg]
Muestra líquida 2	[Ag], [Cr], [Hg], [Zn]	[Ag], [Cr], [Hg], [Zn]
Sólido 1	[Ag], [Cr], [Hg]	[Ag], [Cr], [Hg], [Zn]
Sólido 2	[Ag], [Cr], [Hg]	[Ag], [Cr], [Hg], [Zn]
Sólido 3	[Ag], [Cr], [Hg], [Zn]	No aplica
Sólido 4	[Ag], [Cr], [Hg], [Zn]	[Ag], [Cr], [Hg], [Zn]

### 10.3 Recolección de información

La recolección de información se realizará por medio de un diseño con dos factores cruzados, el tipo de reactivo tratado (el blanco o el reactivo usado) y el tipo de proceso

realizado (proceso I o proceso II), con dos niveles cada uno (diseño 2<sup>2</sup>). Además se va a estudiar la influencia de la cantidad de Zn(0) agregada como parte de los procesos en la composición de los cristales de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Debido a que el proceso I y el proceso II tienen requerimientos de Zn(0) inherentemente distintos, esta variable está anidada dentro de la variable tipo de proceso. En total se realizarán 5 repeticiones para cada una de las muestras; siendo en total 40 unidades experimentales. La Tabla 3 muestra las variables de la investigación y la Tabla 4 muestra el diseño experimental de la investigación

**Tabla 3**

*Variables independientes, dependientes y de control del proyecto*

Variables independientes	Variables dependientes	Variables de control
-Tipo de reactivo tratado (A)	-Concentración de plata	-Temperatura de la solución
-Tipo de proceso de tratamiento (B)	-Concentración de cromo total	antes de la cristalización
-Cantidad de Zn agregado (C)	-Concentración de mercurio	-Potencial de oxidorreducción (ORP) de la solución
	-Concentración de zinc	
	-porcentajes de sulfatos	

**Tabla 4**

*Diseño experimental de la investigación*

B: tipo de proceso de tratamiento	Proceso I		Proceso II	
C: cantidad de reductor	2.36 g	3.54 g	24.6 g	36.9 g
A: Tipo de reactivo	Blanco			
	Usado			

Los experimentos se realizarán en el laboratorio de química de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos, ubicado en el edificio T-5 del campus central. Los análisis de metales pesados se realizarán en el Instituto de Investigaciones Químicas, Biológicas, Biomédicas y Biofísicas de la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala, ubicado en el Edificio CS-2 del campus central.

#### 10.4 Técnicas e instrumentos

Para poder determinar la cantidad de metales pesados en las muestras, se cuantificarán por medio de espectroscopía de absorción atómica con generador de hidruros para Hg. Si la concentración de los otros metales se encuentra en el orden de mg/L se utilizará un atomizador de llama. Sin embargo, se utilizará un horno de grafito si la concentración de los metales está en el orden de µg/L. La cuantificación de sulfatos se realizará por medio de turbidimetría en un espectrofotómetro UV-Vis. Para determinar la solidez de los agregados, se emplearán los tamices para agregados finos que, según la norma ASTM C88 / C88M – 18, son los tamices No. 50, No. 30, No. 16, No. 8 y No. 4.

## 10.5 Procesamiento y análisis de la información

La comparación de los factores se realizará por medio de un Análisis de Varianza para un diseño experimental de tipo Split-Plot, que el apropiado para diseños experimentales con factores cruzados y anidados (ver Tabla 6). Las hipótesis serán evaluadas con un nivel de confiabilidad será del 95%. Las hipótesis nulas serán rechazadas si el valor de  $p$  asociado al resultado observado es igual o menor que el nivel de significancia ( $p \leq 0.05$ ).

**Tabla 5**

*Tabla para el análisis de varianza del experimento*

Factor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	de	Estadística F	p-valor
A	$SS_A$	1	$MS_A=SS_A/1$		$MS_A/MS_E$	
B	$SS_B$	1	$MS_B=SS_B/1$		$MS_B/MS_E$	
C/B	$SS_{C/B}$	2	$MS_{C/B}=SS_{C/B}/2$		$MS_{C/B}/MS_E$	
AB	$SS_{AB}$	1	$MS_{AB}=SS_{AB}/1$		$MS_{AB}/MS_E$	
AC/B	$SS_{AC/B}$	2	$MS_{AC/B}=SS_{AC/B}/2$		$MS_{AC/B}/MS_E$	
Error	$SS_E$	32	$MS_E=SS_E/32$			
Total	$SS_T$	39				

Nota: la notación C/B significa el efecto de la variable C anidada dentro de B y la notación AC/B significa el efecto de la interacción entre la variable A y la variable C anidada dentro de B.

Para evaluar si existen diferencias significativas en el ensayo de solidez cuando se usa  $Na_2SO_4$  grado reactivo y el  $Na_2SO_4$  obtenido de los procesos de purificación, se realizará una prueba t comparando la media de los porcentajes de agregado retenido en cada tamiz.

## 11 Resultados y Discusión

Originalmente el proyecto contempló la realización de una serie de experimentos según lo estipulado en la sección anterior. Sin embargo, debido a problemas ajenos a los investigadores, a la unidad avaladora y a la coordinación del programa universitario de investigación, no fue posible realizar estos experimentos. En su lugar se presenta la predicción teórica de los resultados esperados, para los procesos 1 y 2.

Las reacciones empleadas en ambos procesos son reacciones de precipitación y de oxidorreducción. Para predecir el rendimiento de remoción de las primeras se emplea los datos de los productos de solubilidad. Para un compuesto químico iónico  $M_aX_b$ , su producto de solubilidad está dado por la reacción:



Y su producto de solubilidad  $K_{ps}$  está definido por:

$$K_{ps} = [M^{b+}]^a [X^{a-}]^b$$

Donde  $[M^{b+}]$  representa la concentración molar del catión  $M^{b+}$  y  $[X^{a-}]$  la concentración molar del anión  $X^{a-}$ . Como por cada mol de  $M_aX_b$  hay  $a$  moles de  $M^{b+}$  y  $b$  moles de  $[X^{a-}]$ , entonces la solubilidad molar  $S$  de la sal será:

$$K_{ps} = (aS)^a (bS)^b$$

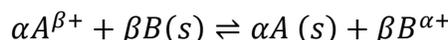
$$K_{ps} = a^a b^b S^{a+b}$$

$$^{a+b}\sqrt{\frac{K_{ps}}{a^a b^b}} = S$$

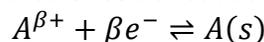
Una vez calculado la solubilidad, se puede calcular el rendimiento de remoción ( $R$ ) mediante:

$$R = 1 - S$$

Para predecir el rendimiento de remoción de las reacciones de oxidorreducción se emplea los potenciales de oxidorreducción. Para una reacción de oxidorreducción como la que se muestra a continuación:



Se definen las siguientes semirreacciones de reducción:



Y:



Donde  $e^-$  representa un electrón. Para cada una de estas semirreacciones se puede medir el potencial estándar de reducción, el cual se mide con respecto del electro estándar de hidrógeno, el cual por definición tiene un potencial estándar de reducción de 0 V. Por lo tanto, si la primera semirreacción tiene un potencial estándar de reducción  $E_1$  y la segunda tiene un potencial estándar de reducción  $E_2$ , entonces el potencial estándar de la reacción estudiada será

$$E^\circ_{celda} = E_1 - E_2$$

A partir de  $E^\circ_{celda}$  se calcula el cambio en la energía libre de Gibbs  $\Delta G^\circ$ , dado por:

$$\Delta G^\circ = -zFE^\circ_{celda}$$

Donde  $z$  es el número de electrones intercambiado en la reacción (igual a  $\alpha\beta$ ) y es la constante de Faraday, que es la carga eléctrica por mol de electrones (igual a  $96485 \text{ C mol}^{-1}$ ). De la termodinámica también se tiene que:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K$$

Donde  $R$  es la constante de los gases ideales (igual a  $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) y  $T$  es la temperatura absoluta. Combinando las dos ecuaciones que se tienen para  $\Delta G^\circ$  se tiene:

$$RT \ln K = zFE^\circ_{celda}$$

$$\ln K = \frac{zFE^\circ_{celda}}{RT}$$

$$K = \exp\left(\frac{zFE^\circ_{celda}}{RT}\right)$$

Para la reacción considerada, la expresión de  $K$  en función de la concentración de las especies en fase acuosa es:

$$K = \frac{[B^{\alpha+}]^\beta}{[A^{\beta+}]^\alpha}$$

Asumiendo que inicialmente se tiene una concentración inicial de  $1 \text{ mol L}^{-1}$  de  $A$  y no hay  $B$ , se puede determinar el rendimiento de la reacción al calcular el avance máximo de la reacción. Este avance máximo, denotado aquí como  $R$  para asociarlo con el rendimiento, representa la cantidad de reactivo que debe consumirse para alcanzar el equilibrio químico. Como se requiere consumir  $\alpha$  moles de  $A$  para producir  $\beta$  moles de  $B$ , se tiene:

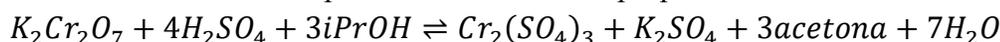
$$K = \frac{(\beta R)^\beta}{(1 - \alpha R)^\alpha}$$

Para determinar  $R$  de la ecuación anterior, se emplean 2 métodos numéricos en función la complejidad de converger a una solución. Si  $K \leq 10^{10}$ , se emplea el método de la secante, ya que es más probable que el método converja rápidamente hacia la solución. De lo contrario se emplea el método de bisección ya que el método garantiza encontrar una solución en determinado intervalo sin divergencia, pero de forma más lenta que el método de la secante.

Proceso 1:

Las reacciones químicas principales que se producen el proceso 1 son las siguientes:

1. Reducción de dicromato de potasio con alcohol isopropílico



Esta reacción tiene el siguiente potencial estándar de reacción:

$$E^\circ_1 = 1.33 V - (-0.12V) = 1.45 V$$

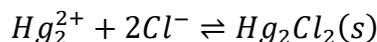
Y tiene la siguiente constante de equilibrio a 50°C ( $z = 6$ ):

$$K_1 = 5.668 \times 10^{135}$$

Donde  $K_1$  se expresa como:

$$K_1 = \frac{[Cr^{3+}]^2 [acetona]^3}{[Cr_2O_7^{2-}] [H^+]^8 [iPrOH]^3}$$

2. Precipitación de ion mercurioso con ion cloruro



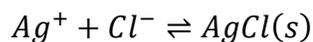
Con un producto de solubilidad (para la reacción inversa) de:

$$K_{ps1} = 1.43 \times 10^{-18}$$

El cual se expresa como:

$$K_{ps1} = [Hg_2^{2+}] [Cl^-]^2$$

3. Precipitación de ion plata con ion cloruro



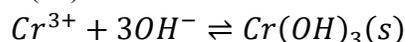
Con un producto de solubilidad (para la reacción inversa) de:

$$K_{ps2} = 1.77 \times 10^{-10}$$

El cual se expresa como:

$$K_{ps2} = [Ag^+] [Cl^-]$$

4. Precipitación de ion Cromo (III) con ion hidróxido



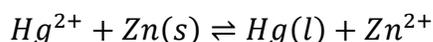
Con un producto de solubilidad (para la reacción inversa) de:

$$K_{ps3} = 6.30 \times 10^{-31}$$

El cual se expresa como:

$$K_{ps3} = [Cr^{3+}] [OH^-]^3$$

5. Reducción de ion mercúrico con cinc



Esta reacción tiene el siguiente potencial estándar de reacción:

$$E^\circ_2 = 0.85 V - (-0.7618V) = 1.6118 V$$

Y tiene la siguiente constante de equilibrio a 50°C ( $z = 2$ ):

$$K_2 = 1.99778 \times 10^{50}$$

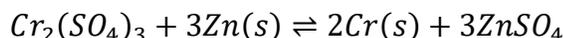
Donde  $K_2$  se expresa como:

$$K_2 = \frac{[Zn^{2+}]}{[Hg^{2+}]}$$

Proceso 2:

Las reacciones químicas principales que se producen el proceso 1 son las siguientes:

6. Reducción de dicromato de potasio con alcohol isopropílico (igual que proceso 1)
7. Reducción de ion Cr(III) con cinc



Esta reacción tiene el siguiente potencial estándar de reacción:

$$E^\circ_3 = -0.74 V - (-0.7618V) = 0.0218 V$$

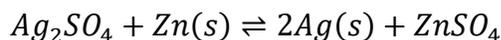
Y tiene la siguiente constante de equilibrio a 50°C ( $z = 6$ ):

$$K_3 = 1.098962 \times 10^2$$

Donde  $K_3$  se expresa como:

$$K_3 = \frac{[Zn^{2+}]^3}{[Cr^{3+}]^2}$$

8. Reducción de ion plata con cinc



Esta reacción tiene el siguiente potencial estándar de reacción:

$$E^\circ_4 = 0.7996 V - (-0.7618V) = 1.5614 V$$

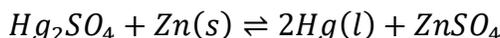
Y tiene la siguiente constante de equilibrio a 50°C ( $z = 2$ ):

$$K_4 = 1.098962 \times 10^2$$

Donde  $K_4$  se expresa como:

$$K_4 = \frac{[Zn^{2+}]}{[Ag^+]^2}$$

9. Reducción de ion mercurioso libre con cinc



Esta reacción tiene el siguiente potencial estándar de reacción:

$$E^\circ_5 = 0.80 V - (-0.7618V) = 1.5618 V$$

Y tiene la siguiente constante de equilibrio a 50°C ( $z = 2$ ):

$$K_5 = 5.49748 \times 10^{48}$$

Donde  $K_5$  se expresa como:

$$K_5 = \frac{[Zn^{2+}]}{[Hg_2^{2+}]}$$

10. Reducción de ion mercurioso precipitado con cinc



**Tabla 9**

*Concentración residual de contaminante predicho para el proceso 2*

Reacción	Contaminante	Concentración residual (mol L <sup>-1</sup> )
6	Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup>	1.36560737799430345 × 10 <sup>-12</sup>
7	Cr <sup>3+</sup>	0.13981
8	Ag <sup>+</sup>	3.0594604885825816 × 10 <sup>-25</sup>
9	Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	1.819015257899983 × 10 <sup>-49</sup>
10	Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	7.179317821220628 × 10 <sup>-33</sup>
11	Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	5.0055561673458 × 10 <sup>-51</sup>
12	Cr <sup>3+</sup>	1.23593 × 10 <sup>-8</sup>

Nota: el Cr<sup>3+</sup> residual de la reacción 7 es eliminado en la reacción 12.

Según la norma ASTM C88/C88M, para el ensayo de solidez de agregados, se debe emplear sulfato de sodio decahidratado grado USP (Haynes, 2005). De acuerdo a la monografía de este reactivo publicado por la US Pharmacopeia (USP por sus siglas en inglés), el reactivo no debe tener más de 0.001% de metales pesados (*USP Monographs: Sodium Sulfate*, s. f.). De acuerdo con la metodología del ensayo de metales pesados publicado por USP, los metales que son detectados en éste son plomo, mercurio, bismuto, arsénico, antimonio, estaño, cadmio, plata, cobre y molibdeno (*General Chapters: <231> HEAVY METALS*, s. f.). Por lo tanto, para verificar si el sulfato de sodio producido por cristalización cumple con los requisitos del grado USP, únicamente es necesario tomar en cuenta el porcentaje combinado de mercurio y plata que queda en la solución y, por tanto, en los cristales. Sin embargo, se calculará la suma de todos los metales pesados residuales para realizar el cálculo de porcentaje de metales pesados.

**Tabla 10**

*Metales pesados totales obtenido en los cristales de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> purificados empleando el proceso 1*

contaminante	Concentración máscica (g/L)	Porcentaje en peso
Cr	1.42013 × 10 <sup>-10</sup>	2.07906 × 10 <sup>-11</sup>
Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	2.8473 × 10 <sup>-4</sup>	4.16847 × 10 <sup>-5</sup>
Ag <sup>+</sup>	1.4351 × 10 <sup>-3</sup>	2.10097 × 10 <sup>-4</sup>
Cr <sup>3+</sup>	6.42635 × 10 <sup>-7</sup>	9.40818 × 10 <sup>-8</sup>
Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	1.0041 × 10 <sup>-48</sup>	1.46997 × 10 <sup>-49</sup>
total		0.000251876

**Tabla 11**

*Metales pesados totales obtenido en los cristales de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> purificados empleando el proceso 2*

contaminante	Concentración máscica (g/L)	Porcentaje en peso
Cr	1.42013 × 10 <sup>-10</sup>	2.07906 × 10 <sup>-11</sup>
Ag <sup>+</sup>	3.3002 × 10 <sup>-23</sup>	4.83147 × 10 <sup>-24</sup>
Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	7.2976 × 10 <sup>-47</sup>	1.06837 × 10 <sup>-47</sup>
Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	2.8802 × 10 <sup>-30</sup>	4.21665 × 10 <sup>-31</sup>
Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	1.0041 × 10 <sup>-48</sup>	1.46997 × 10 <sup>-49</sup>
Cr <sup>3+</sup>	6.42635 × 10 <sup>-7</sup>	9.40818 × 10 <sup>-8</sup>

total

 $9.41026 \times 10^{-8}$ 

Examinando los resultados de las tablas 6 y 8 se observa que los resultados tienen un número diferente de cifras significativas. Esto se debe a que, para las reacciones con una constante de equilibrio mayor a  $10^{10}$ , se tienen soluciones para  $R$  que son muy próximas a un valor que anula el denominador de la expresión de la constante de equilibrio (por lo general 0.5 o 1), lo cual hace que ésta no sea calculable al ser valores prohibidos. Por lo tanto, es necesario emplear una alta precisión para encontrar un valor de  $R$  que satisfaga la condición de equilibrio para constantes con valores elevados y un método que garantice que estos valores puedan encontrarse.

Al comparar los resultados de las tablas 10 y 11 se observa que ambos procesos tienen la capacidad teórica de producir cristales de sulfato de sodio decahidratado que cumple con el requisito de metales pesados del reactivo grado USP. Sin embargo, se observa que el proceso 2, que es el proceso nuevo propuesto en este trabajo, tiene el potencial de generar cristales con un contenido aun menor de metales pesados.

Sin embargo, es posible que estas predicciones no se hubiesen cumplido ya que, para realizar los cálculos mostrados, se asumió que el reactivo a tratar es una solución ideal. Debido a la naturaleza iónica de los solutos en dicho reactivo y a la alta concentración de estos, es de esperarse que la solución presente desviaciones considerables de la idealidad, con lo que muchas de estas predicciones quedarían invalidadas. No obstante lo anterior, el proceso 2 debería producir cristales más puros que el proceso 1.

## 12 Referencias

- Aslam, S., & Walker, O. L. (1982). Recycling of mercury and silver from COD tests. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 54(7), 1148-1151.
- Benítez-Pacheco, I. L., García-Guerra, C. A., Soberanis-Ibañez, A. A., Vendrell-Cabrera, P. A., Godínez, R. C., Labín-Gómez, J. E., Corzo, C. C., & Terraza-Pira, M. F. (2012). *Evaluación de la técnica del tratamiento del desecho líquido del análisis instrumental de la Demanda Química de OxígenoDQO- generado por laboratorios analíticos guatemaltecos, para atenuar el impacto ambiental.* [http://glifos.senacyt.gob.gt/digital/fodecyt/fodecyt 2009.47.pdf](http://glifos.senacyt.gob.gt/digital/fodecyt/fodecyt%202009.47.pdf)
- Besagas, R. L., & Rosario, R. M. Del. (2010). Hazardous Waste Chemicals from Dichromate Chemical Oxygen Demand Analysis : Toxicity Reduction , Recovery , Recycling , and Testing. *Mindanao Journal of Science and Technology*, 8(June 2010), 1-14.
- Chavalparit, O., Ongwandee, M., & Thaweesuwanporn, P. (2008). Removal of heavy metals from COD analysis wastewater with an organic precipitant. *ScienceAsia*, 34(1), 123-127. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2008.34.123>
- Chertow, M. R., Ashton, W. S., & Espinosa, J. C. (2008). Industrial symbiosis in Puerto Rico: Environmentally related agglomeration economies. *Regional Studies*, 42(10), 1299-1312. <https://doi.org/10.1080/00343400701874123>
- Costa, M. (1997). Toxicity and carcinogenicity of Cr(VI) in animal models and humans. *Critical Reviews in Toxicology*, 27(5), 431-442. <https://doi.org/10.3109/10408449709078442>

- Dean, R. B., Williams, R. T., & Wise, R. H. (1971). Disposal of Mercury Wastes from Water Laboratories. *Environmental Science and Technology*, 5(10), 1044-1045. <https://doi.org/10.1021/es60057a006>
- Dillon, P. J., Yan, N. D., & Harvey, H. H. (1984). Acidic deposition: Effects on aquatic ecosystems. *C R C Critical Reviews in Environmental Control*, 13(3), 167-194. <https://doi.org/10.1080/10643388409381706>
- Djaenudin, & Wiyani, L. R. (2019). Removal of Hg, Fe and Cr from Chemical Oxygen Demand (COD) analysis waste by hydroxide precipitation method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 277(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/277/1/012011>
- Eisler, R. (1996). *Silver Hazards to Fish, Wildlife, and Invertebrates: A Synoptic Review* (Número September).
- Flowers, P., Theopold, K., Langley, R., & Robinson, W. R. (2019). *Chemistry 2e*. OpenStax. [https://assets.openstax.org/oscms-prodcms/media/documents/Chemistry2e-OP\\_TkF9Jl3.pdf](https://assets.openstax.org/oscms-prodcms/media/documents/Chemistry2e-OP_TkF9Jl3.pdf)
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- General Chapters: <231> HEAVY METALS. (s. f.). Recuperado 12 de enero de 2023, de [http://ftp.uspbpep.com/v29240/usp29nf24s0\\_c231.html#usp29nf24s0\\_c231](http://ftp.uspbpep.com/v29240/usp29nf24s0_c231.html#usp29nf24s0_c231)
- Guo, J., Li, Y., Dai, R., & Lan, Y. (2012). Rapid reduction of Cr(VI) coupling with efficient removal of total chromium in the coexistence of Zn(0) and silica gel. *Journal of Hazardous Materials*, 243, 265-271. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.028>
- Haynes, H. (2005). ASTM C 88 test on soundness of aggregate using sodium sulfate or magnesium sulfate: A study of the mechanisms of damage. *Journal of ASTM International*, 2(1). <https://doi.org/10.1520/jai12517>
- Hu, Z., & Grasso, D. (2004). Water Analysis - Chemical Oxygen Demand. En *Encyclopedia of Analytical Science: Second Edition* (pp. 325-330). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00663-4>
- Iuga, A. N. (2016). Waste Management in the Circular Economy. the Case of Romania. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 161(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012086>
- Kumble, P. A. (2019). Reflections on service learning for a circular economy project in a Guatemalan Neighborhood, Central America. *Sustainability (Switzerland)*, 11(17). <https://doi.org/10.3390/su11174776>
- Li, X., & Li, Y. (2011). Driving forces on China's circular economy: From government's perspectives. *Energy Procedia*, 5, 297-301. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.051>
- Magos, L., & Clarkson, T. W. (2006). Overview of the clinical toxicity of mercury. *Annals of Clinical Biochemistry*, 43(4), 257-268. <https://doi.org/10.1258/000456306777695654>
- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153(October 2018), 104553. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>

- Neczaj, E., & Grosser, A. (2018). Circular Economy in Wastewater Treatment Plant—Challenges and Barriers. *Proceedings*, 2(11), 614. <https://doi.org/10.3390/proceedings2110614>
- Ratte, H. T. (1999). Bioaccumulation and toxicity of silver compounds: A review. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 18(1), 89-108. <https://doi.org/10.1002/etc.5620180112>
- Sauvé, S., Bernard, S., & Sloan, P. (2016). Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development*, 17, 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.09.002>
- Singh, M. P., Chakraborty, A., & Roy, M. (2018). Developing an extended theory of planned behavior model to explore circular economy readiness in manufacturing MSMEs, India. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 313-322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.015>
- USP Monographs: Sodium Sulfate*. (s. f.). Recuperado 12 de enero de 2023, de [http://ftp.uspbpep.com/v29240/usp29nf24s0\\_m77390.html](http://ftp.uspbpep.com/v29240/usp29nf24s0_m77390.html)

### 13 Vinculación

La metodología de cuantificación de cromo total, mercurio total, plata, zinc y cantidad de sulfatos en las muestras fue revisada en colaboración con el Instituto de Investigaciones Químicas, Biológicas, Biomédicas y Biofísicas de la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala. Este instituto cuenta con los equipos y las metodologías para determinar la concentración de metales pesados. El instituto se encuentra en la finca el Zapote de la zona 2 de la Ciudad de Guatemala.

### 14 Divulgación

Los resultados del estudio se publicarán en la revista Ciencia, Tecnología y Salud de la DIGI. Además, se difundirán los resultados en congresos nacionales, como Convergencia o el Congreso Nacional de Ingeniería Química. Adicionalmente, se difundirá el conocimiento generado en cursos de Química Ambiental y Análisis Cuantitativo de la carrera de Ingeniería Química e Ingeniería Ambiental. Asimismo, los resultados se presentarán en el ciclo de conferencias de la unidad de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación de la Escuela de Ingeniería Química (INDETEIQ) y los resultados se divulgarán en la Franja Radial de Ingeniería en Radio Universidad.

### 15 Aporte de la propuesta de investigación a los ODS:

Debido a los efectos carcinógenos del Cr(VI), a los efectos neurotóxicos del metilmercurio y a los efectos tóxicos que pueden tener los compuestos de plata en la vida acuática, es imperativo contar con un proceso de tratamiento de los metales pesados presentes en el reactivo de la DQO, para evitar la contaminación de los cuerpos de agua y sus efectos tóxicos sobre las formas de vida que dependen de éstos. Este estudio propone un proceso para abordar este problema y así contribuir a que las fuentes de agua tengan parámetros fisicoquímicos aceptables (objetivo 6) y que tanto la vida terrestre (objetivo 15) como la vida acuática (objetivo 14) no se vean afectadas.

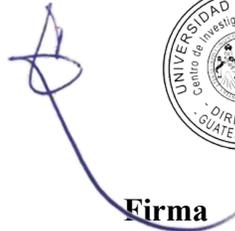
## 16 Declaración del Coordinador del proyecto de investigación

El Coordinador de proyecto de investigación con base en el *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación*, artículos 13 y 20, deja constancia que el personal contratado para el proyecto de investigación que coordina ha cumplido a satisfacción con la entrega de informes individuales por lo que es procedente hacer efectivo el pago correspondiente.

<b>Ing. José Ricardo De León Solís</b>	 <b>Firma</b>
Fecha: 28/02/2023	

## 17 Aval de la Directora del instituto, centro o departamento de investigación

De conformidad con el artículo 13 y 19 del *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación* otorgo el aval al presente informe mensual de las actividades realizadas en el proyecto “Reducción de metales pesados en residuos líquidos utilizando reacciones precipitométricas y reúso de un subproducto en un ensayo de agregados para concretos” en mi calidad de Directora, mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

<b>Vo.Bo. Inga. Telma Maricela Cano Morales</b> <b>Directora del Centro de Investigaciones de Ingeniería</b>	 <b>Firma</b> 
Fecha: 28/02/2023	

# Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

## 18 Visado de la Dirección General de Investigación

<p><b>Vo.Bo. Ing. Liuba Cabrera de Villagran</b> <b>Coordinador del Programa Universitario de Investigación</b></p>	 <p><b>Firma</b></p>
<p>Fecha: 28/02/2023</p>	

<p><b>Vo.Bo. Ing. Agr. Julio Rufino Salazar</b> <b>Coordinador General de Programas Universitarios de Investigación</b></p>	 <p><b>Firma</b></p> <p>Ing. MARIANO Julio Rufino Salazar Pérez Coordinador General de Programas de Investigación, DIGI-USAC</p>
<p>Fecha: 28/02/2023</p>	