



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales**

*Estudio medioambiental de los desechos de la industria del Zinc y su reaprovechamiento para aplicaciones como biomaterial y adsorbente de metaloides (As y Cr)*

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**INGENIERO EN GEOLOGÍA AMBIENTAL**

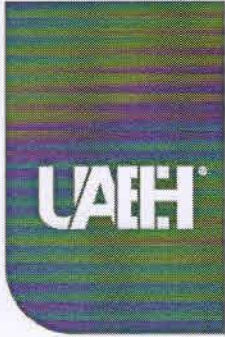
**PRESENTAN:**

**Alondra García Cerón**

**Ramón Guillem Salinas Maldonado**

**DIRECTORES: Dr. JUAN HERNÁNDEZ ÁVILA**

**Dr. EDUARDO CERECEDO SÁENZ**



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
*School of Engineering and Basic Sciences*

Mineral de la Reforma, Hgo., a 31 de julio de 2024

Número de control: ICBI-D/946/2024  
Asunto: Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO**  
**DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

Con fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio le comunico que el Jurado asignado a los Egresados de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental **Alondra García Cerón y Ramón Guillem Salinas Maldonado**, quien presenta el trabajo de titulación **“Estudio medioambiental de los desechos de la industria del Zinc y su reaprovechamiento para aplicaciones como biomaterial y adsorbente de metaloides (As y Cr)”**, después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

**Presidente:** Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz

**Secretario:** Dr. Eleazar Salinas Rodríguez

**Vocal:** Dr. Juan Hernández Ávila

**Suplente:** M. en C. Monserrat Cruz Hernández

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente  
“Amor, Orden y Progreso”

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez  
Director de ICBI



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184  
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001  
dirección\_icbi@uaeh.edu.mx,  
vergarar@uaeh.edu.mx



uaeh.edu.mx

<b>ÍNDICE</b>	<b>Página</b>
<b>Introducción</b>	<b>4</b>
<b>Resumen</b>	<b>7</b>
<b>Abstract</b>	<b>9</b>
<b>Glosario</b>	<b>11</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>12</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>16</b>
<b>Justificación</b>	<b>17</b>
<b>Capítulo 1. Marco Teórico</b>	<b>18</b>
1.1 Tipos de residuos	18
1.1.1. Residuos sólidos urbanos	19
1.1.2. Residuos de la industria energética	21
1.1.3. Residuos de la industria alimentaria	21
1.1.4. Residuos sanitarios	22
1.1.5. Residuos electrónicos	23
1.2 Impacto medioambiental y en la salud pública	24
1.3 Procesos de minimización, reciclaje y reaprovechamiento	25
1.4 Residuos de la industria Minero - Metalúrgica	26
1.5 Tratamiento de residuos de la industria Minero - Metalúrgica	28
<b>Capítulo 2. Antecedentes</b>	<b>30</b>
2.1 Compuestos tipo jarositas. Formación y Estructura	30
2.2 Precipitación de la jarosita en la industria del Zn	33
2.3 Reactividad alcalina de las jarositas	34
2.4 Las jarositas y el medioambiente	34
2.5 Diversos estudios y aplicaciones de las jarositas sintéticas	35
2.5.1 Las jarositas en baterías de ión litio	36
2.5.2 Las jarositas como adsorbentes de metales pesados	36

2.5.3 Las jarositas aplicadas en Ingeniería tisular	37
<b>Capítulo 3. Desarrollo Experimental</b>	<b>39</b>
3.1. Introducción	39
3.2. Muestreo	41
3.3. Caracterización de la jarosita industrial	42
3.3.1. Difracción de Rayos X	43
3.3.2. Microscopía Electrónica de Barrido en Conjunción con Espectrometría de Dispersión de Energías de Rayos X (MEB-EDS)	45
3.3.3. Espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS)	47
3.4. Ensayos Citotóxicos	49
3.4.1. Aislamiento y Cultivo de Células	50
3.4.2. Colorimetría de Azul de Alamar	51
3.4.3. Ensayos de Diferenciación en la Jarosita industrial	53
3.4.4. Ensayo de Rojo de Alizarina S y Jarosita industrial	55
3.4.5. Ensayo de Inmunofluorescencia	56
3.4.6. Ensayo de RT PCR	57
3.5. Experimentos de Adsorción de As y Cr en la Jarosita industrial	59
<b>Capítulo 4. Resultados</b>	<b>62</b>
4.1. Difracción de Rayos X	63
4. 2. Microscopía Electrónica de Barrido y Espectrometría Dispersiva de Rayos X	64
4.3. Espectroscopia de Fotoelectrones Emitidos por Rayos X (XPS)	67
4.4. Ensayos Citotóxicos	68
4.5. Ensayos de Adsorción de Metales Tóxicos (As, Cr y As/Cr)	73
4.5.1. Difracción de Rayos X	74
4.5.2. Microscopía Electrónica de Barrido en Conjunción con Espectrometría Dispersiva de Energías de Rayos X	78

4.5.3. Espectroscopia de Fotoelectrones Emitidos por Rayos X	86
<b>Capítulo 5. Discusión</b>	<b>90</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>93</b>
<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>94</b>
<b>Anexos</b>	<b>101</b>

## Introducción

El capítulo primero de esta tesis corresponde al marco teórico, en este apartado se hace una descripción de los residuos, su origen y algunos datos de las cantidades generadas en el mundo. El objetivo de esto fue presentar un panorama acerca de la situación actual de la generación, manejo, disposición, impacto medioambiental y a la salud pública, así como alternativas para la reducción, reciclaje o reaprovechamiento de residuos. Los tipos de residuos descritos en este trabajo fueron los residuos sólidos urbanos, de la industria energética, de la industria alimentaria, sanitarios, electrónicos y residuos de la industria minero-metalúrgica.

El segundo capítulo es el de antecedentes, en este se describe ampliamente a los compuestos jarosíticos provenientes tanto de la industria minero-metalúrgica del zinc, así como a las que se forman en la naturaleza por procesos geológicos y aquellas sintetizadas en un laboratorio. Las propiedades físico-químicas de las jarositas las han hecho un objeto de estudio interesante para una gran variedad de investigadores alrededor del mundo, por ello, en este capítulo se presentan de manera general algunos de los trabajos publicados sobre los diversos tipos de jarositas, así como algunas aplicaciones que pueden tener en la industria, la mayoría enfocadas en la remediación medio ambiental. Sin embargo, al final de esta sección se considera una aplicación más innovadora e interesante, uno de los puntos más importantes de este trabajo, la aplicación de las jarositas en la ingeniería tisular.

El capítulo tres contiene el desarrollo experimental realizado durante este trabajo de investigación. En él se describe la manera en que se obtuvieron las muestras de jarosita industrial, así como los métodos utilizados para caracterizar dichos materiales. Estos métodos fueron, Difracción de Rayos X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido en Conjunción con Espectrometría de Dispersión de Energías de Rayos X, Espectrofotometría de Infrarrojo por Transformada de Fourier y Espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS).

Debido a que uno de los usos propuestos para las jarositas en esta tesis es como biomaterial, fue necesario realizar ensayos citotóxicos que comprobaran la viabilidad que tienen estos materiales para utilizarse en ingeniería tisular. Las pruebas para corroborar esta hipótesis fueron ensayo de azul de alamar, diferenciación celular, rojo de alizarina e inmunofluorescencia. Estos ensayos se realizaron en colaboración con la Universidad Nacional Autónoma de México.

Finalmente, en este tercer capítulo se aborda el uso de la jarosita como adsorbente de arsénico y cromo. Para ello se realizaron pruebas de incorporación mediante intercambio de As y Cr en jarositas descompuestas.

El capítulo cuarto de esta tesis presenta los resultados obtenidos de la caracterización y ensayos a los que se sometió la jarosita industrial descritos en el capítulo anterior. A través de espectros, diagramas e imágenes se describe con detalle las características físico-químicas que tienen las jarositas residuales provenientes de la industria del Zn. Al final de esta sección, se discuten dichos resultados para corroborar que estas jarositas tienen el potencial de ser utilizadas no solo en la remediación ambiental a través de la adsorción del As y Cr, sino

también en la ingeniería tisular, demostrando como un residuo considerado peligroso por impactar negativamente al ambiente y a la salud pública, puede tener un uso y un valor en el sector salud.

El quinto capítulo presenta las conclusiones a las que se llegaron tras realizar la investigación y trabajo experimental con las jarositas residuales, en ellas se plantean las posibles aplicaciones que tienen estos compuestos y la manera en que un residuo puede adquirir un valor y beneficiar a la sociedad.

Finalmente, se presentan las referencias consultadas para la realización del presente trabajo. Y, por último, en el Anexo se muestran los principales productos logrados que son presentaciones de trabajos en seminarios y congresos.



## Resumen

Las jarositas son un grupo de minerales que se forman de manera natural debido a procesos geológicos, se producen en la industria hidrometalúrgica del Zn y pueden formarse de manera sintética en un laboratorio. Cada año en la industria minera, se generan grandes cantidades de estos materiales los cuales impactan negativamente al medio ambiente y a la salud pública, por lo que son catalogados como residuos peligrosos. Es por esto, que existe la necesidad de buscar nuevas formas de tratar los desechos de este tipo, y mitigar sus efectos contaminantes.

Estos materiales, han sido objeto de estudio de gran número de investigadores por lo que sus características son ya bien conocidas, aunque sus aplicaciones en la industria se han limitado a la remediación de aguas contaminadas, en la industria energética como cátodos para baterías y muy recientemente como biomateriales. Sin embargo, la mayoría de trabajos se centran en estudiar jarositas sintéticas.

En esta tesis, se propone la revalorización de jarositas que resultan del proceso de extracción del Zn en la compañía Minera México en SLP, las cuales son consideradas un residuo industrial. Estos materiales fueron caracterizados por diversos métodos y técnicas para conocer sus propiedades físico-químicas y también citotóxicas.

Las aplicaciones propuestas en este trabajo son como absorbentes de metaloides y como biomateriales.

Para el primer caso se trabajó con jarositas residuales descompuestas, los resultados indican que presentan una adecuada adsorción de As, Cr y As/Cr, con valores de 0.51 - 0.61 % para As y de 0.15 a 0.18 % de Cr, mediante XPS.

Los resultados obtenidos de los ensayos de citotoxicidad son muy alentadores, muestran una viabilidad celular del 98.46 % +/-16.81 % en comparación con el grupo de control, y esto a solo 3 días de exposición. Para el día 7, los resultados obtenidos indicaron que la viabilidad celular en el grupo de la jarosita industrial, fue del 92.4 % +/- 12.66 %. Por último, en el día 10, los resultados indicaron que la viabilidad celular del grupo de la jarosita industrial fue del 91.50 % +/- 8.36 %.

Los resultados de este trabajo de tesis nos revelan que las jarositas residuales pueden ser empleadas como adsorbente de metaloides (As y Cr) así como la posibilidad de utilizarse como biomateriales en el campo de la ingeniería tisular. Las ventajas de este material son que, al ser un residuo peligroso, se mitigan los problemas de contaminación provocados por su acumulación y mal manejo, además a diferencia de otros materiales utilizados ya con el mismo propósito, estas jarositas no requieren de cantidades grandes de energía para ser tratadas, por lo que se reduce significativamente el costo económico del proceso industrial.

## **Abstract**

Jarosites are a group of minerals that can be formed naturally due to geological processes, also are produced in the Zn hydrometallurgical industry and can be formed synthetically in a laboratory. Each year, the mining industry generates large quantities of these materials, which have a negative impact on the environment and public health and are therefore classified as hazardous waste. This is why there is a need to find new ways to treat this type of waste, and mitigate its polluting effects. These materials have been the subject of study by a large number of researchers, so their characteristics are already well known, although their applications in industry have been limited to the remediation of contaminated water, in the energy industry as cathodes for batteries and very recently as biomaterials. However, most of the works are focused on the study of synthetic jarosites.

In this thesis it's proposed the revaluation of jarosites resulting from the Zn extraction process at Minera Mexico in SLP, which are considered an industrial waste. These materials were characterized by different methods and techniques to know their physicochemical and cytotoxic properties.

The applications proposed in this work are as metalloid absorbers and as biomaterials.

For the first case, decomposed residual jarosites was used, and the results indicated that they showed an adsorption of As, Cr, and As/Cr, showing values of 0.51 - 0.61 % for As and from 0.15 to 0.18 % of Cr, by XPS.

The results obtained from the cytotoxicity tests are very encouraging, showing a cell viability of 98.46 % +/-16.81 % compared to the control group, and this after only 3 days of exposure. By day 7, the results obtained indicated that cell viability in the industrial jarosite group was 92.4 % +/- 12.66 %. Finally, on day 10, the results indicated that the cell viability of the industrial jarosite group was 91.50 % +/- 8.36 %.

The results of this thesis, reveals that residual jarosites can be used as adsorbents of metalloids (As and Cr) as well as the possibility of being used as biomaterials in the field of tissue engineering. The advantages of this material are that, being a hazardous waste, the contamination problems caused by its accumulation and mishandling are mitigated. In addition, unlike other materials already used for the same purpose, these jarosites do not require large amounts of energy to be treated, thus significantly reducing the economic cost of the industrial process.

## **Glosario**

*Biomaterial:* Material tolerable por el organismo, que se utiliza como implante para sustituir un órgano o un tejido orgánico dañado o enfermo (Real Academia Española, 2019).

*Contaminante:* Que contamina el agua, los alimentos o el medio ambiente (Real Academia Española, 2019).

*Adsorción:* Concentración de una sustancia disuelta, bien sobre la superficie de un sólido, bien alrededor de las partículas de un coloide en suspensión (Real Academia Española, 2021).

*Citotoxicidad:* La citotoxicidad es la cualidad de ser tóxico para las células. La citotoxicidad puede medirse por el test MTT, test Trypan blue (TB), test de la sulforhodamina B (SRB), test WST, test clonogénico, en inglés. Cualidad de ser tóxico a células (Real Academia Española, s. f.).

*Metalurgia:* conjunto de los conocimientos, las técnicas y los procedimientos que permiten la extracción y el tratamiento de metales partiendo de minerales. El término también permite referirse a la industria que se dedica a esta actividad (Pérez Porto & Merino, 2020).

<b>Lista de Figuras</b>	<b>Página</b>
<b>Figura 1.</b> Esquema que muestra los pasos seguidos para el desarrollo del presente trabajo.	<b>- 40</b>
<b>Figura 2.</b> Presa de Jarositas (residuos) de la planta de Zinc (Industrial Minera México, SLP).	<b>- 42</b>
<b>Figura 3.</b> Equipo de Difracción de Rayos-X, INEL EQUINOX 2000, ubicado en la UAEH-AACTyM.	<b>- 44</b>
<b>Figura 4.</b> Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM5900-LV, ubicado en la Escuela Superior de Apan, UAEH.	<b>- 46</b>
<b>Figura 5.</b> Evaporadora para recubrir con oro o grafito muestras para MEB-EDS.	<b>- 47</b>
<b>Figura 6.</b> Equipo de análisis superficial para muestras sólidas (XPS).	<b>- 49</b>
<b>Figura 7.</b> Arreglo experimental para la descomposición alcalina de la jarosita industrial y la incorporación de As, Cr y As/Cr.	<b>- 60</b>
<b>Figura 8.</b> Espectro de DRX de la muestra de jarosita industrial.	<b>- 63</b>
<b>Figura 9.</b> Distribución de partículas encontradas en la muestra de jarosita industrial (MEB - SE).	<b>- 65</b>

<b>Figura 10.</b> Detalle de partículas de jarosita industrial (MEB - SE) x 2000	<b>- 66</b>
<b>Figura 11.</b> Espectro EDS y micrografía de las partículas de jarosita industrial.	<b>- 66</b>
<b>Figura 12.</b> Espectro XPS de la muestra de jarosita industrial.	<b>- 67</b>
<b>Figura 13.</b> Ensayo citotóxico MTT de las células dentales sembradas con la jarosita industrial (4000 células/pozo), después de 3, 7 y 10 días. Los resultados están expresados cómo la desviación media y estándar de la viabilidad de las células.	<b>- 68</b>
<b>Figura 14.</b> Imágenes representativas del depósito de la jarosita industrial sobre las células dentales en el día 21 mediante ARS, con sus respectivas micrografías.	<b>- 70</b>
<b>Figura 15.</b> Resultados iniciales de PCR con células y jarosita industrial.	<b>- 71</b>
<b>Figura 16.</b> Resultados de PCR con células inducidas durante 15 días.	<b>- 72</b>
<b>Figura 17.</b> Resultados de PCR con células inducidas durante 21 días.	<b>- 73</b>
<b>Figura 18.</b> Espectro DRX de la Jarosita industrial descompuesta en medio alcalino.	<b>- 74</b>
<b>Figura 19.</b> Espectro DRX de la Jarosita industrial descompuesta y As incorporado.	<b>-75</b>
<b>Figura 20.</b> Espectro DRX de la Jarosita industrial descompuesta y Cr incorporado.	<b>-76</b>
<b>Figura 21.</b> Espectro DRX de la jarosita industrial descompuesta y con la incorporación tanto de arsénico como de cromo.	<b>-77</b>

- Figura 22.** Imagen de SEM (SE), que muestra 3 espectros de EDS - 79  
obtenidos en partículas de jarosita industrial descompuesta y con incorporación de As.
- Figura 23.** Imagen de SEM (SE), que muestra 3 espectros de EDS - 80  
obtenidos en partículas de jarosita industrial descompuesta y con incorporación de As.
- Figura 24.** Imagen de SEM (SE), que muestra 3 espectros de EDS - 81  
obtenidos en partículas de jarosita industrial descompuesta y con incorporación de Cr.
- Figura 25.** Imagen de SEM (SE), que muestra 3 espectros de EDS -82  
obtenidos en partículas de jarosita industrial descompuesta y con incorporación de Cr.
- Figura 26.** Imagen de SEM (SE), que muestra 3 espectros de EDS - 84  
obtenidos en partículas de jarosita industrial descompuesta y con incorporación tanto de As, como de Cr.
- Figura 27.** Mapeo de Rayos - X realizados mediante SEM, que muestran - 85  
la presencia tanto de As como de Cr.
- Figura 28.** Espectros XPS de la jarosita industrial con As (A) y la jarosita - 86  
industrial con As (A) y la jarosita industrial ya descompuesta sin As(B).
- Figura 29.** Espectro XPS de la jarosita industrial descompuesta y - 87  
re-cristalizada, con la incorporación de arsénico.
- Figura 30.** Espectro XPS de la jarosita industrial descompuesta y - 88



re-cristalizada, con la incorporación de cromo.

**Figura 31.** Espectro XPS de la jarosita industrial descompuesta y

- 89

re-cristalizada, con la incorporación conjunta de arsénico y cromo.

<b>Lista de Tablas</b>	<b>Página</b>
<b>Tabla 1.</b> Tipos de jarositas clasificadas por su origen (natural o sintético).	<b>- 32</b>
<b>Tabla 2.</b> Parámetros de operación para el análisis de Difracción de Rayos-X.	<b>- 43</b>
<b>Tabla 3.</b> Composición promedio obtenida de los espectros EDS mostrados en la figura anterior (contenido de As, 18.84 %).	<b>- 79</b>
<b>Tabla 4.</b> Composición promedio obtenida de los espectros EDS mostrados en la figura anterior (contenido de As, 16.55 %).	<b>- 80</b>
<b>Tabla 5.</b> Composición promedio obtenida de los espectros EDS mostrados en la figura anterior (contenido de Cr, 1.15 %).	<b>- 82</b>
<b>Tabla 6.</b> Composición promedio obtenida de los espectros EDS mostrados en la figura anterior (contenido de Cr, 1.72 %).	<b>- 83</b>
<b>Tabla 7.</b> Composición promedio obtenida de los espectros EDS mostrados en la figura anterior (contenido de As del 15.56 % y Cr del 1.13 %).	<b>- 84</b>

## **Justificación**

La problemática de los residuos industriales, en particular los residuos de la industria minero-metalúrgica es un desafío ambiental significativo. Los compuestos jarosíticos, generados en grandes cantidades por la industria hidrometalúrgica del zinc, son catalogados como residuos peligrosos debido a su impacto negativo en el medio ambiente y la salud pública. Esta tesis se centra en la revalorización de estos residuos, específicamente las jarositas, proponiendo su reutilización en dos áreas clave: la remediación ambiental y como biomateriales en la ingeniería tisular.

Este trabajo tiene como objetivo principal demostrar que las jarositas industriales, tradicionalmente vistas como residuos peligrosos, pueden ser revalorizadas y utilizadas de manera efectiva en la remediación de un contaminante y como biomateriales en ingeniería tisular, contribuyendo así a la mitigación de problemas ambientales y al avance de la tecnología médica. Convirtiendo un residuo peligroso en un material útil, beneficioso y económicamente viable para la industria.

# Capítulo 1. Marco Teórico

## 1.1 Tipos de residuos

La tendencia que tiene la población mundial en su incremento es alarmante, pues en 2022 se estimó que existían ocho mil millones de habitantes en nuestro planeta, y las proyecciones indican que para 2050 habrá 9700 mil millones de personas (ONU, s.f.).

Este crecimiento, tiene grandes implicaciones para el medio ambiente debido a la demanda de recursos naturales que necesitamos para subsistir. El ritmo que llevamos como humanidad está sostenido por un conjunto de industrias las cuales nos proveen de lo necesario para vivir, a través de complejos procesos de manufactura que logran transformar los recursos renovables y no renovables de nuestro planeta, en un sinnúmero de artículos presentes en nuestra vida cotidiana.

Por ello, ha aumentado el trabajo de la comunidad científica para generar información y planes que nos conduzcan a un desarrollo sustentable.

Concentrar esfuerzos en cuidar el ambiente es de suma importancia para asegurar nuestro futuro en este planeta. Sin embargo, hay aspectos que no parecen estar siendo adecuadamente considerados, uno de estos es la generación y la gestión de residuos.

Un residuo es un material que después de haber cumplido un propósito requiere ser desechado, pues ya perdió utilidad y no se tiene una manera de reutilizarlo o reciclarlo.

Los residuos son clasificados de diversas formas, esto depende de la región y la legislación vigente. Aunque de manera general los podemos clasificar de acuerdo a su origen, peligrosidad, biodegradabilidad o por el manejo que requieren.

En este trabajo, nos centraremos en describir preliminarmente, los residuos sólidos urbanos, residuos de la industria energética, alimentaria, de la salud, agrícolas, electrónicos y con más detalle, los residuos minero-metalúrgicos, que son tema central de esta tesis.

Todos estos desechos provienen de procesos industriales, de manufactura compleja y con características e impacto particulares.

### **1.1.1 Residuos sólidos urbanos**

Día con día, consumimos y utilizamos cosas necesarias para alimentarnos, vestirnos, asearnos, para entretenernos, aprender un oficio, etc.; cada actividad que llevamos a cabo de manera directa o indirecta genera residuos. Aquellos que resultan de estas actividades cotidianas y que comprenden envases, envolturas, unicel, PET, aluminio, papel, cartón, restos de comida, entre otros, son los llamados residuos sólidos urbanos (RSU).

La Ciudad de México, una de las ciudades más pobladas y contaminadas de todo el mundo, genera aproximadamente 13 mil toneladas diarias de desechos sólidos urbanos, lo cual es una cantidad enorme y se tiene un manejo tan pobre, por lo que

esta basura ni siquiera es almacenada en esta ciudad, sino que tiene que ser transportada a estados aledaños, uno de ellos el estado de Hidalgo (Simón, 2017).

Se estima que diariamente cada persona de América Latina produce 1 kilogramo de basura (Banco Mundial, 2019).

Lo más común es que estos desechos lleguen a grandes vertederos, los cuales, al menos en países en desarrollo como México, se encuentran en condiciones deplorables a pesar de que existan legislaciones muy completas en donde se describen todos los requisitos que deben cumplir para ser asignados como lugar de disposición final. La falta de control e incluso de interés, no solo es de los gobernantes, sino de la misma población que ha causado un grave problema medioambiental en muchas regiones de México. Cada vez es más común, ver áreas naturales convertidas en mega basureros y el problema no es solo de la contaminación visual sino de las afectaciones a la salud pública que se hacen cada vez más evidentes y graves.

Hay algunas “alternativas” para deshacerse de la basura, una de ellas es la incineración y aunque en apariencia es una manera sencilla de deshacerse de un problema, la verdad es que solo lo agrava. Por lo que este tema, puede generar un sin fin de investigaciones necesarias para mitigar o eliminar esta contaminación.

### **1.1.2 Residuos de la industria energética**

Esta rama de la industria, es fundamental para satisfacer las necesidades de la población. Porque cada una de las industrias requieren energía para llevar a cabo sus procesos productivos. Aunque la fuente de energía más utilizada es la proveniente de combustibles fósiles, cada vez se está optando más por adoptar fuentes más amigables con el planeta, como lo son la energía solar, eólica e hidráulica.

La industria petrolera, es la principal productora de energía en el planeta y también la más contaminante. Sus procesos para extraer, refinar y transportar petróleo generan residuos altamente peligrosos, incluyendo cantidades enormes de agua contaminada con metales pesados, restos de aceite, desechos de refinerías, de gas, así como dinamita; sin contar a las emisiones de gases tóxicos como dióxido de carbono, metano y óxido de nitrógeno (Galván Rico, Reyes Gil, Guédez Mozur, & De Armas, 2007).

### **1.1.3 Residuos de la industria alimentaria**

En esta categoría, se incluyen los desechos de la agricultura, ganadería y pesca, desde que son materia prima, hasta su conversión en alimentos para consumo.

Si bien la mayoría de estos son de origen orgánico, también se deben considerar los materiales usados para su transporte y manejo, como cartón, vidrio y plástico.

El aumento de la población demanda una mayor producción de alimentos. Sin embargo, se estima que anualmente en todo el mundo cerca de 1300 millones de toneladas de ellos terminan en la basura (Benítez, 2016).

#### **1.1.4 Residuos sanitarios**

Los servicios de salud generan desechos provenientes de hospitales, laboratorios, centros de investigación, etc. Estos incluyen sangre, tejidos, órganos, jeringas, hisopos, cubre bocas, desinfectantes, disolventes, medicamentos, etc. Se considera que el 85% de estos residuos son no peligrosos, mientras el otro 15% si lo son, por tener características infecciosas, tóxicas o radioactivas que al manejarse de una manera inadecuada pueden contaminar el ambiente e incluso propagar enfermedades (sobre todo los objetos punzocortantes).

La mayoría de estos desechos se tratan como basura común (RSU) y llega a vertederos o es incinerada, ambas opciones de disposición tienen inconvenientes. La primera porque las malas condiciones de los basureros pueden provocar la contaminación de agua por agentes infecciosos y la propagación de enfermedades a través de jeringas o flujos humanos portadores de enfermedades (como el VIH y la hepatitis). La segunda, porque la incineración libera partículas contaminantes al aire (pueden ser sustancias tóxicas como el cloro o el mercurio) o deja cenizas (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2018).



### **1.1.5 Residuos electrónicos**

En esta categoría, se clasifican los desechos eléctricos y electrónicos, por ejemplo, celulares, computadoras, televisiones, electrodomésticos, equipo médico, etc.

El avance tecnológico ha propiciado una cultura de consumo excesivo, esto se evidencia con grandes cantidades de basura electrónica, la cual muchas veces aún posee vida útil. Lo más alarmante, es que esta basura tecnológica no suele tratarse de manera especial o distinta a los RSU y terminan en basureros a cielo abierto, esto es incorrecto debido a la gran cantidad de elementos químicos que contienen, por ejemplo, níquel, aluminio, cobre, oro, plata, cadmio, platino y paladio; estos, aunque se encuentren en cantidades pequeñas podrían extraerse y reutilizarse. Sin embargo, dentro de esta gama de compuestos también se tienen sustancias peligrosas como el plomo, el cual al liberarse en el ambiente o llegar al organismo genera efectos negativos.

Las cifras son alarmantes, pues en 2021 solo en México se produjeron más de 1.2 millones de toneladas métricas de este tipo de residuos, ocupando la segunda posición en la lista de países generadores de esta basura en el Caribe y América Latina.

## **1.2 Impacto medioambiental y en la salud pública**

La cantidad de basura producida por los humanos, impacta de manera negativa no solo al ambiente sino también a nuestra salud.

Los residuos plásticos, con sus variedades, son el ejemplo más evidente de esta situación pues es un material utilizado por todas las industrias. Su presencia en los ecosistemas ha alterado el equilibrio natural de los mismos, su mal manejo y disposición los ha llevado a integrarse a los suelos, de los que otras especies se alimentan y en donde se cultivan nuestros alimentos, entrando así a nuestros organismos en forma de micro plásticos. Es evidente que, al acumularse en un organismo, su composición química genera efectos nocivos y enfermedades.

Uno de los efectos más preocupantes de la industria es la deforestación. La tala de árboles desmedida se lleva a cabo para la ganadería, la agricultura, la minería, la construcción, la extracción de petróleo y gas, etc. Esto provoca un desplazamiento de especies de flora y fauna, así como un desequilibrio en los ecosistemas, y a esto se le debe sumar la contaminación de agua, aire y suelo que generan las industrias en el lugar donde se llevan a cabo.

La industria petrolera provoca daños al ambiente en diversos niveles, se requiere deforestar un área para explorar y extraer el hidrocarburo, después su refinamiento implica procesos químicos de los que resultan sustancias químicas nocivas que se incorporan al agua y suelo saturándolos de metales pesados, sin olvidar las emisiones de gases de efecto invernadero que debilitan la atmósfera.

Otro de los residuos de esta industria es el plomo, el cual se utiliza como aditivo en la gasolina y es liberado al ambiente por combustión, este elemento es nocivo para la salud, se acumula en los pulmones, su exposición prolongada llega a afectar órganos vitales como cerebro e hígado (Galván Rico, L. et al., 2007).

### **1.3 Procesos de minimización, reciclaje y reaprovechamiento**

Contrarrestar el impacto de los residuos inicia con acciones simples, tales como reducir el consumo de productos de un solo uso (bolsas, botellas, cubiertos, platos desechables, etc.), reparar artículos en lugar de reemplazarlos, reutilizar materiales y darles el mayor tiempo de uso posible. Informarnos a cerca de la correcta disposición de nuestra basura, separar los residuos, hacer composta, recolectar envases de aluminio o PET y llevarlos a plantas recicladoras, entre muchas otras acciones.

La problemática actual causada por una mala gestión de residuos, está impactando al planeta en diversas formas, es por esto que se buscan estrategias eficaces para mitigar el efecto negativo causado al ambiente y a la salud pública.

Los avances tecnológicos y científicos están replanteando la manera en que los residuos son manejados. En países desarrollados, se están implementando estrategias basadas en la economía circular para darle un valor agregado a la basura al convertirla en energía eléctrica, esto se conoce como “waste to energy”. Los residuos utilizados para este propósito incluyen los RSU, biomasa y residuos

agroindustriales; estos residuos deben cumplir con requisitos y características específicas para someterse a los procesos que los transformarán de basura a energía (la pirolisis, biometanización, gasificación e incineración) (Tuset, 2023).

Hay diversas propuestas para lidiar con la basura, en lo que respecta a la basura electrónica, el reto es grande pues su correcta disposición requiere de una serie de pasos que inician con separar los aparatos, primero en categoría y después separar sus componentes individuales (plásticos, baterías, metal, etc.). Una vez que estén clasificados, se requiere llevarlos a un lugar adecuado para su tratamiento, en algunos lugares de México se realizan campañas para recibir esta basura y almacenarla correctamente. Sin embargo, los metales valiosos (p. ej. plata, oro, platino) con los que se elaboran la mayoría de los dispositivos electrónicos y eléctricos son un área de oportunidad desperdiciada ya que estos pueden extraerse y ser utilizados como materia prima para elaborar otros productos (Ferreira Medina, Cendejas, & Valencia García, 2019).

El problema con iniciativas de este tipo, es que requieren de gran inversión económica y un manejo adecuado de las plantas tratadoras para evitar una afectación aún mayor al ambiente, es por eso que en países subdesarrollados estas plantas no son una opción para gestionar la basura.

## 1.4 Residuos de la industria Minero - Metalúrgica

Los minerales de interés económico se encuentran distribuidos en diversos puntos geográficos de la Tierra; como consecuencia, la minería es una actividad que se realiza en todas las regiones del planeta y ha contribuido al desarrollo de la humanidad misma, a pesar de los reclamos de medioambientalistas que propagan que es una actividad altamente contaminante.

Los procesos metalúrgicos que permiten la transformación de minerales y materiales en recursos valiosos generan desechos sólidos, líquidos y gaseosos.

A continuación, se enlistan y describen brevemente algunos residuos:

- Relaves: son rocas, compuestos químicos y agua que no contienen un valor económicamente significativo de mineral, se generan en gran volumen y se depositan en jales mineros que por lo general no tienen las condiciones adecuadas para su almacenamiento, generando contaminación del aire, el suelo y el agua cercanos a ellos.
- Escorias: son residuos sólidos de procesos metalúrgicos. En la producción piro metalúrgica del cobre, resultan cerca de 30 millones de toneladas de escoria a nivel mundial, se estima que por cada tonelada de Cu se generan 2.2 toneladas de escoria (San Martín, Carrasco, Aguilar, & Sánchez, 2022).
- Drenaje ácido de mina: se encuentra en estado líquido, se produce debido a los minerales con azufre que al exponerse al agua y el viento reaccionan y producen ácido sulfúrico y metales pesados además de tener un pH ácido. Es considerado muy contaminante y tóxico.

## **1.5 Tratamiento de residuos de la industria Minero - Metalúrgica**

Los residuos mineros, son una gran fuente de contaminación debido a que, en los relaves, se almacenan lodos con tamaño de partícula pequeño, lo que los hace susceptibles a ser transportados por agentes climáticos (aire y agua) provocando la dispersión de estos residuos a sistemas de agua (superficiales y subterráneas) y a los suelos. Esto provoca que, de manera inevitable, estas partículas entren en contacto con animales, plantas y seres humanos.

La composición de los jales comúnmente incluye elementos peligrosos para los seres vivos (As, Cr, Pb, etc.), que en cantidades pequeñas pueden estar presentes en el organismo. Sin embargo, el contacto prolongado con las fuentes de contaminación, provoca graves daños a la salud e incluso puede conducir a la muerte.

El manejo adecuado de los residuos es crucial, no solo para la protección del medio ambiente, sino también para la salud pública. Una gestión eficaz y responsable puede reducir significativamente los riesgos asociados y promover un entorno más saludable para todos.

La industria minero-metalúrgica genera una gran variedad de residuos, en diferentes etapas de los procesos de extracción y procesamiento de minerales. Estos residuos pueden tener un impacto significativo en el medio ambiente, si no se gestionan adecuadamente.

Mediante la implementación de tecnologías avanzadas y prácticas sostenibles, es posible reducir significativamente los riesgos asociados con estos residuos.

## Capítulo 2. Antecedentes

### 2.1 Compuestos tipo jarositas. Formación y Estructura

Las jarositas son minerales del grupo de la alunita, su fórmula general es:  $AFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ , donde, A puede ser  $NH_4$ , Na, K, N, Ag, Tl, Rb, Pb o Hg; y además de Fe, pueden contener Pb, Cd, Cr, As, Zn, In, Ga y Ge (Djokić et al. 2023, p 179).

El hierro es el átomo central de la molécula, a él se ligan los grupos sulfato ( $SO_4$ ) e hidroxilo (OH) (López-Martínez, Khamkure, & Gamero-Melo, 2023).

Su localidad tipo es el Barranco de Jaroso, en la Sierra Almagrera de Almería, España, en donde fue descubierta en 1852 por Johann F.A. Breithaupt.

Estos compuestos pueden originarse de manera natural en ambientes específicos, o bien sintetizarse en laboratorio.

Ocurren de manera natural en las partes oxidadas de los depósitos de sulfuro o como nódulos y diseminación en arcillas, como constituyentes de suelos ácidos y como minerales hipogénicos (Cruells & Roca, 2022).

En México, afloran yacimientos jarosíticos en los estados de Hidalgo, Zacatecas, Durango y Chihuahua (en este estado se han encontrado los mejores minerales), estos yacimientos se asocian a procesos de meteorización de sulfuros de hierro (Salinas, Cerecedo, Ramírez, Patiño, & Pérez, 2012) y a la alteración de sulfuros y de rocas encajonantes, ya sea supergénica o hidrotermal.



Las jarositas son comunes en el drenaje ácido de mina, suelos sulfatados ácidos, sistemas de biolixiviación y en procesos hidrometalúrgicos de la industria del Zn, además de que son precipitados para eliminar el Fe y otros elementos no deseados (Cerecedo-Sáenz, y otros, 2022).

Se han sintetizado nueve tipos de jarositas; la jarosita de rubidio, jarosita de talio y la jarosita de mercurio son las únicas que solo se pueden obtener a través de síntesis (Tabla 1), mientras que hay otras seis especies minerales presentes en la naturaleza (Salinas, Cerecedo, Ramírez, Patiño, & Pérez, 2012).

El proceso para sintetizar estos compuestos convencionalmente requiere de la utilización de temperaturas bajas (60-100°C), tiempo prolongado (hasta 24 horas) y un pH bajo (López-Martínez, Khamkure, & Gamero-Melo, 2023). Sin embargo, se han realizado estudios recientes en donde los valores de estos parámetros varían, esto con el objetivo de optimizar el método generalmente utilizado.

**Tabla 1.** Tipos de jarositas clasificadas por su origen (natural o sintético).

Tipos de JAROSITAS	
<i>Origen Natural</i>	<i>Origen Sintético</i>
Jarosita de Sodio (natrojarosita) $\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	Jarosita de Rubidio
Jarosita de Potasio $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	Jarosita de Talio
Jarosita de Hidronio $(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	Jarosita de Mercurio
Argentojarosita J-Ag $\text{AgFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	Jarosita de Rb Argentífera
Jarosita de amonio J-NH <sub>4</sub> $(\text{NH}_4)\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	Jarosita de Pb Argentífera

Jarosita de Plomo (plumbojarosita)	
------------------------------------	--



## 2.2 Precipitación de la jarosita en la industria del Zn

Las jarositas se precipitan en el proceso hidrometalúrgico para la obtención de Zinc, estos minerales se utilizan para controlar la cantidad de hierro, sulfatos y metales alcalinos.

El proceso para obtener Zn, inicia con la tostación de la esfalerita, de esto se obtiene óxido de zinc y ferrito de zinc en estado sólido, después se les agrega ácido sulfúrico generando lixiviados.

Los elementos presentes en esos lixiviados incluyen hierro, zinc, plomo, cobre, indio, galio, arsénico y cadmio como componentes mayoritarios, y en menor proporción hay potasio y sodio.

Para liberar la solución del hierro se agrega sulfato de amonio, lo cual desencadena la precipitación de las jarositas. Este residuo se sedimenta, se filtra, y finalmente se almacena.

La eliminación de los otros elementos presentes en los lixiviados, se realiza con polvo de zinc. Mientras que la extracción del Zn sucede por un proceso de electrólisis (Cruells & Roca, 2022).

Además de controlar iones no deseados, este proceso permite la recuperación de otros valores minerales como el Zn, Ni y Co (Salinas, Cerecedo, Ramírez, Patiño, & Pérez, 2012).

### **2.3 Reactividad alcalina de las jarositas**

La reactividad alcalina de las jarositas, es un tema de particular interés debido a sus implicaciones para la movilidad de metales pesados y la remediación ambiental en áreas afectadas por actividades mineras.

### **2.4 Las jarositas y el medioambiente**

Se estima que cada año se generan entre 6 y 7 millones de toneladas de residuos jarosíticos, provenientes de los procesos extractivos del zinc (Đokić, Gajić, Anđić, & Kamberović, 2023). Estos se clasifican como residuos peligrosos, debido a su alto contenido de metales pesados e inestabilidad química. Se encuentran en estado sólido, son de grano fino y pH ácido (Wang, Huifen, Ge, Jingxing, & Chuanlong, 2020).

La problemática con estos materiales, radica en que son vertidos en el ambiente sin la supervisión que requieren y son considerados materiales sin valor; lo que provoca pérdida de elementos valiosos que podrían ser reutilizados e incluso revalorizados.

## 2.5 Diversos estudios y aplicaciones de las jarositas sintéticas

Las jarositas han sido objeto de estudio desde 1852, gracias a eso se conocen bien sus características químicas y físicas. En la actualidad los avances científico tecnológicos permiten descubrir nuevos comportamientos de este material, lo que abre una amplia gama de posibilidades en cuanto a sus aplicaciones industriales.

Diversos autores, trabajan con este material modificando sus parámetros de síntesis, tales como el pH, tiempo, temperatura y presión, estos determinan las propiedades de las jarositas como el tamaño de partícula y su forma, haciéndolas un material versátil en cuanto a sus posibles usos industriales.

Cruells y Roca, (2022) presentan un trabajo, en donde se describen ampliamente las jarositas, su formación, estructura, reactividad e impacto ambiental.

López Martínez et al. (2023), afirman que las propiedades de estos materiales los hacen atractivos para ser utilizados como adsorbentes de contaminantes presentes en agua.

Salinas et al. (2001), realizaron un análisis de la jarosita residuo del proceso hidrometalúrgico de precipitación del Zn.

Para su aplicación en la hidrometalurgia del zinc, Salinas et al. (2012) presentaron un trabajo sobre la reactividad de jarositas sintéticas y las mejores condiciones de cianuración para desarrollar un proceso óptimo para recuperar Ag de los residuos jarosíticos.

### **2.5.1 Las jarositas en baterías de ión litio**

Las características de estos materiales varían en función del proceso de síntesis al que sean sometidos, Hernández Lazcano et al. (2021) publicaron un trabajo en donde se analizan las propiedades eléctricas que adquieren la jarosita de hidronio y jarosita de potasio, al cambiar el pH y el tiempo en el que se realiza la síntesis.

Los resultados sugieren que los hidrosulfatos presentes en la jarosita, la hacen un material apto para ser utilizado como cátodos y mejorar la vida útil de los ánodos presentes en las baterías recargables de litio.

### **2.5.2 Las jarositas como adsorbentes de metales pesados**

Debido a sus características, los compuestos tipo jarositas poseen la capacidad de incorporar a su estructura elementos considerados contaminantes medioambientales, por ejemplo, plomo, arsénico, cromo, cadmio y mercurio (Flores, y otros, 2019).

López-Martínez et al. (2023), describen un proceso de síntesis de jarosita de sodio, de potasio y de amonio, éste se llevó a cabo a 150°C durante 5 minutos mediante un método asistido por microondas. El resultado fue jarosita con forma y tamaño de partícula uniforme, que la hace un mineral prometedor a ser utilizado como adsorbente y remediador de aguas contaminadas por elementos metálicos como el As (V) y el Pb(II).

La contaminación de agua con Hg, es una problemática que alarma a la comunidad científica debido a los daños que genera este elemento a la salud de las personas, por esto M.U Flores et al. (2019), caracterizaron a la jarosita de Hg para entender sus propiedades, los resultados indican que la jarosita tiene la capacidad de adsorber metales pesados e incorporarlos a su estructura a temperaturas altas, por lo que puede ser utilizada como remediador ambiental.

Karimian, et al. (2023), utilizaron jarosita de potasio sintética con un pH 3 para entender la manera en que actúa como adsorbente simultáneo de As (V) y Sb (V).

Cerecedo et al. (2022), sintetizaron jarosita de potasio y obtuvieron polvos con tamaño de partícula de 1-2 micrómetros, dándoles una mayor área de contacto superficial. Los polvos se probaron como adsorbentes de As (V) en 100 minutos de reacción, y el resultado fue una adsorción de 4.19% de As (V).

### **2.5.3 Las jarositas aplicadas en Ingeniería tisular**

Los estudios con jarosita, se han enfocado principalmente en la remediación ambiental debido a su capacidad de adsorber compuestos contaminantes como el As, Cr, Hg y Pb. Esto se debe a la creciente preocupación por mitigar el impacto ambiental de las actividades antropogénicas y los daños provocados a la salud pública.

Serralde Lealba y colaboradores (2022), proponen una metodología nueva para sintetizar la jarosita de potasio, en esta se reduce el tiempo de síntesis a solo 3

horas y la temperatura a 70°C. El compuesto fue dopado con calcio, estroncio y magnesio, en los resultados se observa que estos elementos fueron incorporados a la estructura molecular de la jarosita.

En este trabajo, se propone la utilización de jarosita potásica dopada con calcio estroncio y magnesio como un biomaterial que junto con otros polímeros sirva para la creación de andamios que promuevan la proliferación celular.



## Capítulo 3. Desarrollo Experimental

### 3.1. Introducción

En el presente capítulo, se describirán las etapas que se desarrollaron para efectuar el trabajo de evaluación citotóxica del material, así como las pruebas de adsorción de Arsénico y Cromo en el material descompuesto. Así mismo, se describen todas y cada una de las técnicas utilizadas para su caracterización preliminar y posterior a las pruebas realizadas. En primer lugar, se obtuvo la muestra (20 kg) de la presa de jarositas que se precipitaron en los circuitos hidrometalúrgicos de la planta de zinc en la compañía Industrial Minera México, ubicada en San Luis Potosí, México.

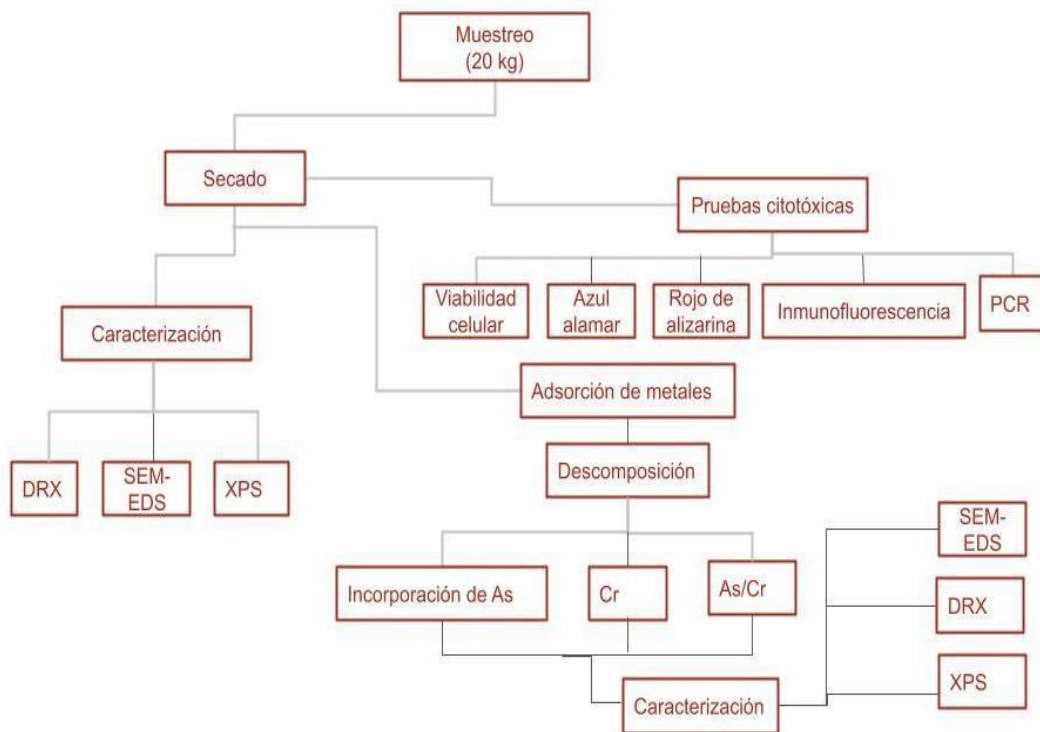
La muestra ya homogenizada y secada, fue caracterizada mediante Difracción de Rayos - X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido en conjunción con Espectrometría Dispersiva de Rayos - X (MEB-EDS), y Espectroscopia de Fotoelectrones emitidos por Rayos - X (XPS).

Posteriormente, fueron tomadas muestras representativas para llevar a cabo las pruebas de citotoxicidad en el Laboratorio de Ingeniería Tisular y Traslacional de la Universidad Nacional Autónoma de México. Las pruebas realizadas fueron las siguientes: aislamiento y cultivo de las células, ensayo de azul Alamar, ensayo de diferenciación de la jarosita, ensayo de rojo de Alizarin, inmunofluorescencia y PCR para Runx2 y Col I.

Por último, muestras de la misma jarosita fueron descompuestas en medio alcalino ( $\text{pH} > 10$ ) y se pusieron en contacto con soluciones que contenían iones de arsénico, cromo y arsénico/cromo, para determinar la viabilidad del material a adsorber dichos

metales considerados tóxicos. Los productos finales fueron caracterizados para determinar la incorporación de dichos elementos en la jarosita ensayada (residuo), mediante DRX, MEB-EDS y XPS.

La Figura 1, muestra el esquema donde se aprecian los pasos y etapas desarrollados en la fase experimental del presente trabajo.



**Figura 1.** Esquema que muestra los pasos seguidos para el desarrollo del presente trabajo.

### **3.2. Muestreo**

Para el desarrollo del presente trabajo, se utilizó un residuo generado en la industria del zinc, particularmente de la Compañía Industrial Minera México, cuya planta se encuentra en la Ciudad de San Luis Potosí, México, el cual es considerado dañino y peligroso al medio ambiente (Jae-Geun & Yeongkyoo, 2022). La adquisición de la muestra fue mediante la solicitud de la misma al superintendente de la planta de zinc. Debido a las restricciones existentes por la etapa post pandemia, la muestra fue tomada por operarios de la propia planta en la presa de jarositas (residuos de la planta) y debido a la homogeneidad del proceso de precipitación de jarositas, el muestreo se realizó en la parte superior de la presa mediante toma directa de una muestra representativa de 20 kg de material. La figura 2, muestra la presa de jarositas de la cual fue tomada la muestra y que se ubica en la colonia Morales de la Ciudad de San Luis Potosí, México.

Una vez que la muestra estuvo lista, se acudió a la planta para recibirla y llevarla al laboratorio para su preparación y acondicionamiento. La muestra fue recibida con un 40% de humedad, la cual fue eliminada mediante calentamiento directo en una mufla a 60 °C durante una hora, cada vez que se iba a ocupar muestra para su caracterización, las pruebas citotóxicas y los experimentos de adsorción de arsénico y cromo.



**Figura 2.** Presa de Jarositas (residuos) de la planta de Zinc (Industrial Minera México, SLP).

### **3.3. Caracterización de la jarosita industrial**

Debido a que la muestra proporcionada por la empresa, tiene una homogeneidad representativa y además de que la finalidad del trabajo es evaluar las posibilidades que tiene de ser reaprovechados dichos residuos, no fue necesario volverla a homogenizar y fue solamente secada la cantidad de muestra que se necesitaba para su caracterización, pruebas citotóxicas y ensayos de adsorción de arsénico y cromo.

### 3.3.1. Difracción de rayos - X

Para llevar a cabo este análisis, se pesó un gramo de muestra tanto para la caracterización preliminar del material, como para su caracterización una vez llevados a cabo los experimentos de adsorción de As y Cr. El tamaño promedio de cada muestra fue de -200 mallas (74  $\mu\text{m}$ , aproximadamente), la cual fue compactada en un porta muestras y colocada en un equipo de difracción de rayos - X marca INEL, modelo EQUINOX 2000 (Figura 3), que fue operado bajo las condiciones de trabajo mostradas en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Parámetros de operación para el análisis de Difracción de Rayos - X.

Parámetro	Descripción
Radiación	Cu $K\alpha_1$ ( $\lambda = 1.546 \text{ \AA}$ )
Monocromador	Germanio
Voltaje	30 KeV
Intensidad	20 mA
Tiempo de Barrido	15 minutos



**Figura 3.** Equipo de Difracción de Rayos - X, INEL EQUINOX 2000, ubicado en la UAEH-AACTyM.

Los espectros obtenidos bajo las condiciones descritas, fueron evaluados y caracterizados con el uso del software MATCH versión 1.1. En la sección de resultados, se muestran la caracterización de la jarosita industrial y de los sólidos resultantes después de las pruebas de adsorción de As y Cr, respectivamente.

### **3.3.2. Microscopia Electrónica de Barrido y Espectrometría Dispersiva de rayos - X (MEB-EDS)**

Para llevar a cabo el análisis morfológico, mapeos y la determinación de elementos presentes en la jarosita industrial (puntual y semi - cuantitativamente), se llevó a

cabo el análisis mediante Microscopía Electrónica de Barrido en conjunción con Espectrometría Dispersiva de rayos - X. Este análisis, se efectuó en la muestra traída de la presa de jarositas y ya secada, así como las muestras obtenidas después de los ensayos de adsorción de As, Cr y As/Cr, para determinar si ocurrió el intercambio de dichos elementos en la estructura de la jarosita descompuesta.

El equipo utilizado para este ensayo, fue un microscopio JEOL JSM 5900-LV (Figura 4), ubicado en la Escuela Superior de Apan de la UAEH. El equipo utilizado, tiene un alcance de 300,000 aumentos y trabajó con un incremento "spot size" de  $10^{-2}$  a  $10^{-5}$  amperes y un potencial de 30 KeV.



**Figura 4.** Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM5900-LV, ubicado en la Escuela Superior de Apan, UAEH.

Este equipo cuenta con espectrómetro de Rayos - X por dispersión de energías (EDS), marca Oxford y operado de 20 a 30 kV, con el cual se determinaron las intensidades relativas de los elementos presentes en el material dentro de un área de análisis de  $1 \mu\text{m}^3$ , aproximadamente.

Para llevar a cabo el análisis morfológico, las muestras en polvo fueron recubiertas con oro para mejorar la conductividad y poder obtener imágenes de alta calidad. Para el caso, de los análisis mediante EDS, las muestras fueron recubiertas con una capa de grafito y evitar así la interferencia de las líneas de oro que aparecen en los espectros obtenidos. Ambos tipos de recubrimientos se llevarán a cabo en una evaporadora marca DENTUM VACUUM (Figura 5), con un tiempo de recubrimiento de 2 minutos y a una presión de 20 militorres.





**Figura 5.** Evaporadora para recubrir con oro o grafito muestras para MEB-EDS.

### 3.3.3. Espectroscopia de Fotoelectrones emitidos por Rayos - X (XPS)

Para el análisis semi-cuantitativo de la muestra, se llevó a cabo la espectrometría de fotoelectrones emitidos por rayos - X, para determinar el estado químico y la estructura electrónica de los elementos presentes en la muestra de jarosita industrial. Esta técnica, consiste esencialmente en la excitación de los elementos contenidos en la muestra, mediante un haz de rayos - X de los niveles más internos de los átomos, provocando así la emisión de fotoelectrones que proporcionan información referente a la energía de cada nivel, y por ello, sobre la naturaleza de cada átomo emisor, con una confiabilidad del 90 al 93 %. La técnica fue utilizada,

tanto para caracterizar la muestra de jarosita industrial, como la de la jarosita descompuesta y que fue sometida al proceso de intercambio catiónico para lograr y corroborar la adsorción del As, Cr y As/Cr, principalmente.

Para llevar a cabo el análisis ya descrito, se utilizó un equipo análisis de superficie de la marca Thermo Scientific, modelo K ALPHA (Figura 6), que tiene un analizador hemisférico ( $180^\circ$ ) de doble aproximación y detector de 128 canales usando una presión base de  $2 \times 10^{-2}$  mbar, ubicado en el Laboratorio de Nano y Biomateriales del CINVESTAV-IPN unidad Mérida. El cañón de rayos - X usa la línea  $K\alpha$  monocromática de Al (1486.6 eV) a 12 kV y 40 watts de potencia en un área oval de 400  $\mu\text{m}$  de diámetro, que afecta a la muestra con un ángulo relativo de  $30^\circ$ . En erosión, se utiliza un haz de iones de argón acelerados a 3 kV con una potencia de 30 watts, que incide en un área de 1 x 2 mm concéntrica al haz de rayos - X. El neutralizador, genera una nube de iones de argón cerca de los 0 V de energía, sobre la zona analizada. Los espectros XPS fueron obtenidos bajo dos condiciones: en un barrido amplio (0 - 1350 V) con 1 eV/paso, y en modo de pequeñas ventanas con 0.1 eV/paso, con una energía de paso de 50 eV.



**Figura 6.** Equipo de análisis superficial para muestras sólidas (XPS).

### **3.4. Ensayos Citotóxicos**

Los ensayos de citotoxicidad tienen el objetivo de evaluar si un material o compuesto tiene las características adecuadas para su uso como biomateriales, los cuales deben permitir la viabilidad, proliferación y metabolismo celular.

Existen diversos ensayos para evaluar citotoxicidad, cada uno con características y metodologías específicas. Su uso depende de los materiales de los que se dispone para el ensayo, los reactivos utilizados, la capacitación del personal y el objetivo específico de la evaluación.

Con base en los resultados obtenidos en pruebas de citotoxicidad efectuados sobre jarositas sintéticas (Serralde-Lealba, y otros, 2022), se llevaron a cabo pruebas citotóxicas sobre las jarositas precipitadas en la industria del zinc y considerados desechos industriales. Ya que la citotoxicidad se refiere a la tasa de efectos tóxicos en una célula viva, estos estudios pueden determinar la viabilidad de utilizar estos residuos en aplicaciones como ingeniería tisular, para elaboración de andamios y regeneración celular ósea.

De hecho, las pruebas básicas que se llevan a cabo para determinar si un material es o no biocompatible, son pruebas donde se evalúa la tasa de proliferación y efectos tóxicos sobre las células. Las pruebas básicamente se clasifican en tres: pruebas con sales de tetrazolio, pruebas de liberación de enzimas LDH y pruebas usando métodos luminiscentes.

Para el presente trabajo, las pruebas realizadas para determinar la citotoxicidad de la jarosita industrial (residuo), son las siguientes: Aislamiento y cultivo de células, prueba de fluorescencia del azul de Alamar, ensayo de diferenciación, prueba de tinte de rojo de Alizarin, Inmunofluorescencia y reacción en la cadena de polimerasa (PCR).

#### **3.4.1. Aislamiento y cultivo de células**

Las muestras (piezas dentales), de dónde se aislaron y se comenzaron a cultivar las células, fueron obtenidas de cinco pacientes jóvenes con edades entre 18 y 24

años. El proceso, también incluyó el consentimiento por escrito de los pacientes y de acuerdo a la aprobación ética por parte del comité de ética de la FES Iztacala, UNAM. Una vez realizadas las extracciones, las piezas dentales fueron refrigeradas para su preservación. Las pulpas se extirparon de los terceros molares y las células de los tejidos se liberaron mediante digestión con 1 µg/µl de colagenasa tipo II de la marca Sigma Aldrich, durante 15 minutos a 37 °C. Posteriormente, las células obtenidas se incubaron en condiciones de cultivo estándar. Después de un período de siembra inicial de 24 horas, los cultivos se sometieron a un lavado con solución salina tamponada con fosfato (PBS) para eliminar las células no adherentes y se añadió nuevo medio. En experimentos posteriores, se utilizaron células madre de pulpa dental (DPSC).

#### **3.4.2. Colorimetría de Azul de Alamar**

Se trata de uno de los ensayos más utilizados, entre sus ventajas están la simplicidad, su no toxicidad que permite reutilizar las células cultivadas, los resultados cuantitativos y la rapidez.

El principio de este ensayo es una reacción óxido-reducción que genera un cambio colorimétrico (de azul a rojo-rosa) como respuesta a la actividad metabólica celular.

La resazurina es el componente activo responsable del color azul en el ensayo, una vez que entra en contacto con las células ocurre una reacción que lo reduce a resorufina (lo que le da el color rojo-rosa).

De manera general el proceso es el siguiente: las células se colocan en placas (de 96 pozos comúnmente), las células se dividen en grupos incluyendo un grupo de control, se añade a las células el compuesto que se está evaluando, según los reactivos se procede a incubar las células a una temperatura durante un tiempo determinado, se añade el reactivo Alamar Blue y se vuelve a la incubadora en condiciones específicas.

Finalmente, las células son analizadas por fluorimetría o espectrofotometría, en donde de manera cuantitativa se determina la viabilidad de las células cultivadas.

El ensayo de colorimetría de Azul de Alamar (viabilidad celular, alamarBlue™. Invitrogen, USA) fue realizado para evaluar el efecto citotóxico y la viabilidad de células sembradas con jarosita industrial (residuo). El protocolo efectuado para trabajar con este material se describe a continuación: Se sembraron células madre de pulpa humana (h-DPSC) en una placa de cultivo de 96 pocillos a una densidad de  $5 \times 10^3$  (quintuplicado) y se incubaron durante 48 horas a 37 °C y 5% de CO<sub>2</sub>, para permitir que las células se adhirieran a la superficie de la placa de cultivo. Después de 48 horas de incubación, se cambió el medio de cultivo para eliminar las células muertas o las que no se adhirieron, mientras que se colocaron 0.005 g de jarosita industrial en polvo en cada placa de pocillos, y las células sólo en el pocillo sirvieron como grupo de control. Enseguida, se cultivaron en DMEM bajo en glucosa (Dulbecco's Modified Eagle Medium Low-Glucose, Biowest), posteriormente se incubaron en diferentes tiempos, 3, 7 y 10 días. Al final de cada tiempo, las células se incubaron con 100 µl de DMEM sin rojo fenol de Azul Alamar al 10 % durante 4

horas a 37 °C protegido de los rayos de luz. La viabilidad celular se midió mediante un lector de placas Elisa equipado (EPOCH BioTek) con un filtro de 570 nm y 630 nm. Los datos así obtenidos, se sometieron a un análisis estadístico utilizando el software GraphPad Prism versión 8.

### **3.4.3. Ensayo de Diferenciación en la Jarosita industrial**

Se entiende por diferenciación al proceso mediante el cual una célula cambia sus características de un modo permanente (aunque no forzosamente irreversible), de forma que sus descendientes mantendrán esas características o las cambiarán de nuevo si ocurre una nueva diferenciación en otro sentido. Este proceso es la manifestación externa (morfológica o bioquímica) de algo imperceptible ocurrido antes, y se denomina determinación, que es el conjunto de cambios en el estado interno de una célula debidos a alteraciones en la expresión de los genes que provocan un compromiso en el destino celular, es decir, una decisión de diferenciarse. Estos cambios no suelen ser apreciables, morfológicamente.

La diferenciación, es el proceso mediante el cual una célula cambia sus características de un modo permanente, más no definitivo, de forma que sus descendientes mantendrán esas características o las cambiarán de nuevo si ocurre una nueva diferenciación en otro sentido. La diferenciación muestra cambios morfológicos o químicos que habían pasado desapercibidos.

Las células tienen una “memoria” celular que les dice en qué sentido, cuándo y dónde deben diferenciarse, y después mantienen ese estado. La decisión de diferenciarse ocurre antes de la misma diferenciación. Así, de las somitas emigran células a las extremidades y allí se diferencian en células musculares; mientras las células que ya estaban allí se diferencian en otro sentido, por ejemplo, tejido conjuntivo. La célula que toma esa decisión está determinada (Paniagua, y otros, 2017).

Para llevar a cabo este ensayo, se sembraron células madre de pulpa humana (hDPSC) en una placa de cultivo de 24 pocillos a una densidad de  $5 \times 10^3$  (quintuplicado) y se incubaron durante 48 horas a  $37^\circ\text{C}$  y 5% de  $\text{CO}_2$ , para permitir que las células se adhirieran a la superficie de la placa de cultivo. Se sembraron las DPSC ( $1 \times 10^3$ ), y después de 48 horas de incubación se cambió el medio de cultivo para eliminar las células muertas o las que no se adhirieron, mientras que en cada pocillo se colocaron 0.005 g de jarosita industrial para mantener 4 grupos; sólo las células con DEMEM, sólo células con medio osteogénico (MesentCult™), células y jarosita industrial con DMEM, y células con jarosita industrial en medio osteogénico. Finalmente, todos estos grupos se cambiaron dos veces por semana durante los 28 días de inducción.



#### **3.4.4. Ensayo de Rojo de Alizarina S y Jarosita industrial**

El rojo de Alizarin S es una sal que se utiliza en la histología para localizar depósitos de calcio en los tejidos. También puede ser utilizado en la geología para identificar minerales de calcio (Alizarin Red S, 2024).

No se utiliza para evaluar citotoxicidad o proliferación celular, es más bien un ensayo que detecta el calcio presente en los cultivos celulares, algo útil para determinar la capacidad osteogénica de los materiales evaluados.

Es un proceso sencillo, rápido y que utiliza pocos reactivos. Las células son cultivadas, lavadas, se les agrega el rojo de Alizarin, que tiñe los depósitos de calcio y se analizan bajo el microscopio óptico.

El rojo de Alizarina S, colorea los depósitos de calcio de forma selectiva y ha sido utilizado por muchas décadas para evaluar los depósitos ricos en calcio en cultivos celulares. Para el ensayo de este trabajo, las DPSC se fijaron con paraformaldehído al 3.7 % (PFA, Spi-Chem, Chemicals - SPI Supplies, West Chester, PA, USA) en PBS durante 5 minutos y luego se lavaron tres veces con PBS. Las células fijadas sobre soportes, se lavaron adicionalmente con agua destilada para eliminar cualquier residuo de sal. Se les añadió después, una solución de rojo de Alizarina S al 2 % p/v (Sigma Aldrich), a un pH ajustado de 4.2, de modo que se cubriera toda la superficie. Después de 10 minutos de incubación a temperatura ambiente, el exceso de rojo de Alizarina S se lavó con agua destilada. Finalmente, la tinción se observó utilizando un microscopio óptico invertido, marca LEICA DM IL DED.

### **3.4.5. Ensayo de Inmunofluorescencia**

La inmunofluorescencia es un método utilizado en estudios experimentales para determinar antígenos en tejidos o células cultivadas, se usan anticuerpos que llevan adherido un tinte especial, y que se unen al antígeno de la muestra.

Para efectuar el ensayo de inmunofluorescencia, las células fueron sembradas en cubreobjetos y se mantuvieron durante 28 días en medio de diferenciación. Una vez que transcurrió dicho tiempo, las células fueron lavadas con PBS y se fijaron en paraformaldehído (PFA) al 3.7 % en PBS durante 15 minutos y a temperatura ambiente. De igual modo, las células se permeabilizaron con Triton X-100 al 1% (Sigma Aldrich), y se bloquearon con albúmina sérica bovina al 1% (Sigma Aldrich) en PBS durante 1 hora y a temperatura ambiente. Posteriormente, las células se incubaron durante toda la noche a 4°C con anticuerpo primario (RUNX2, monoclonal de ratón) diluido en solución de bloqueo 1:200, después de que las células se incubaron 1 hora en un 1: dilución 700 de anticuerpo secundario conjugado con F Alexa Flour 488 (FITC-anti-ratón, Jackson ImmunoResearch).

Las células se tiñeron con 40,6-diamidino-2-fenilindol (DAPI; 1:100, Sigma Aldrich). Finalmente, se lavaron los portaobjetos y se taparon las cubiertas con medio de montaje VECTASHIELD. Las preparaciones se observaron en un microscopio de epifluorescencia (ZEISS SCOPE.A1, Software ZEN LITE 2012) con objetivo de 40x bajo.

### 3.4.6. Ensayo de RT PCR

La reacción en cadena de la polimerasa o PCR es una técnica de laboratorio utilizada para amplificar o copiar cadenas cortas de ADN. Es utilizada en medicina, ciencias forenses y la investigación biomédica.

La metodología es sencilla, se inicia con una muestra de ADN corta (cebadores), la cual al someterse a cambios de aumento y decremento de la temperatura se desnaturalizan (separan) y gracias a la reacción de la enzima polimerasa se sintetizan las nuevas cadenas de ADN.

Para que esta reacción se lleve a cabo se necesitan dNTP's nucleótidos que generan las nuevas cadenas de ADN.

El catalizador de esta reacción es la TaqADN polimerasa, se trata de una enzima que se obtiene de la bacteria *Thermus aquaticus*, este organismo suele vivir en condiciones hidrotermales por lo que tiene una gran resistencia a las temperaturas elevadas, pero también subsiste en temperaturas más bajas, lo que la hace termoestable.

Para llevar a cabo el procedimiento se utiliza un termociclador, este se programa para cambiar las temperaturas en un determinado tiempo y esto se repite las veces que sean necesarias hasta obtener la cantidad de ADN que se requiere para la experimentación.

Existen diferentes tipos de prácticas de PCR, para este trabajo se utilizó la técnica conocida como RT PCR, las iniciales RT hacen referencia a la enzima transcriptasa

reversa. En esta variante no se trabaja con DNA sino con ARN, y el resultado es ADN complementario (cADN), el cual contiene ARN mensajero y es el que se replica (González, López, Domínguez, & Gutiérrez, 2022).

Gracias a la reacción en cadena de la polimerasa a partir de una muestra pequeña de ADN o ARN se obtiene el material necesario para realizar experimentos o pruebas médicas suficientes para realizar toda una investigación.

Para dar inicio a este ensayo, primero se extrajo el ARN de las células utilizando TRI REAGENT (Sigma Aldrich), siguiendo las instrucciones del fabricante. El ARN purificado se cuantificó utilizando un NANODROP 2000 (ThermoScientific). Se utilizó 1 µg de ARN y se transcribió de forma inversa en ADNc utilizando un cebador aleatorio (250 ng) y transcriptasa inversa en un termociclador a 42 °C durante 1 hora. Así, el ADNc (1 µl) se usó como plantilla para la amplificación por PCR de los ADNc de colágeno tipo I (COL1A1) y Runx2, y el ARN ribosómico 18s (ARNr 18s), usando 20 pmol por microlitro de los respectivos cebadores y 500 U (5 U/µl) de polimerasa taq recombinante (Introgen). Las reacciones de PCR se realizaron en un termociclador (Applied Biosystems). Los productos de la PCR se separaron mediante electroforesis en geles de agarosa al 2% y se visualizaron mediante tinción con sybr Green. De igual modo, los productos de la PCR se observaron en un transiluminador (T1202 Sigma), y las imágenes se capturaron con una cámara Kodak EDAS 290. Las bandas se analizaron mediante densitometría utilizando el Software Icy. Finalmente, la cantidad de cada producto de PCR se normalizó con

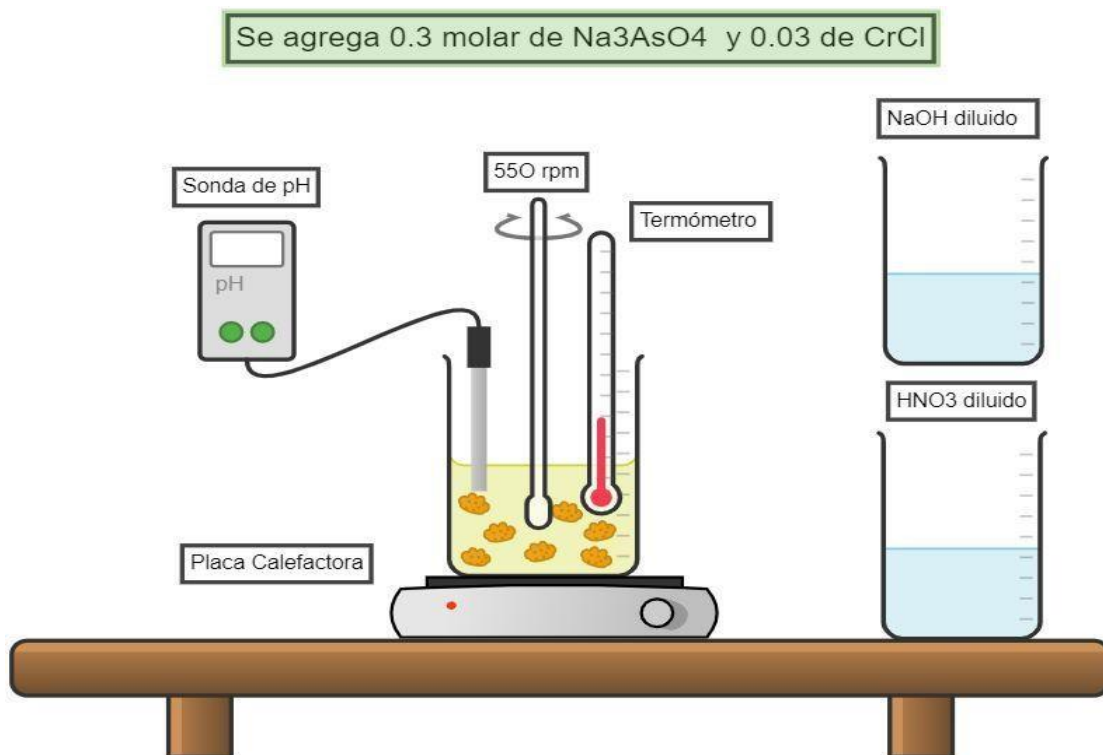
respecto al producto de ARN ribosomal 18s en cada muestra, además que el análisis se realizó por triplicado.

### **3.5. Experimentos de adsorción de As y Cr en la jarosita industrial**

La incorporación de arsénico y cromo en soluciones sólidas de jarositas sintéticas, es un hecho y se ha llevado a cabo en condiciones de síntesis a altas temperaturas y tiempos de reacción, así como con una activación térmica a 600 °C de la jarosita (Méndez, y otros, 2015; Picazo-Rodríguez, y otros, 2022). Recientemente, la incorporación de arsénico en la jarosita de potasio, se logró al descomponerla en medio alcalino (pH 10) y ponerla en contacto en soluciones que contenían iones de As (V) a temperatura ambiente (Cerecedo-Sáenz, y otros, 2022) y es así como se elige la metodología descrita en la referencia anterior, para llevar a cabo los experimentos de intercambio catiónico de arsénico y cromo en la jarosita industrial y evaluar su potencialidad para poder tratar aguas contaminadas con tales elementos.

El procedimiento experimental para llevar a cabo estos ensayos se muestra en la Figura 7. En primer lugar, la jarosita industrial se descompuso utilizando el procedimiento descrito anteriormente (Salinas, Cerecedo, Ramírez, Patiño, & Pérez, 2012). Para ello, 3 gramos de jarosita industrial fueron colocados en un volumen de 500 mililitros de agua destilada a 25 °C bajo condiciones de agitación mecánica fuertes ( $550 \text{ s}^{-1}$ ) en una solución 1.5 M de NaOH a un pH de 10.

La descomposición total se llevó a cabo en 1 hora, aproximadamente, y al final de este tiempo se añadió el arsénico como 0.03 M de  $\text{HAsNaO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (con una pureza del 98 %, Sigma Aldrich) y fue añadido a la misma solución donde se realizó la descomposición. Se dejó la solución en contacto con las partículas de jarosita descompuestas durante un periodo de 30 minutos y al final de este tiempo se añadieron varias gotas de ácido nítrico hasta lograr un pH de 1.1, para propiciar la re-cristalización y la estabilización de la jarosita con la incorporación del arsénico.



**Figura 7.** Arreglo experimental para la descomposición alcalina de la jarosita industrial y la incorporación de As, Cr y As/Cr.

La misma metodología fue utilizada para la adición del cromo, solo que en este caso el cromo fue adicionado como cloruro de cromo (0.03 M CrCl). Se evaluaron los mismos parámetros que en el caso de la adición de arsénico; temperatura de 25 °C, 3 gramos de jarosita, 550 s<sup>-1</sup> de agitación y 500 ml de solución. Finalmente, se llevó a cabo la incorporación simultánea de arsénico y cromo utilizando el mismo aparato experimental y con las condiciones siguientes: 3 gramos de jarosita industrial, 0.03 M de HAsNaO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 0.03 M de CrCl, 500 ml de agua destilada, 550 s<sup>-1</sup> de agitación y 25 °C de temperatura.

## Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se muestran los resultados encontrados en cuanto a la caracterización de la muestra de jarosita industrial, objeto del presente estudio. Esta muestra fue caracterizada mediante Difracción de Rayos - X, para conocer las especies que contiene, y poder describir durante su evaluación citotóxica y como material adsorbente, que efecto puede propiciar cada elemento o especie mineral.

De igual modo, se llevó a cabo la caracterización mediante Microscopía Electrónica de Barrido en conjunción con Espectrometría Dispersiva de Energías de Rayos - X, para poder visualizar los tamaños y morfologías de las partículas que constituyen la muestra. Así mismo, se llevaron a cabo análisis semi cuantitativos y puntuales sobre las muestras y mapeos para determinar composición química local, esto mediante EDS.

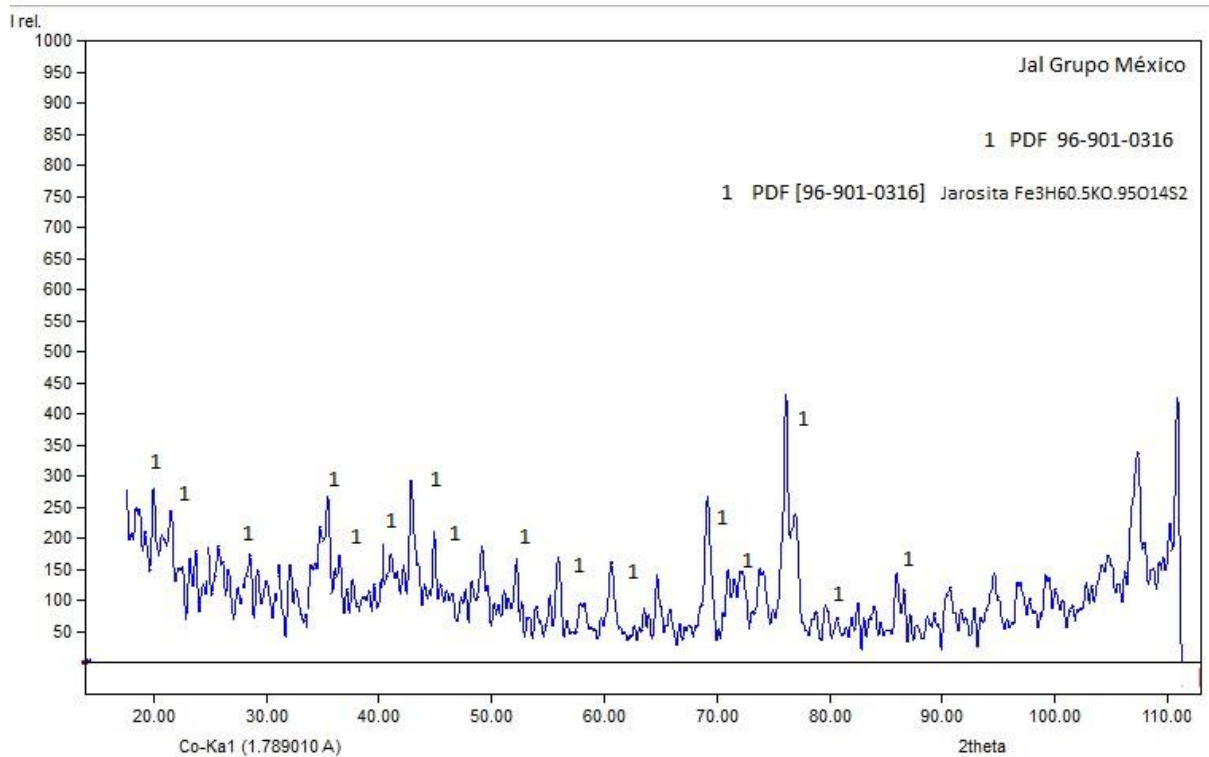
En segundo lugar, se mostrarán los resultados obtenidos después de realizar los diferentes ensayos citotóxicos, y con ello se podrá determinar si el material, que inicialmente es considerado un desecho industrial, pudiera tener aplicaciones como biomaterial en ingeniería tisular ósea, tal como la jarosita sintética lo mostró anteriormente (Serralde-Lealba, y otros, 2022).

Por último, se mostrarán los resultados obtenidos después de los experimentos de descomposición alcalina de la jarosita industrial y la subsecuente incorporación de arsénico, cromo y arsénico/cromo. Esto se constatará mediante DRX, MEB-EDS y XPS.



#### 4.1. Difracción de Rayos - X

De acuerdo a los resultados encontrados mediante DRX, la Figura 8 muestra el espectro de DRX obtenido de la muestra de jarosita industrial.



**Figura 8.** Espectro de DRX de la muestra de jarosita industrial.

En el espectro puede verse que principalmente está constituido por jarosita (J) y se logra apreciar a la fase correspondiente a la franklinita (F), la cual se formó durante la etapa de tostación de la esfalerita y que es un ferrito de zinc bastante estable. Con esto se puede concluir que la precipitación de las jarositas en la planta de zinc,

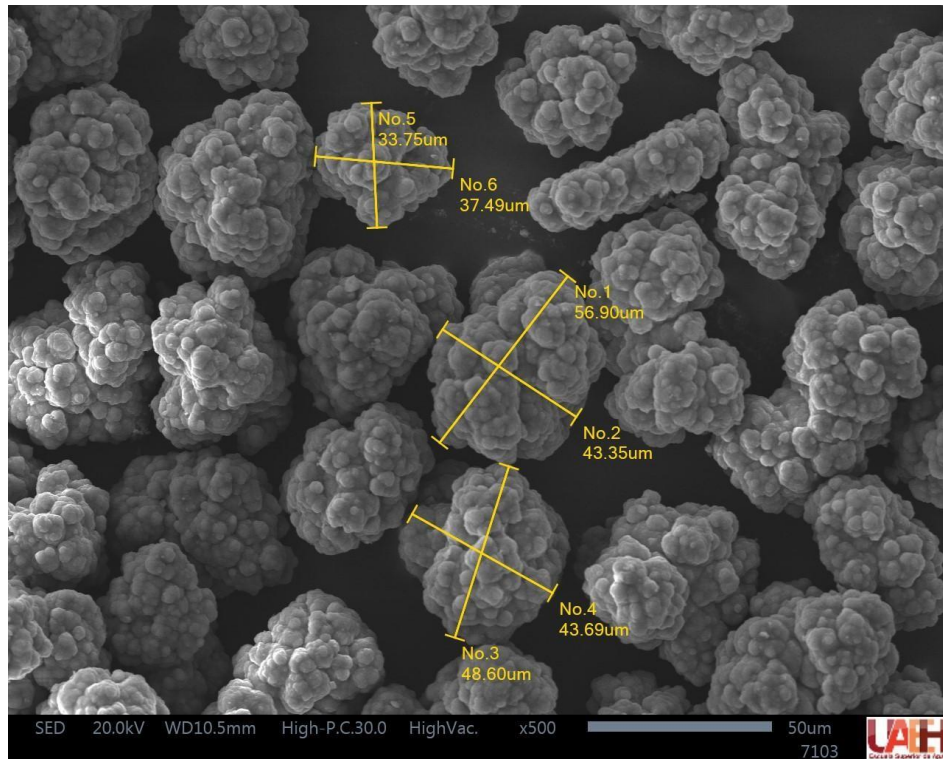
no ha variado significativamente, pues en trabajos anteriores se logró apreciar estas mismas especies minerales que constituyen este tipo de desecho industrial (Salinas, Roca, Cruells, Patiño, & Córdoba, 2001).

#### **4.2. Microscopía Electrónica de Barrido y Espectrometría Dispersiva de Energías de Rayos - X**

Como se ha publicado en diferentes trabajos, sobre los distintos compuestos jarosíticos sintéticos y aquellos precipitados en la industria del zinc (Salinas et al., 2001; Patiño et al., 2003; Salinas et al., 2012), la morfología de estos compuestos, generalmente consiste en cristales rombohedrales (de 1 a 2  $\mu\text{m}$ ) interconectados entre sí dentro de una estructura muy compacta, que forma partículas con tamaños que van de las 5 a la 75  $\mu\text{m}$ , aproximadamente.

La Figura 9, muestra las partículas que constituyen la jarosita industrial analizada mediante MEB con electrones secundarios (SE).

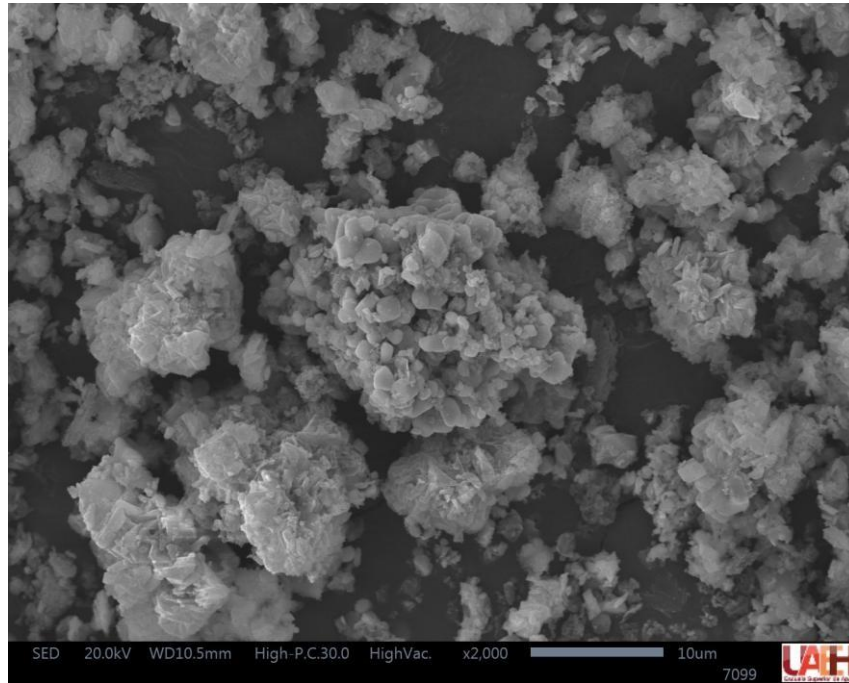
Se puede observar la uniformidad de las partículas, ya que estas fueron tamizadas para que la descomposición de las mismas fuera más uniforme. En este caso, se muestran tamaños de partícula promedio que varían de 33 a 56  $\mu\text{m}$ , aproximadamente y que están dentro de los parámetros encontrados en los trabajos antes mencionados.



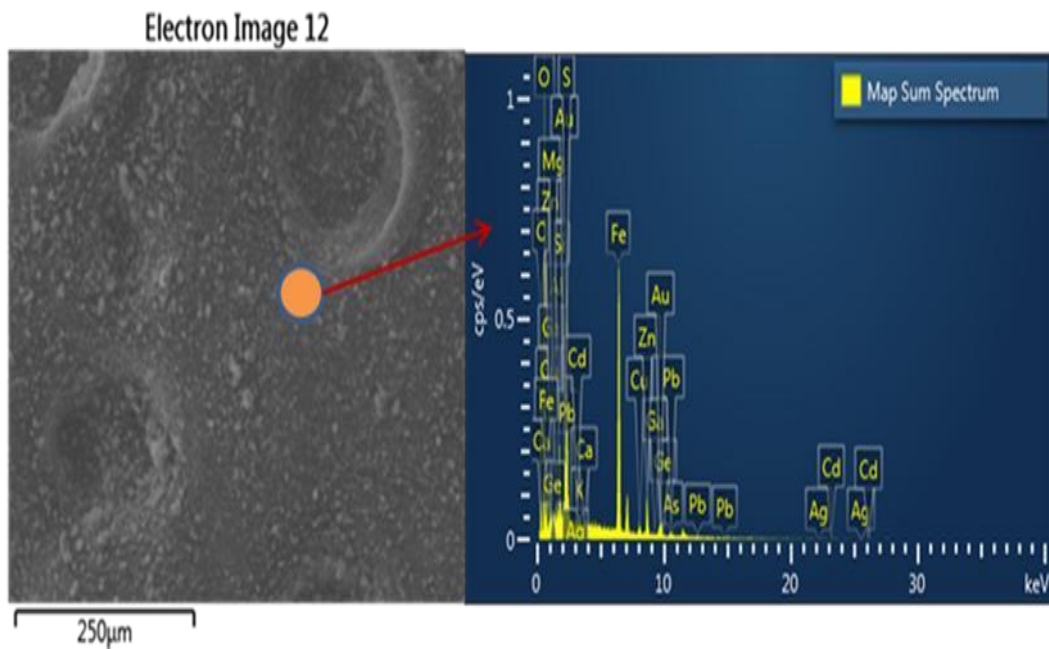
**Figura 9.** Distribución de partículas encontradas en la muestra de jarosita industrial (MEB - SE).

Por otro lado, la Figura 10 muestra a detalle los cristales de algunas partículas de jarosita industrial. Se pueden apreciar los cristales interconectados entre sí, tal como lo ha descrito la literatura. Se observa una distribución irregular de tamaños de partícula cuya morfología tiende a ser esférica conservando ciertas irregularidades.

Así mismo, se muestra en la Figura 11 el espectro EDS de una partícula de jarosita representativa, donde se pueden identificar los elementos característicos de la misma (Fe, S, K, O), así como contenidos de Cu, Zn, Pb, Cd, entre otros.



**Figura 10.** Detalle de partículas de jarosita industrial (MEB - SE) x 2000.

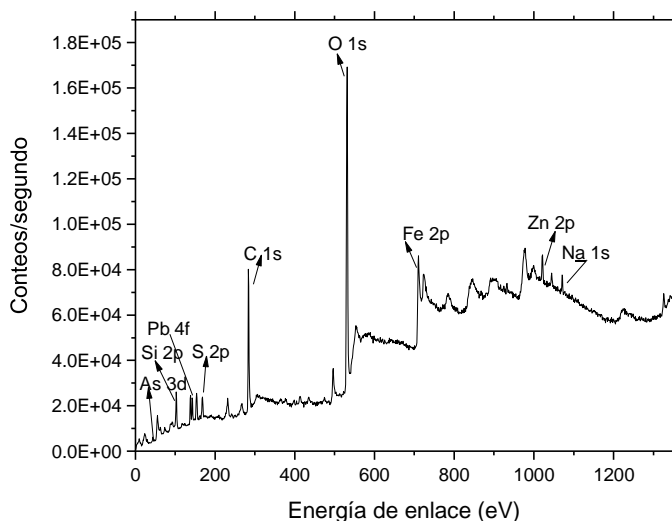


**Figura 11.** Espectro EDS y micrografía de las partículas de jarosita industrial.

### 4.3. Espectroscopia de Fotoelectrones emitidos por Rayos - X (XPS)

Para determinar la composición química y el estado electrónico de los elementos constitutivos de la muestra, se llevó a cabo un análisis de XPS, donde los resultados se muestran en la gráfica de la Figura 12.

Se puede observar que los elementos presentes corresponden a la jarosita y que esta puede ser una solución de amonio - sodio - hidronio - plumbo jarosita debido a los contenidos de Na y Pb encontrados. También se puede confirmar la existencia de la franklinita, debido a la presencia de zinc en la muestra. Y cabe destacar la presencia de arsénico en la misma, pero que no interferirá en la etapa de incorporación del mismo, ya que está será descompuesta y el arsénico que contiene se ira a la solución por la propia descomposición, tal como lo han señalado en trabajo anteriores (Méndez, y otros, 2015).

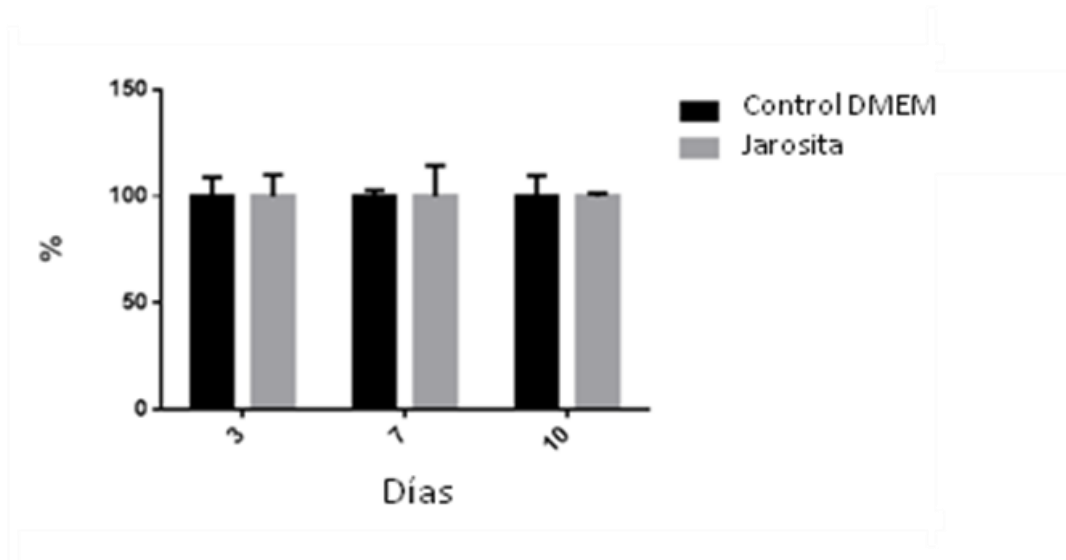


**Figura 12.** Espectro XPS de la muestra de jarosita industrial.

#### 4.4. Ensayos Citotóxicos

Con base en los ensayos citotóxicos realizados a la jarosita industrial (residuo), la Figura 13 muestra los resultados de citotoxicidad de las células cultivadas y puestas en contacto con las partículas de jarosita industrial, en función del tiempo tanto para los grupos de control, como el grupo que contiene a la jarosita industrial.

Se puede observar una alta absorbancia desde el día 3 y que continúa uniformemente durante los subsecuentes días, permaneciendo constante el día 7 y hasta el día 10.



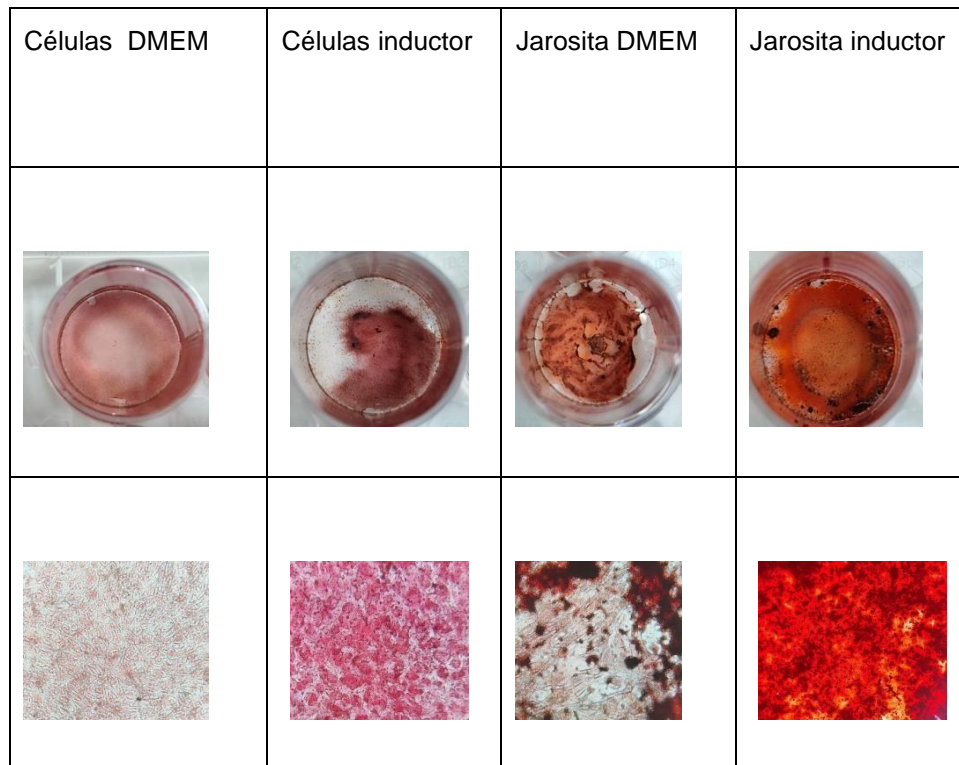
**Figura 13.** Ensayo citotóxico MTT de las células dentales sembradas con la jarosita industrial (4000 células/pozo), después de 3, 7 y 10 días. Los resultados están expresados como la desviación media y estándar de la viabilidad de las células.

Desde el día 3, y hasta el día 10, se puede apreciar una muy alta unidad de absorbancia con respecto al tiempo, tanto en el grupo de control como en el grupo donde se sembró la jarosita industrial. Estos resultados son muy sorprendentes, ya que son mejores que aquellos encontrados con jarositas de potasio sintéticas (Serralde-Lealba, y otros, 2022), donde la máxima absorbancia fue la obtenida con la jarosita dopada con calcio, estroncio y magnesio, donde se logró una máxima absorbancia del 23.63 % +/- 1.27 %.

Para este caso, usando jarosita industrial, la cual es un desecho que es además considerado tóxico para el medioambiente y la salud humana, los resultados son excelentes, ya que muestran una viabilidad celular del 98.46 % +/-16.81 % en comparación con el grupo de control, y esto a solo 3 días de exposición. Para el día 7, los resultados obtenidos indicaron que la viabilidad celular en el grupo de la jarosita industrial, fue del 92.4 % +/- 12.66 %. Por último, en el día 10, los resultados indicaron que la viabilidad celular del grupo de la jarosita industrial fue del 91.50 % +/- 8.36 %. Estos resultados estadísticos, no mostraron diferencias estadísticamente significativas.

Por otro lado, la tinción de rojo de Alizarina (ARS), se usa como un indicador para definir la diferenciación osteogénica (Rosales-Ibáñez, y otros, 2021). Después de sembrar las células dentales en una placa de 24 pozos, se depositó la jarosita industrial. La Figura 14 muestra los depósitos de calcio que pueden ser observados en las células sembradas con la jarosita industrial + DMEM suplementada con 10 % de suero de bovino fetal (FBS) y 1 % de penicilina estreptomina. Se pueden

observar muchas evidencias del depósito de calcio en las células sembradas con la jarosita industrial, lo cual es muy evidente de que este tipo de residuo (jarosita industrial), posee características adecuadas como posible biomaterial, corroborando los resultados mostrados con anterioridad.



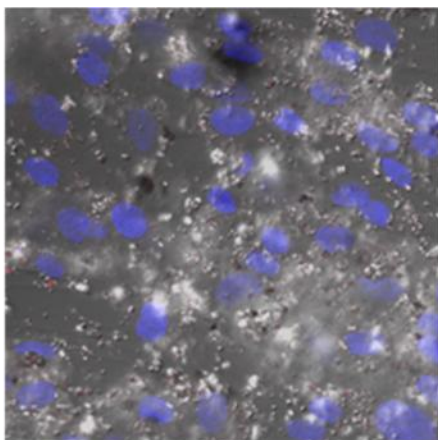
**Figura 14.** Imágenes representativas del depósito de la jarosita industrial sobre las células dentales en el día 21 mediante ARS, con sus respectivas micrografías.

Para el caso de los ensayos de inducción diferenciada, más allá de la interacción directa entre las células y los posibles biomateriales, estos pueden también modular el crecimiento del factor de segregación por parte de las células, lo cual puede actuar de forma directa sobre las células vecinas de forma paracrina.

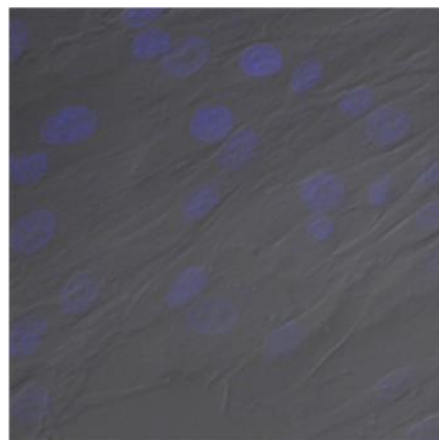


De forma fisiológica, en ingeniería tisular los andamios que se utilizan se componen de combinaciones de moléculas. De acuerdo con estudios previos (Serralde-Lealba, y otros, 2022), la jarosita, siendo un sulfato básico hidratado con hierro, propicia el desarrollo de moléculas que pueden contribuir con un microambiente adecuado que logra inducir la osteogénesis y así potenciar la regeneración ósea. Para el caso de la jarosita industrial, parece ser que su comportamiento puede ser mejor como biomaterial, principalmente por estos sulfatos que contiene, el hierro y elementos involucrados, que, al estar molecularmente diferenciados y constituidos, le proporcionan estas características únicas.

La Figura 15 muestra los resultados de PCR más representativos al respecto. Se observa que al principio las células no estaban inducidas, y al sembrar la jarosita industrial después de 24 horas, se fijaron al día siguiente.



Células con jarosita, sin inducción  
Runx2  
Campo claro

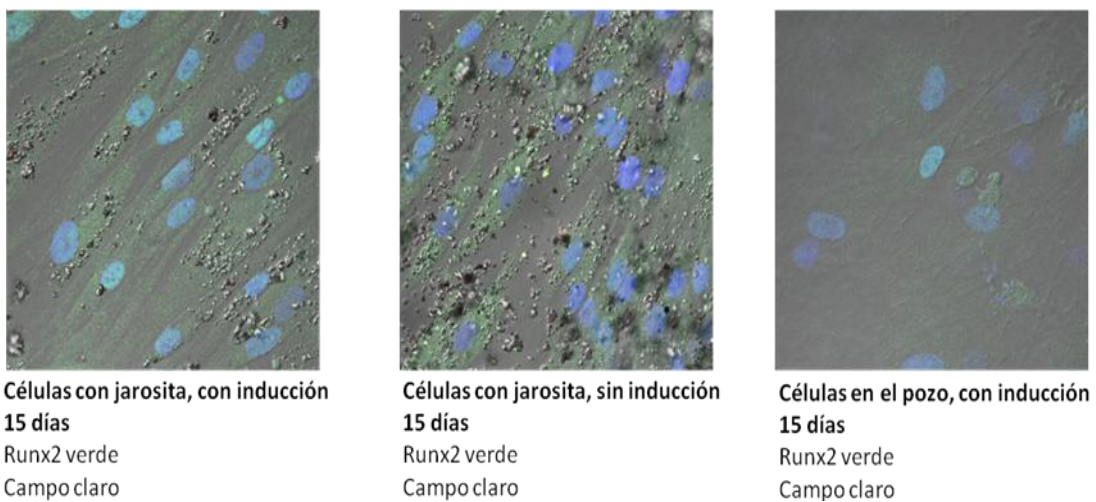


Células control en pozo, sin inducción  
Runx2  
Campo claro

**Figura 15.** Resultados iniciales de PCR con células y jarosita industrial.

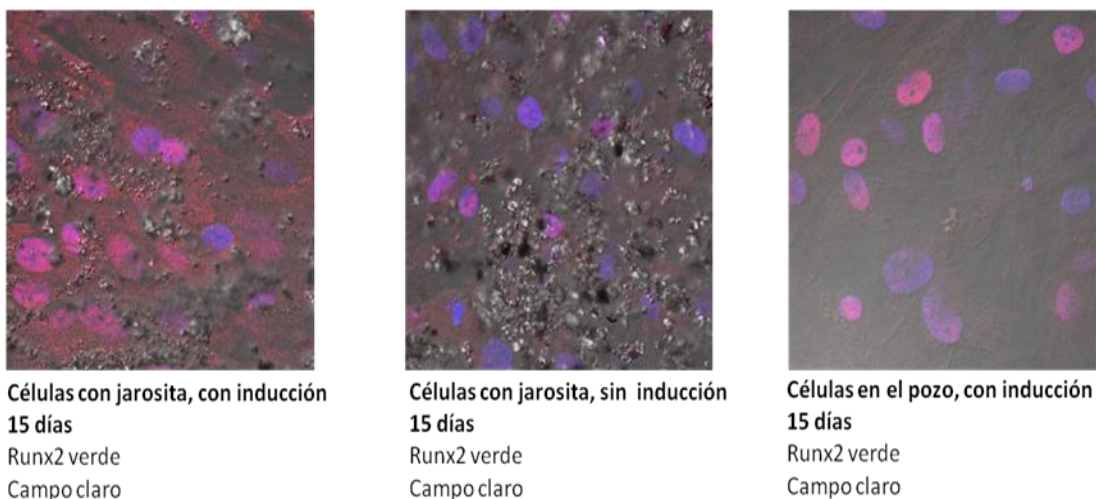
La Figura 16 muestra los resultados encontrados al inducir las células durante 15 días, mostrando igualmente favorables resultados.

Esto confirma una vez más las propiedades osteogénicas del material (Javed & Romanos, 2010), que está siendo analizado y que en este caso es un desecho industrial considerado tóxico para el medio ambiente y la salud pública.



**Figura 16.** Resultados de PCR con células inducidas durante 15 días.

Por otro lado, la Figura 17, muestra los resultados de PCR obtenidos después de que las células fueron inducidas durante 21 días. Igualmente, se observan resultados muy positivos.



**Figura 17.** Resultados de PCR con células inducidas durante 21 días.

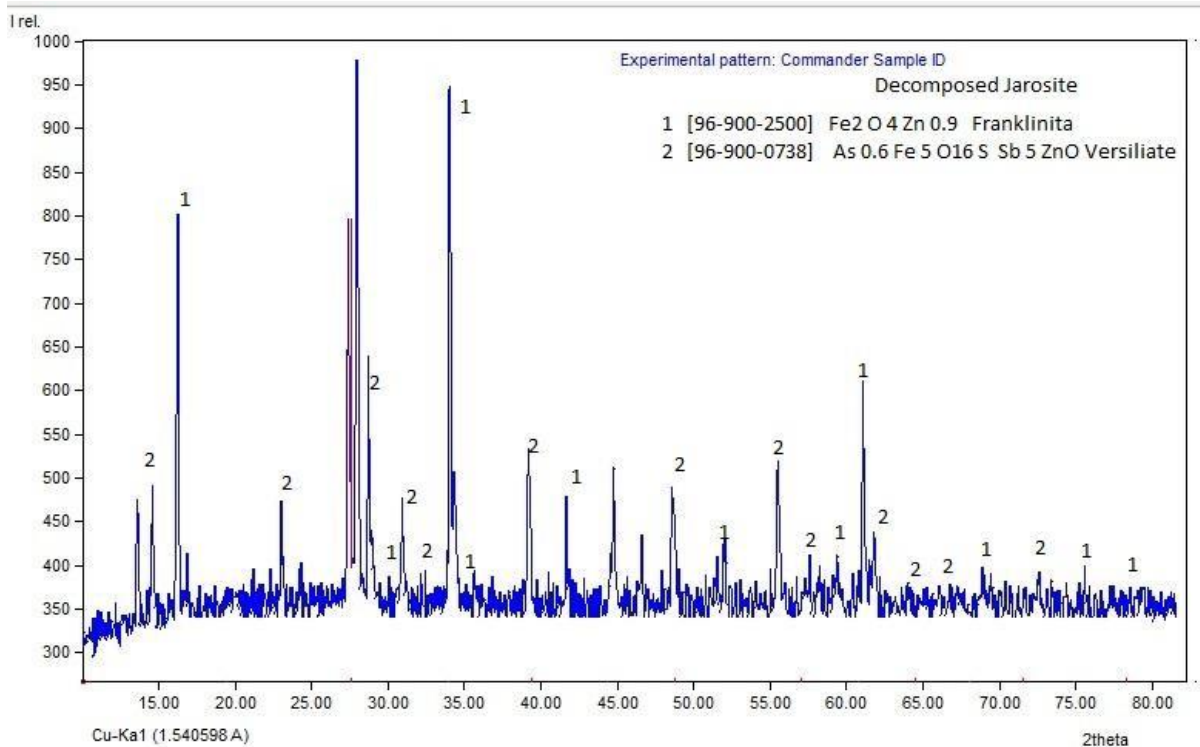
#### 4.5. Ensayos de Adsorción de Metales Tóxicos (As, Cr y As/Cr)

Como se mencionó en el capítulo 3, la muestra de jarosita industrial fue sometida a un proceso combinado de descomposición alcalina a un pH de 10 y la subsecuente incorporación de arsénico, en primera instancia. De igual modo, el proceso se repitió bajo condiciones similares para lograr la incorporación de cromo en la estructura de la jarosita descompuesta.

Para el caso del arsénico, este fue incorporado en la solución como arseniato de sodio, mientras que el cromo fue disuelto como cloruro de cromo. En los tres casos, incorporación de As, de Cr y de As/Cr, una vez concluidas las etapas de descomposición alcalina y la incorporación de los metales, el pH de la solución se llevó a 1.1, para favorecer la re-cristalización de las partículas de jarosita y estabilizar, dentro de su estructura a dichos elementos.

Los polvos resultantes, fueron caracterizados mediante DRX, MEB-EDS y XPS para verificar la incorporación de dichos metales y también poder cuantificar, de manera semi - cuantitativa y preliminar los contenidos de As y Cr adsorbidos por la estructura descompuesta de la jarosita industrial.

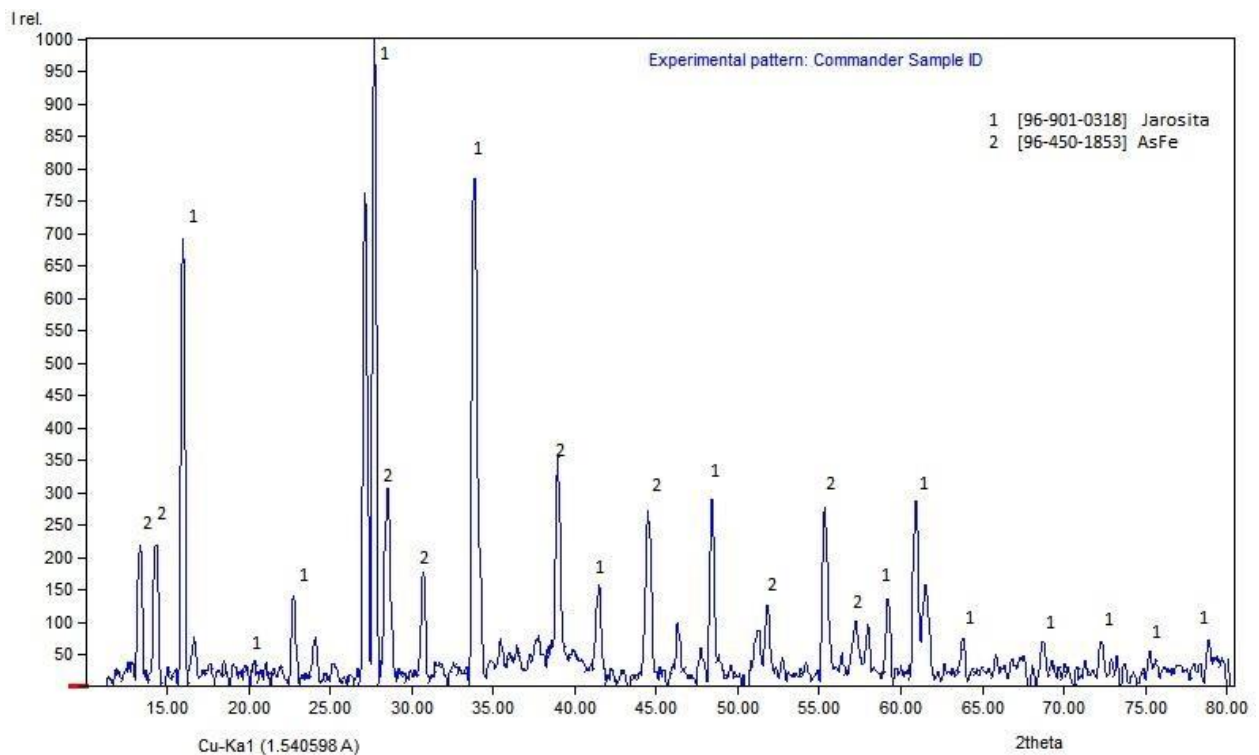
#### 4.5.1. Difracción de Rayos X



**FIGURA 18.** Espectro DRX de la Jarosita industrial descompuesta en medio alcalino.

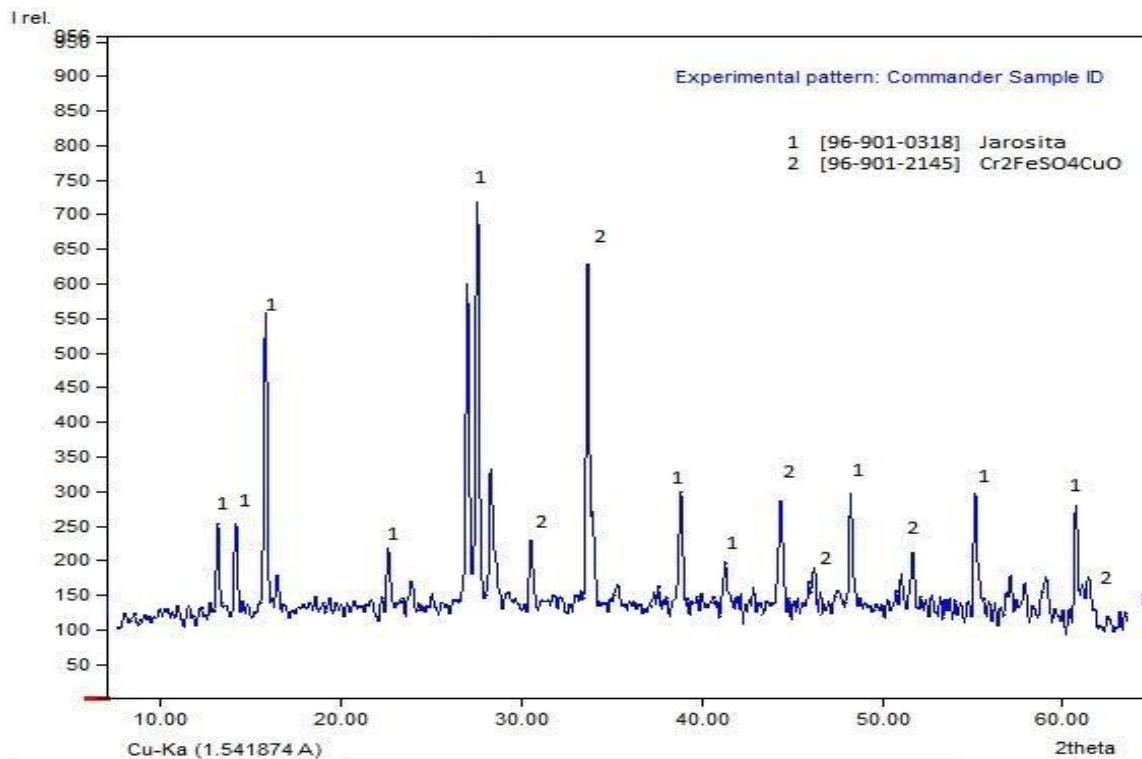
La Figura 18, muestra el espectro de DRX de la jarosita, su estructura descompuesta y la muestra resultante después de la etapa de adsorción de As. Se aprecia la

presencia de Franklinita que fue el resultado de la etapa de calcinación de la esfalerita y la ausencia de la estructura inicial de la jarosita, debido a la etapa de descomposición en medio NaOH, donde dicha estructura se destruye y queda un hidróxido de hierro, el cual es vital para la etapa de adsorción tanto de As como de Cr.



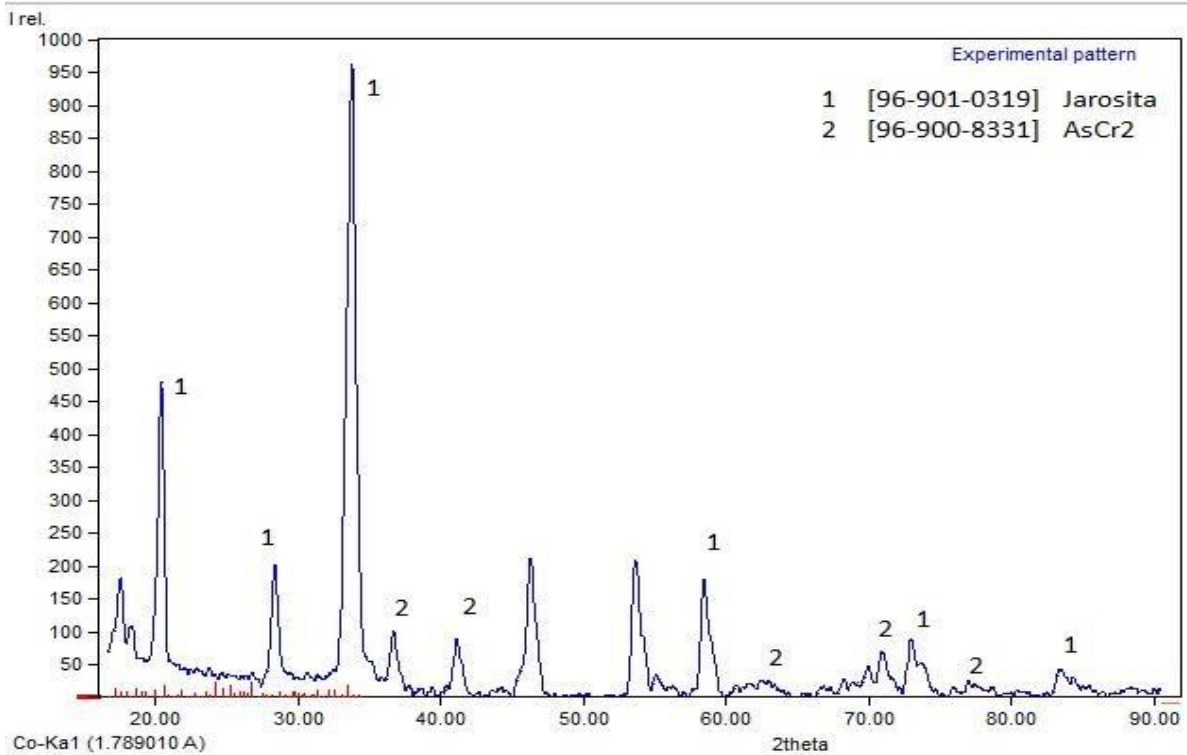
**FIGURA 19.** Espectro DRX de la Jarosita industrial descompuesta y As incorporado.

La Figura 19, muestra el espectro de DRX de la jarosita, resultante después de la etapa de adsorción de As. Es el resultado de la jarosita industrial después de haber sido descompuesta, con la adición de arsénico y re-cristalizada. Tal como ocurrió con la jarosita sintética.



**FIGURA 20.** Espectro DRX de la Jarosita industrial descompuesta y Cr incorporado.

La Figura 20, muestra el espectro de DRX de la jarosita, su estructura descompuesta y la muestra resultante después de la etapa de adsorción de Cr. Es el resultado de la jarosita industrial después de haber sido descompuesta, con la adición de cromo, y re-cristalizada.



**Figura 21.** Espectro DRX de la jarosita industrial descompuesta y con la incorporación tanto de arsénico como de cromo.

La Figura 2, muestra el espectro de DRX de la jarosita, su estructura descompuesta y la muestra resultante después de la etapa de adsorción de As y Cr, simultáneamente. Es el resultado de la jarosita industrial después de haber sido descompuesta, con la adición de arsénico/cromo, y re-cristalizada.

#### **4.5.2. Microscopía Electrónica de Barrido en Conjunción con Espectrometría**

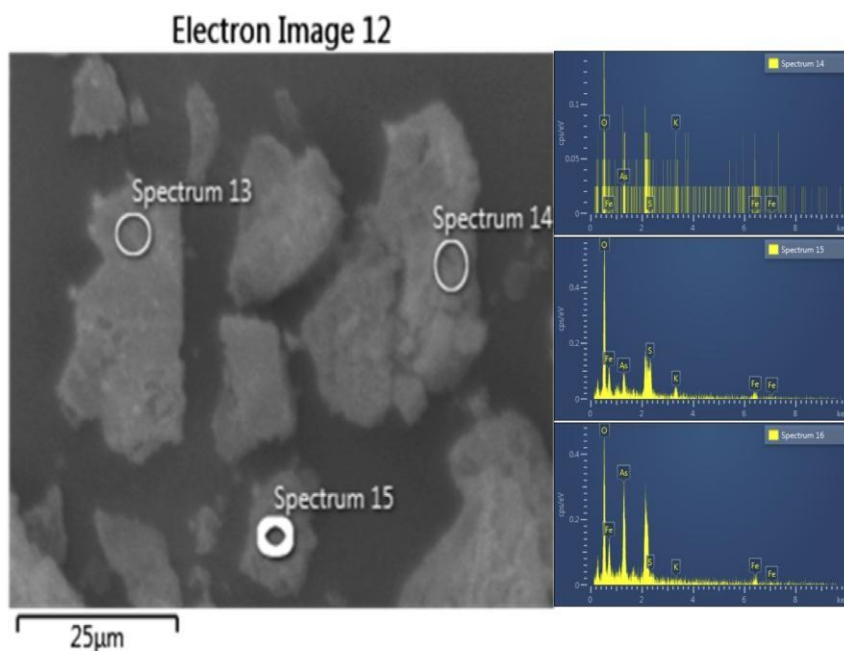
##### **Dispersiva de Energías de Rayos - X**

La determinación preliminar y semi-cuantitativa de la adsorción tanto de As, Cr y As/Cr, fue determinada mediante MEB - EDS en diversos análisis puntuales. A continuación, se muestran algunos de los resultados más representativos que demuestran la incorporación de dichos elementos en la estructura de la jarosita industrial descompuesta.

La Figura 22, muestra la imagen de varias partículas de jarosita descompuesta y después de la incorporación de As. Se llevaron a cabo en la partícula mostrada, 3 análisis puntuales por EDS, donde aparecen los picos del As, demostrando la incorporación de dicho elemento en la estructura de la jarosita. De igual modo la Tabla 3 muestra los datos encontrados y el promedio de As incorporado, el cual para este caso fue del 18.84 %.

Por otro lado, la Figura 23 y la tabla 4, muestran otras partículas de jarosita industrial descompuesta y con la incorporación de arsénico. En este otro caso, el promedio de incorporación de arsénico fue del 16.55 %. Para este análisis semi-cuantitativo y puntal muestra un estimado de As que va del 16.6 al 18.8 %, lo cual deberá ser confirmado más adecuadamente mediante XPS, donde se tiene un factor de certeza del 93 %.

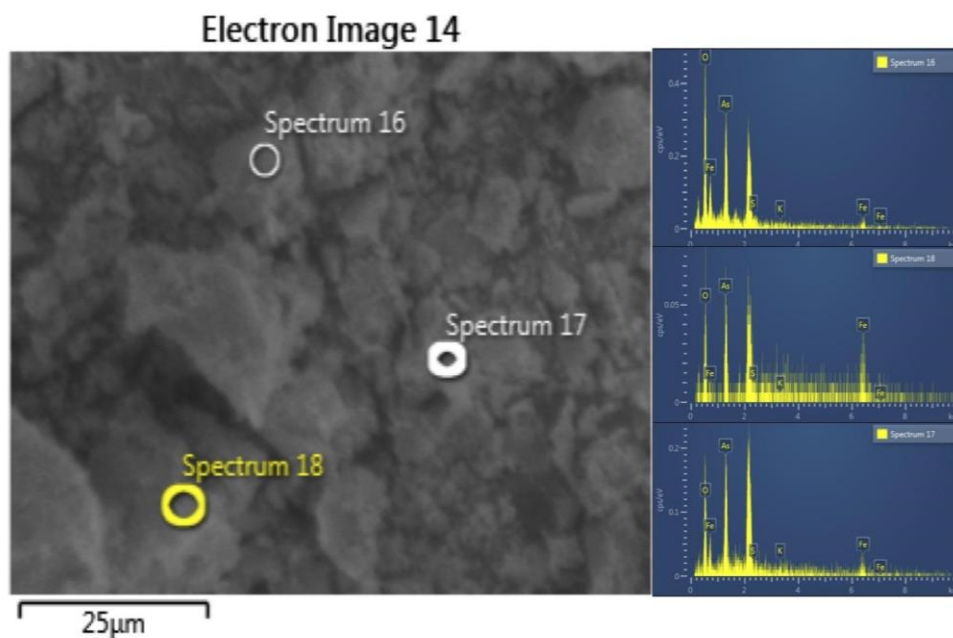




**Figura 22.** Imagen de SEM (SE), que muestra 3 espectros de EDS obtenidos en partículas de jarosita industrial descompuesta y con incorporación de As.

**Tabla 3.** Composición promedio obtenida de los espectros EDS mostrados en la figura anterior (contenido de As, 18.84 %).

Elemento	Espectro 13	Espectro 14	Espectro 15	Promedio
	(% en peso)			
O	16.20	37.96	33.43	29.19
S	3.31	9.89	5.30	6.17
K	6.59	6.32	6.52	6.47
Fe	58.31	37.06	34.41	43.26
As	15.59	8.77	32.16	18.84



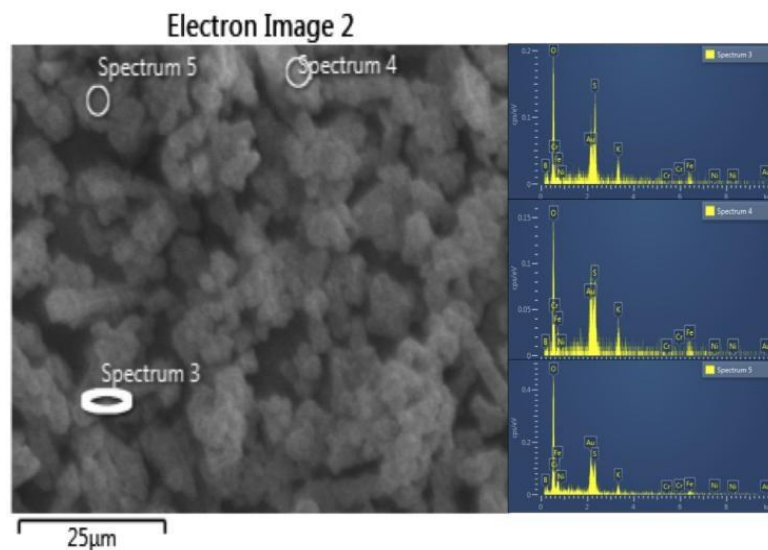
**Figura 23.** Imagen de SEM (SE), que muestra 3 espectros de EDS obtenidos en partículas de jarosita industrial descompuesta y con incorporación de As.

**Tabla 4.** Composición promedio obtenida de los espectros EDS mostrados en la figura anterior (contenido de As, 16.55 %).

Elemento	Espectro 16	Espectro 17	Espectro 18	Promedio
	(% en peso)			
O	21.57	8.39	54.70	28.22
S	0.21	0.26	14.26	4.91
K	5.70	5.34	7.03	6.02
Fe	45.05	74.82	21.36	47.07
As	30.47	16.53	2.66	16.55

La Figura 24, muestra la imagen de varias partículas de jarosita descompuesta y después de la incorporación de Cr. Se llevaron a cabo en la partícula mostrada, 3 análisis puntuales por EDS, donde aparecen los picos del Cr, demostrando la incorporación de dicho elemento en la estructura de la jarosita. De igual modo la Tabla 5 muestra los datos encontrados y el promedio de As incorporado, el cual para este caso fue del 1.15 %.

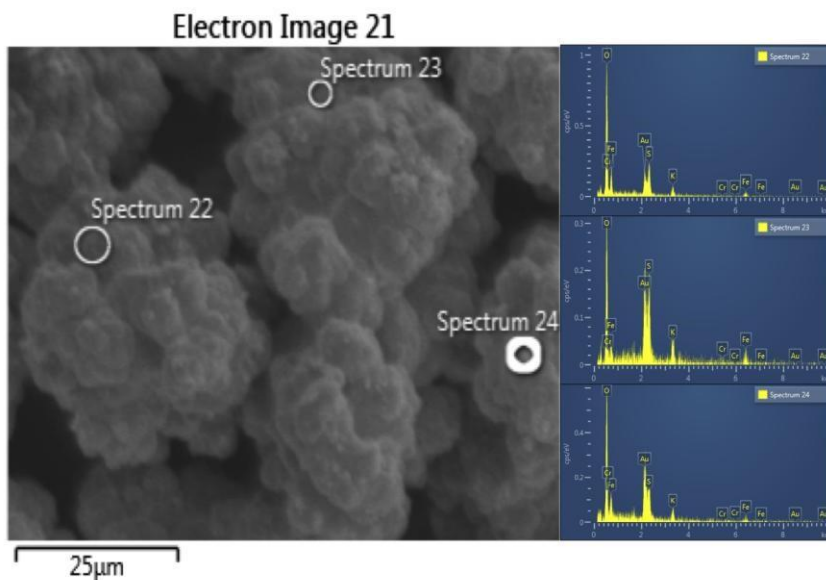
Por otro lado, la Figura 25 y la tabla 6, muestran otras partículas de jarosita industrial descompuesta y con la incorporación de cromo. En este otro caso, el promedio de incorporación de arsénico fue del 1.72 %. Para este análisis semi-cuantitativo y puntal muestra un estimado de Cr que va del 1.15 al 1.72 %, lo cual deberá ser confirmado más adecuadamente mediante XPS, donde se tiene un factor de certeza del 93 %.



**Figura 24.** Imagen de SEM (SE), que muestra 3 espectros de EDS obtenidos en partículas de jarosita industrial descompuesta y con incorporación de Cr.

**Tabla 5.** Composición promedio obtenida de los espectros EDS mostrados en la figura anterior (contenido de Cr, 1.15 %).

Elemento	Espectro 3	Espectro 4	Espectro 5	Promedio
	(% en peso)			
B	49.25	55.53	41.63	48.80
O	19.31	15.95	31.80	22.35
S	9.04	7.63	7.41	8.03
K	5.02	4.69	0.70	3.47
Cr	1.21	1.02	1.23	1.15
Fe	16.17	16.20	14.76	15.71



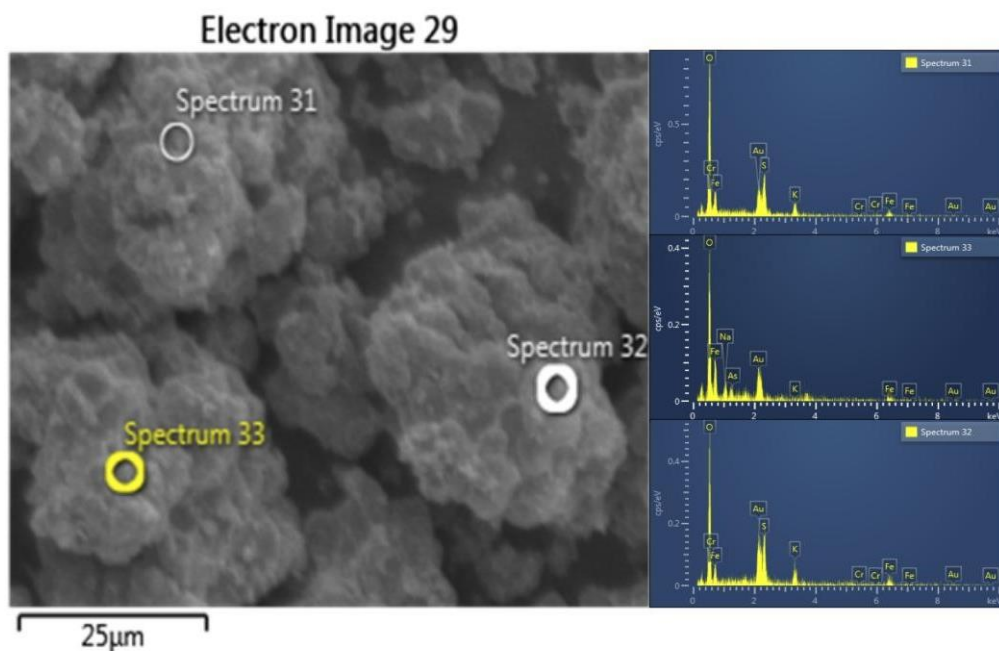
**Figura 25.** Imagen de SEM (SE), que muestra 3 espectros de EDS obtenidos en partículas de jarosita industrial descompuesta y con incorporación de Cr.

**Tabla 6.** Composición promedio obtenida de los espectros EDS mostrados en la figura anterior (contenido de Cr, 1.72 %).

Elemento	Espectro 22	Espectro 23	Espectro 24	Promedio
	(% en peso)			
O	28.96	47.09	49.94	41.99
S	17.07	16.06	15.44	16.19
K	9.67	8.58	7.87	8.70
Cr	1.89	1.96	1.32	1.72
Fe	42.41	26.29	26.75	31.81

La Figura 26, muestra la imagen de varias partículas de jarosita descompuesta y después de la incorporación de As y Cr, simultáneamente. Se llevaron a cabo en la partícula mostrada, 3 análisis puntuales por EDS, donde aparecen los picos del As y del Cr, demostrando la incorporación de dichos elementos en la estructura de la jarosita. De igual modo la Tabla 7 muestra los datos encontrados y el promedio de As y Cr incorporados, el cual para este caso fue del 15.56 % de As y 1.13 % de Cr.

Con ello, queda demostrado que ambos elementos pueden incorporarse en la estructura de la jarosita industrial descompuesta, bajo las condiciones experimentales mencionadas en este trabajo.



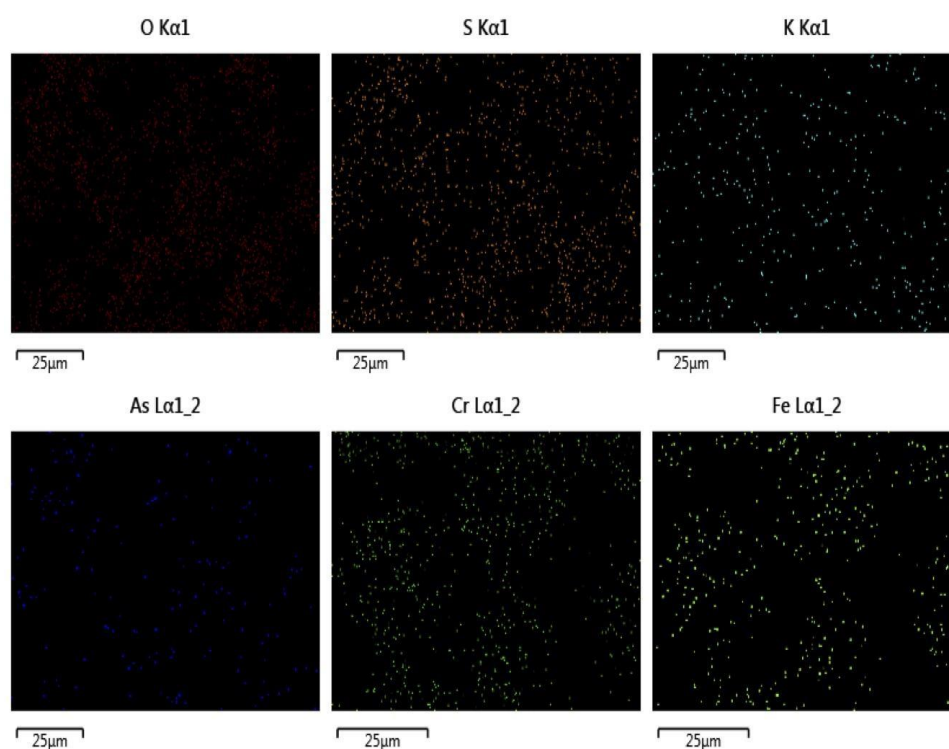
**Figura 26.** Imagen de SEM (SE), que muestra 3 espectros de EDS obtenidos en partículas de jarosita industrial con la incorporación tanto de As, como de Cr.

**Tabla 7.** Composición promedio obtenida de los espectros EDS mostrados en la figura anterior (contenido de As del 15.56 % y Cr del 1.13 %).

Elemento	Espectro 31	Espectro 32	Espectro 33	Promedio
	(% en peso)			
O	47.29	37.97	28.86	38.04
S	13.11	15.80	16.22	15.04
K	8.21	8.68	9.31	8.73
As	13.86	16.43	16.38	15.56

Cr	0.46	1.05	1.87	1.13
Fe	30.94	37.55	43.74	37.41

Finalmente, la Figura 27 muestra el mapeo por rayos X, realizado en las partículas mostradas en la Figura 26, y en donde se aprecia la presencia de los elementos señalados en la tabla 7. Con ello, se comprueba que efectivamente, tanto el As, como el Cr se logran incorporar en la estructura de la jarosita industrial descompuesta.

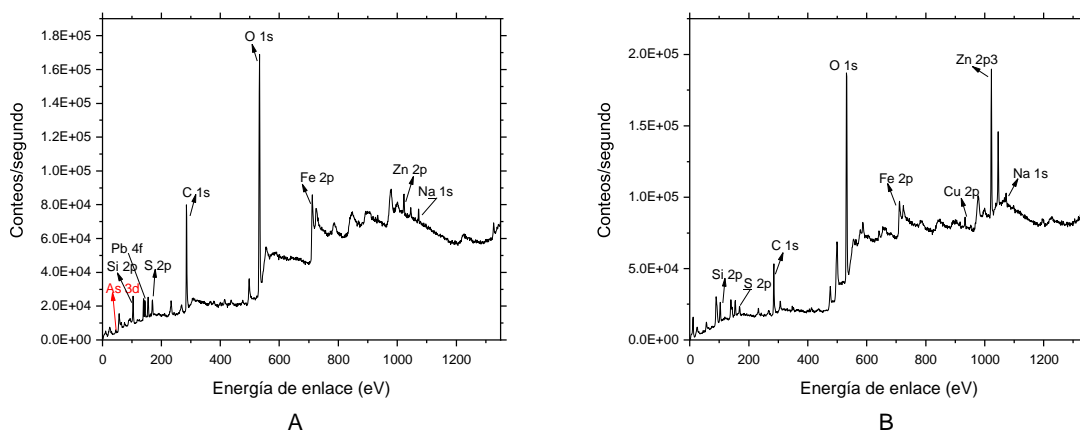


**Figura 27.** Mapeos de Rayos - X realizados mediante SEM, que muestran la presencia tanto de As, como de Cr.

### 4.5.3. Espectroscopia de Fotoelectrones emitidos por Rayos – X

En la figura 28, se muestran los resultados del análisis de espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos - X. El espectro de la izquierda (A) corresponde a la jarosita industrial con arsénico, la presencia de hierro, zinc, azufre y sodio son propios de la naturaleza de la jarosita y su origen; se detectan además sílice, plomo y carbón.

El espectro de la derecha (B) corresponde a la jarosita industrial descompuesta sin la presencia de arsénico, la presencia de hierro, zinc, azufre y sodio son propios de la naturaleza de la jarosita y su origen; se detectan además sílice, cobre y carbón.

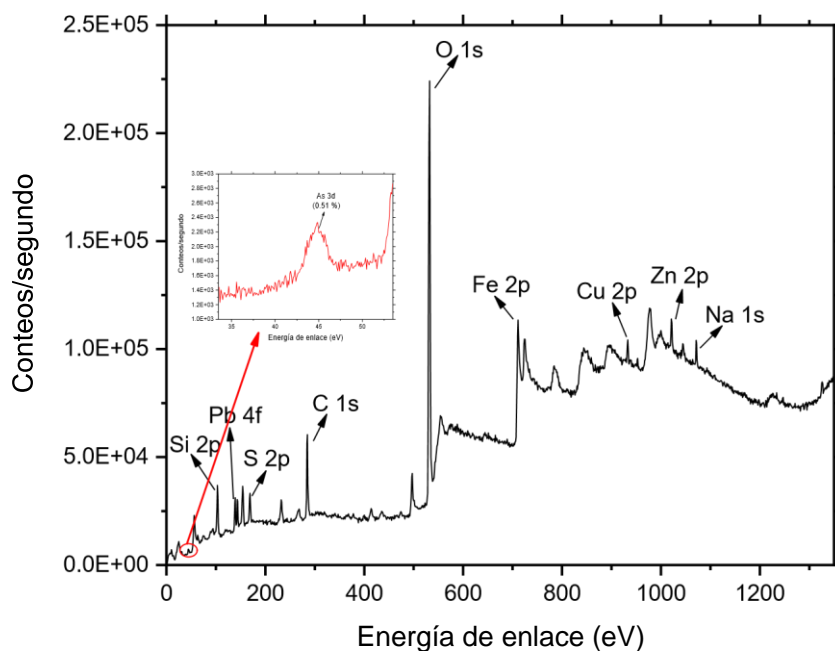


**Figura 28.** Espectros XPS de la jarosita industrial con As (A) y la jarosita industrial ya descompuesta sin As (B).

En la figura 29 se muestra el espectro de jarosita industrial descompuesta y recristalizada. Los elementos presentes en la muestra son sodio, zinc, cobre, hierro, plomo, azufre, entre otros. Se muestra un acercamiento de una parte del espectro

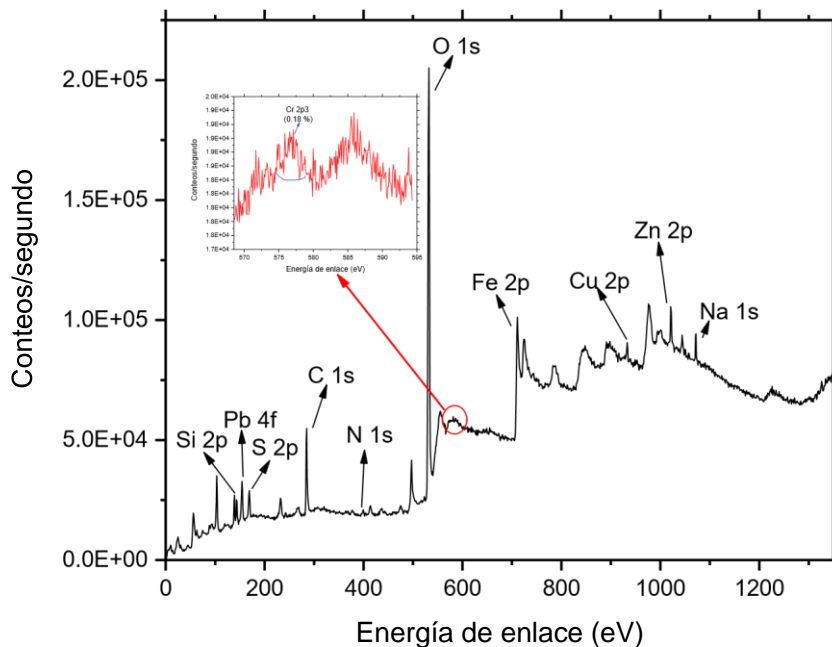


(en color rojo), en este se observa un contenido de arsénico del 0.51%, mismo que se incorporó en la muestra tras ser descompuesta.



**Figura 29.** Espectro XPS de la jarosita industrial descompuesta y re-cristalizada, con la incorporación de arsénico.

En la figura 30 se muestra el espectro de jarosita industrial descompuesta y re-cristalizada. Los elementos presentes en la muestra son sodio, zinc, cobre, hierro, plomo, azufre, entre otros. Se muestra un acercamiento de una parte del espectro (en color rojo), en este se observa un contenido de cromo del 0.18% mismo que se incorporó en la muestra tras ser descompuesta.

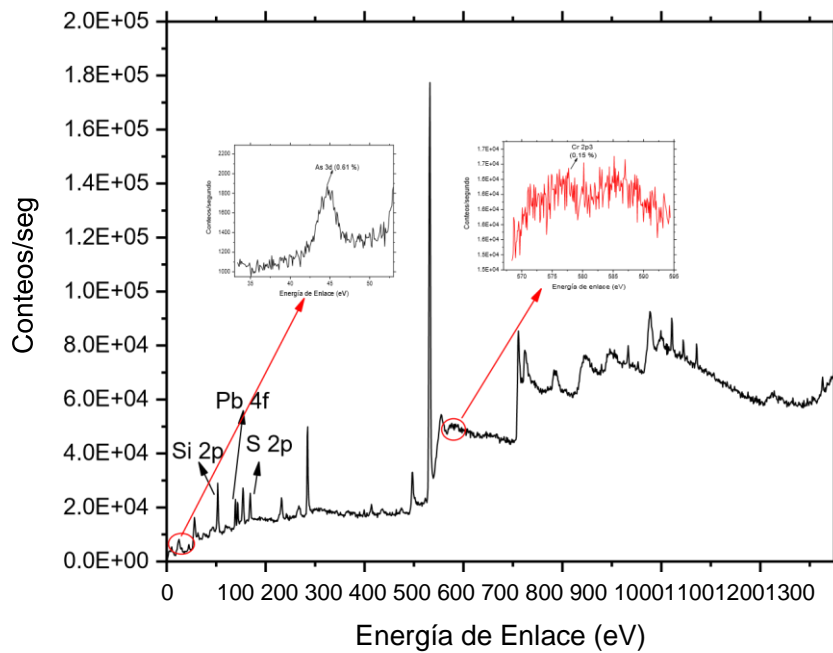


**Figura 30.** Espectro XPS de la jarosita industrial descompuesta y re-cristalizada, con la incorporación de cromo.

Hay trabajos que han logrado la remoción de Cr (VI) utilizando jarositas tanto a temperatura ambiente como activándola a una temperatura de 600 °C (Picazo Rodríguez, y otros, 2022).

En la figura 31 se muestra el espectro de jarosita industrial descompuesta y recristalizada tras incorporar a su estructura arsénico y cromo. Se realizó un acercamiento al espectro para mostrar de mejor manera los resultados. En el espectro de la izquierda (en color negro) corresponde al arsénico, con un valor de

0.61%. Mientras que el espectro de la derecha (en color rojo) muestra que el cromo se incorporó a la muestra en un 0.15%.



**Figura 31.** Espectro XPS de la jarosita industrial descompuesta y re-cristalizada, con la incorporación conjunta de arsénico y cromo.

## Capítulo 5. Discusión

La síntesis de los compuestos jarosínicos en sus diferentes composiciones se ha llevado a cabo bajo condiciones específicas de temperatura, presión, tiempo y pH. Las características morfológicas y de tamaño de partícula que obtienen las jarositas al sintetizarse bajo parámetros especiales han hecho que sean consideradas para utilizarse en remediación ambiental, principalmente en la adsorción de aguas contaminadas por metaloides, el cual es un problema grave presente en diversas regiones del planeta y que requiere soluciones prontas y eficaces.

Flores, y otros, (2022) estudiaron la síntesis de jarosita de amonio y sodio y su capacidad para adsorber arsénico. Los parámetros de su procedimiento fueron, temperatura de 94°C, pH de 1.2-1.8 y 24 horas de tiempo de reacción. Sus resultados obtenidos fueron polvos jarosínicos con tamaños de 10 a 50 micrómetros con una adsorción de  $\text{AsO}_4^{3-}$  del 3.19W% porcentaje en peso.

Cerecedo et. al., (2022) utiliza una metodología ya descrita por otros autores, sin embargo, en este experimento la síntesis de jarosita de potasio se realizó a temperatura ambiente, en un pH 10. Además, esta jarosita al ser descompuesta y a los 100 minutos de reacción logró absorber en su estructura un 4.19% de As (V).

López-Martínez et. al., (2023), realizaron un estudio acerca de la capacidad de la jarosita de sodio para absorber contaminantes en agua (As y Pb principalmente), los resultados muestran que este material tiene la capacidad de remover 97% (porcentaje en peso) de As (V) en un pH de 5-7 y en presencia de otras sustancias

como  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{NO}_3^-$ . Por esto, la jarosita de sodio sintética se propone como una gran alternativa para tratar aguas contaminadas, sin embargo, la metodología necesaria para lograrlo implica la utilización de temperaturas altas y un equipo de microondas para sintetizar la jarosita de sodio que, si bien sí reduce el tiempo de reacción, sigue necesitando una temperatura de  $150^\circ\text{C}$  para funcionar.

En este trabajo la adsorción de metaloides por jarositas presenta ventajas e innovaciones, la más importante es que se trabaja con jarosita residual, considerada un desecho peligroso. Al utilizarse como remediador ambiental no solo estaremos liberando al ambiente y a la población de la presencia de este residuo, sino que le estamos dando un valor agregado al utilizarlo para limpiar aguas contaminadas. Además, la metodología para lograr esto requiere de una menor inversión, pues la jarosita residual no se somete a altas temperaturas (demandando menor energía), sino que se trabaja con ella a temperatura ambiente.

El segundo uso propuesto en este trabajo está relacionado a la ingeniería tisular. La jarosita residual se propone como un material que junto con otros polímeros puede ser utilizado para elaborar compuestos que promueven la regeneración ósea.

De esta manera la jarosita residual se convierte de un residuo que genera problemas de salud pública a un material que promueve la salud y el bienestar de la población.

Serralde-Lealba et. al., (2022), presentaron un trabajo sobre jarosita de sodio dopada con calcio, estroncio y magnesio y su aplicación en ingeniería tisular. La síntesis de la jarosita se llevó a cabo durante 3 horas a una temperatura de  $70^\circ\text{C}$ .

Los ensayos realizados para determinar su utilidad como biomaterial fueron MTT, rojo de alizarina y diferenciación osteogénica.

Los resultados mostraron que es un material no tóxico, que permite la viabilidad celular y la regeneración ósea, por lo que se propone como una alternativa a otros biomateriales ya utilizados en ingeniería tisular.

Las jarositas no son el único mineral considerado para uso médico, Villaseñor-Cerón, y otros, (2023) publicaron un trabajo sobre hidroxiapatita dopada con manganeso. Su objetivo fue caracterizar el material y determinar si era apto para su uso en la industria médica. A través del ensayo de azul de alamar se obtuvo que la hidroxiapatita dopada con Mn tiene un valor de 86.88% de viabilidad celular. Se realizaron también pruebas de inmunofluorescencia y de rojo de alizarina, obteniendo resultados de biocompatibilidad favorables.

En contraste con los trabajos mencionados anteriormente, la jarosita industrial mostró resultados de citotoxicidad similares, pero es necesario destacar que se trata de un desecho por lo que necesita de menos inversión y recursos que otros compuestos para implementarse como biomaterial. Además del ahorro que presenta su utilización en comparación con los otros materiales, la jarosita industrial tiene un impacto negativo en el medio ambiente por lo que su utilización y revalorización reduciría las cantidades de jarosita industrial depositadas en jales, con su uso se disminuye el riesgo de producir problemas de salud pública.

## Conclusiones

1. Respecto a la adsorción de metaloides se consideraron los obtenidos de la técnica de XPS, debido a que muestran una mayor exactitud respecto a las otras técnicas utilizadas en este trabajo. El valor de adsorción para el As fue de 0.51 - 0.61 % y 0.15 a 0.18 % para el Cr. Las jarositas demostraron adsorber eficazmente metales tóxicos, por lo que estos residuos pueden ser revalorizados de manera efectiva en el campo de la remediación ambiental.
2. Los ensayos citotóxicos realizados con la jarosita industrial a los 10 días de incubación revelan una viabilidad celular del 91.50 % +/- 8.36 %, resultados mejores que aquellos presentados por otros autores al trabajar con jarositas sintéticas. Esto las hace adecuadas para ser utilizadas como un biomaterial, sin embargo, es necesario destacar que aún se requerirá de realizar pruebas y ensayos para respaldar la seguridad de utilizar estos materiales en seres vivos y en un futuro, en seres humanos.
3. Utilizar un desecho de la industria minero-metalúrgica en un campo tan diferente como lo es la ingeniería tisular es algo novedoso y beneficioso para la ciencia. Sobre todo, porque al tratarse de un residuo los costos de producción se reducen, lo que asegura que al continuar esta investigación se llegará a obtener un dispositivo médico que promueva la regeneración ósea, beneficiando a la salud y al medio ambiente.

## Referencias

- Banco Mundial. (2019). Convivir con basura: el futuro que no queremos. World Bank. Recuperado el 28 de mayo de 2024 de: <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2019/03/06/convivir-conbasura-el-futuro-que-no-queremos>
- Benítez, R. (2016). Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe. FAO-RLC. Recuperado el 1 de junio de 2024 de: <https://www.fao.org/americas/news/news-detail/pda-benitez/es>
- Cerecedo-Sáenz, E., Hernández-Lazcano, E., González-Bedolla, M.J., Hernández-Ávila, J., Rosales-Ibáñez, R., Gutiérrez-Amador, M., Salinas-Rodríguez, E. (2022). Synthesis, Characterization and Decomposition of Potassium Jarosite for Adsorptive As (V) Removal in Contaminated Water: Preliminary Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 15912. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph192315912>
- Cruells, M., & Roca, A. (2022). Jarosites: Formation, Structure, Reactivity and Environmental. *Metals*, 12(5), 802. doi: <https://doi.org/10.3390/met12050802>
- Đokić, J., Gajić, N., Anđić, D., & Kamberović, Z. (2023). Jarosite sludge - utilization and valuable metals recovery applying roastingleachingprocess. *simpozijum Hemija i zaštita životne sredine EnviroChem2023*, 9, 179-180.
- Ferreira Medina, H., Cendejas, J. L., & Valencia García, A. (2019). *INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD*.



Recuperado el 2 de junio de 2024, de: <https://www.iies.unam.mx/el-impactode-la-basura-electronica-en-mexico/>

Flores, M.U., Reyes, I.A., Palacios, E.G., Patiño, F., Juárez, J.C., Reyes, M., Gutiérrez, E.J. (2019). Kinetic Analysis of the Thermal Decomposition of a Synthetic Mercury Jarosite Minerals. *Minerals*, 9(4), 200. doi: <https://doi.org/10.3390/min9040200>

Flores, V.H., Patiño, F., Roca, A., Flores, M., Reyes, I., Reyes, M., & Islas, H. (2022). Alkaline Decomposition of Solid Solution of Ammonium-Sodium Jarosite with Arsenic. *Metals*, 12(4). doi: <https://doi.org/10.3390/met12040584>

Galván Rico, L., Reyes Gil, R.E., Guédez Mozur, C., & De Armas, D. (2007). Los macroprocesos de la industria petrolera y sus consecuencias ambientales. Universidad, Ciencia y Tecnología. (C. y. Universidad, Ed.) 11(34), 097-097. Recuperado el 01 de Junio de 2024, de [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S13164821200700020006&lng=es&tl](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S13164821200700020006&lng=es&tl)

González, L., López, R., Domínguez, M., & Gutiérrez, A. (2022). *Unidad de Apoyo para el Aprendizaje (UNAM)*. Recuperado el 2 de Junio de 2024, de [https://repositoriouapa.cuaieed.unam.mx/repositorio/moodle/pluginfile.php/2162/mod\\_resource/content/4/contenido/index.html#:~:text=llam%C3%B3%20Baby%20Blue.,Fundamento,parte%20del%20genoma%20a%20amplificar.](https://repositoriouapa.cuaieed.unam.mx/repositorio/moodle/pluginfile.php/2162/mod_resource/content/4/contenido/index.html#:~:text=llam%C3%B3%20Baby%20Blue.,Fundamento,parte%20del%20genoma%20a%20amplificar.)

Jae-Geun, R., & Yeongkyoo, K. (2022). Mineral transformation and dissolution of jarosite coprecipitated with hazardous oxyanions and their mobility changes.

*Journal of Hazardous Materials*, 427, 128283. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128283>

Javed, F., & Romanos, G. E. (2010). The role of primary stability for successful immediate loading of dental implants. A literature Review. *Journal of*

*Dentistry*, 38(8), 610-620. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2010.05.013>

*Laboratorium Discounter*. (2024). Alizarin Red S. Recuperado el 29 de mayo de 2024

de: <https://www.laboratoriumdiscounter.nl/es/quimicos/a-z/a/alizarin-red-s/>

López-Martínez, A.M., Khamkure, S., & Gamero-Melo, P. (2023). Bifunctional

Adsorbents Based on Jarosites for Removal of Inorganic Micropollutants from Water. Separations. *Separations*, 10(5), 309. doi:

<https://doi.org/10.3390/separations10050309>

Méndez, J. E., Flores, M. U., Patiño, F., Reyes, M., Juárez, J. C., Reyes, I. A., &

Hidalgo, M. (2015). Synthesis and nature of the reaction of a solid solution of ammonium-potassium arsenojarosite in NaOH medium. *In Proceedings of*

*EMC*, 523.

[https://www.researchgate.net/publication/283504340\\_Synthesis\\_and\\_nature\\_of\\_the\\_reaction\\_of\\_a\\_solid\\_solution\\_of\\_ammoniumpotassium\\_arsenojarosite\\_in\\_NaOH\\_medium](https://www.researchgate.net/publication/283504340_Synthesis_and_nature_of_the_reaction_of_a_solid_solution_of_ammoniumpotassium_arsenojarosite_in_NaOH_medium)

ONU. (s.f.). *un.org*. Desafíos globales. Población: Recuperado el 27 de Mayo de 2024, de: <https://www.un.org/es/global-issues/population>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). Desechos de las actividades de atención sanitaria. Recuperado el 2 de junio de 2024, de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/health-care-waste>

Paniagua, R., Nistal, M., Sesma, P., Álvarez-Urúa, M., Fraile, B., Anadón, R., & Saéz, F. (2017). *Biología celular y molecular 4e*. McGraw-Hill Education. Recuperado el 27 de mayo de 2024 de: <https://accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?bookid=2214&sectionid=169138974>

Pérez Porto, J., & Merino, M. (31 de Agosto de 2020). *Metalurgia - Qué es, definición y concepto*. Recuperado el 15 de Julio de 2024, de definicion.de: <https://definicion.de/metalurgia/>

Picazo-Rodríguez, N. G., Carillo-Pedroza, F. R., Soria-Aguilar, M. J., Baltierra, G., González, G., Martínez-Luevanos, A., & Almaguer-Guzmán, I. (2022). Use of Thermally Modified Jarosite for the Removal of Hexavalent Chromium by Adsorption. *Crystals*, 12(1), 80. doi: <https://doi.org/10.3390/cryst12010080>

Real Academia Española. (2019). *Real Academia Española*. Recuperado el 15 de julio de 2024, de Diccionario del estudiante: <https://www.rae.es/diccionarioestudiante/biomaterial>

Real Academia Española. (2021). *Tesoro de los diccionarios históricos de la lengua española*. Recuperado el 15 de julio de 2024, de adsorción: <https://www.rae.es/tdhle/adsorción>

Rosales-Ibáñez, R., Cubo-Mateo, N., Rodríguez-Navarrete, A., González-González, A.M., Villamar-Duque, T.E., Flores-Sánchez, L.O., & Rodríguez-Lorenzo, L.M. (2021). Assessment of a PCL-3D Printing-Dental Pulp Stem Cells Triplet for Bone Engineering: An In Vitro Study. *Polymers*, 13(7), 1154. doi: <https://doi.org/10.3390/polym13071154>

Salinas, E., Cerecedo, E., Ramírez, M., Patiño, F., & Pérez, M. (2012). Kinetics of alkaline decomposition and cyanidation of argentine rubidium jarosite in NaOH medium. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 43, 1027-1033. doi: <https://doi.org/10.1007/s11663-012-9697-4>

Salinas, E., Roca, A., Cruells, M., Patiño, F., & Córdoba, D.A. (2001). Characterization and alkaline decomposition-cyanidation kinetics of industrial ammoniumjarosite in NaOH media. *Hydrometallurgy*, 60, 237-246. doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(01\)00149-9](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(01)00149-9)

San Martín, A., Carrasco, C., Aguilar, & Sánchez, M. (2022). Valorización de residuos mediante procesos metalúrgicos: Experiencias locales. *Revista Nueva Minería y Energía*, (164), 60-62. Obtenido de <https://www.nuevamineria.com/revista/octubre-2022-no-164/>

Serralde-Lealba, J.R., Cerecedo-Sáenz, E., Hernández-Ávila, J., Arenas-Flores,

A., Veloz-Rodríguez, M.A., Gutiérrez-Amador, M., Salinas-Rodríguez, E. (2022). Doped Potassium Jarosite: Synthesis, Characterization and Evaluation as Biomaterial for Its Application in Bone Tissue Engineering. *Metals*, 6(12), 1052. doi: <https://doi.org/10.3390/met12061052>

Simón, A. (Ed.). (2017). *www.greenpeace.org*. Incineración de residuos en la Ciudad de México: El gran obstáculo para transitar hacia una ciudad sostenible: Recuperado el 29 de Mayo de 2024, de [https://www.greenpeace.org/static/planet4mexicostateless/2018/11/9e5e6f2f-9e5e6f2f-incineracion-de-residuos-en-ciudad-demexico.pdf?\\_ga=2.63567725.353383634.15820328581782587155.1582032858](https://www.greenpeace.org/static/planet4mexicostateless/2018/11/9e5e6f2f-9e5e6f2f-incineracion-de-residuos-en-ciudad-demexico.pdf?_ga=2.63567725.353383634.15820328581782587155.1582032858)  
[858](#)

Tuset, S. (11 de octubre de 2023). *Condorchem Enviro Solutions*. Recuperado el 1 de Junio de 2024, de <https://condorchem.com/es/blog/valorizacionenergetica-de-residuos/>

Villaseñor-Cerón, L. S., Mendoza-Anaya, D., López-Ortíz, S., Rosales-Ibañez, R., Rodríguez-Martínez, J., Reyes-Valderrama, M., & Rodríguez-Lugo, V. (2023). Biocompatibility analysis and chemical characterization of Mn-doped hydroxyapatite. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 34(40). doi: <https://doi.org/10.1007/s10856-023-06744-0>

Wang, Y., Huifen, Y., Ge, Z., Jingxing, K., & Chuanlong, W. (2020). Comprehensive recovery and recycle of jarosite residues from zinc hydrometallurgy. *Chemical Engineering Journal Advances*, Volumen 3, 100023, ISSN 2666-8211,.

*Chemical Engineering Journal Advances*, 3, 100023. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.ceja.2020.100023>

## ANEXOS

1. Primer Seminario Interinstitucional Transdisciplinar de Ciencia de Frontera en Ingeniería Tisular, Medicina y Odontología Traslacional. Unidad de Seminarios de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM. 20 de junio del 2024. Ponencia presencial. **"Compuestos jarosínicos industriales. De residuo contaminante a su posible uso en ingeniería tisular"**



La Universidad Nacional Autónoma de México-FES Iztacala, la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, el TecNM-Instituto Tecnológico Superior de SLP, Capital y la Universidad de La Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo.

Organizan la presente constancia a:

**C. Alondra García Cerdón**

Por la ponencia titulada **"Compuestos jarosínicos industriales. De residuo contaminante a su posible uso en ingeniería tisular"** impartida en el **1er. Seminario Interinstitucional Transdisciplinar de Ciencia de Frontera en Ingeniería Tisular, Medicina y Odontología Traslacional** en la Unidad de Seminarios de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM el **jueves 20 de junio de 2024.**

**ATENCIÓN**

**"POR MI RAZA HABLARÉ EL ESPAÑOL"**  
Tlalpampa de Baz, Estado de México

**Dra. María del Corno Arizmendi Arriaga**  
Directora de la  
FES Iztacala, UNAM

**Dra. Lucila Farieta Barrera Ortega**  
Jefa de la Carrera de Odontología  
FES Iztacala, UNAM

**Dr. Raúl Rosales Ibáñez**  
Jefe del laboratorio de Ingeniería Tisular y  
Medicina Traslacional  
FES Iztacala, UNAM

Investigación realizada gracias al programa UNAM-PAPIIT IN226124





La Universidad Nacional Autónoma de México-FES Iztacala, la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, el TecNM-Instituto Tecnológico Superior de SLP, Capital y la Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo.

Otorgan la presente constancia a:

## C. Ramón Guillem Salinas Maldonado

Por la ponencia titulada **"Compuestos ierosfíticos industriales. De residuo contaminante a su posible uso en ingeniería tisular"** impartida en el **1er. Seminario Interinstitucional Transdisciplinar de Ciencia de Frontera en Ingeniería Tisular, Medicina y Odontología Transaccional** en la Unidad de Seminarios de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM el **jueves 20 de junio de 2024.**

ATENCIAMENTE

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
Tlalpenantla de Baz, Estado de México

*Maria Co Arriaga*

Dra. María del Corno Arizmendi Arriaga  
Directora de la  
FES Iztacala, UNAM

*Cecilia Carola Barrera Ortega*

Dra. Cecilia Carola Barrera Ortega  
Jefa de la Carrera de Cirujano Dentista  
FES Iztacala, UNAM

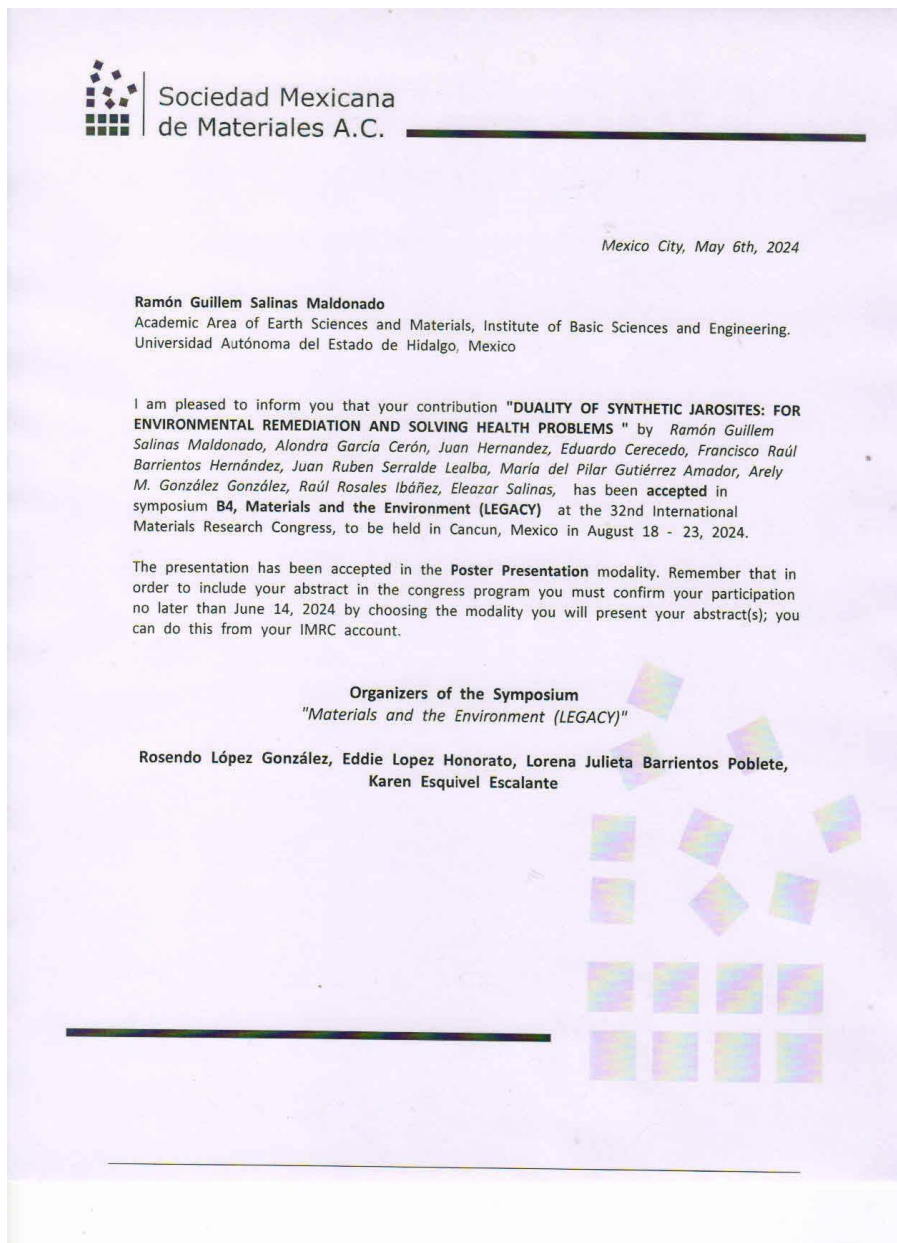
*Raúl Rosales Ibañez*

Dr. Raúl Rosales Ibañez  
Jefe del Laboratorio de Ingeniería Tisular y  
Medicina Transaccional  
FES Iztacala, UNAM

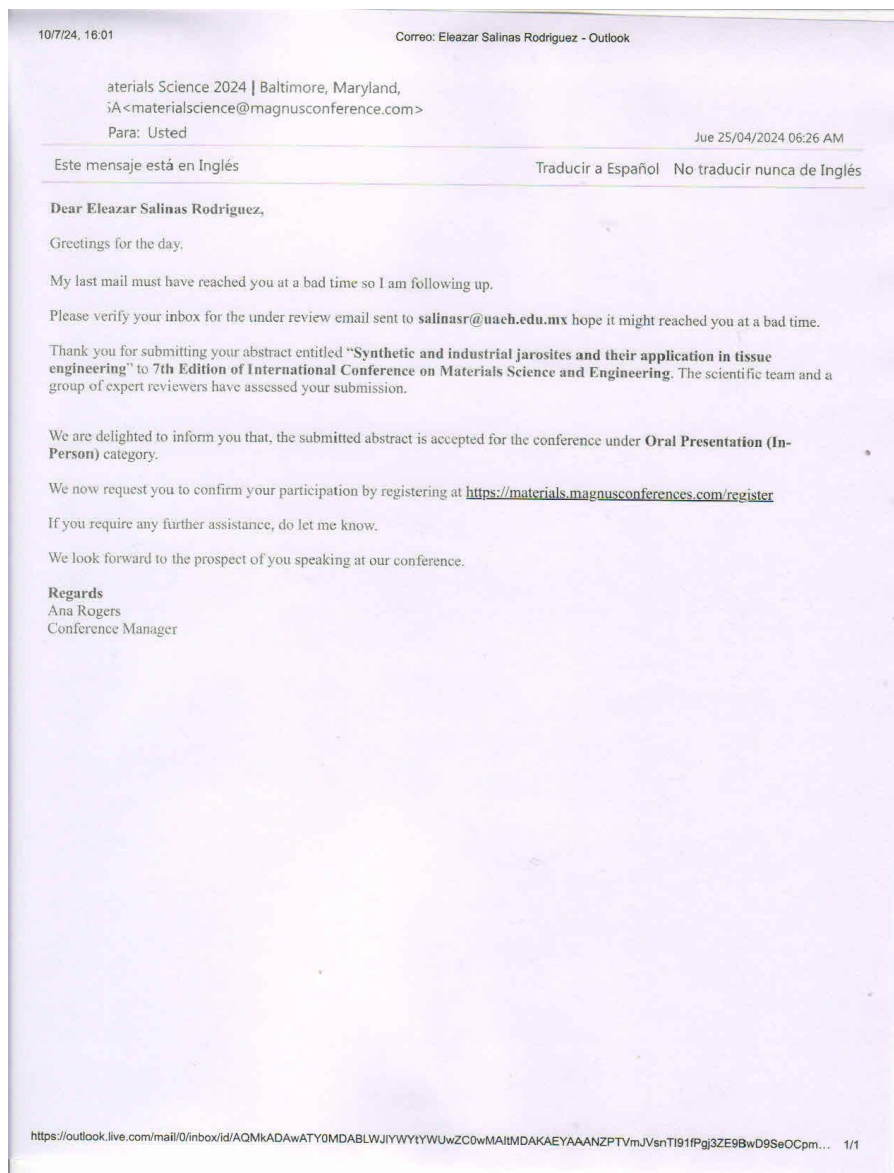
Investigación realizada gracias al programa UNAM-P-APIT IN226124



2. 32nd International Materials Research Congress. Symposium B4, Materials and the Environment (LEGACY). A celebrarse del 18 al 23 de agosto del 2024 en Cancún, México. Presentación de Póster presencial. **"DUALITY OF SYNTHETIC JAROSITES: FOR ENVIRONMENTAL REMEDIATION AND SOLVING HEALTH PROBLEMS"**



3. 7th Edition of International Conference on Materials Science and Engineering. A celebrarse del 28 al 30 de octubre del 2024 en Baltimore, Maryland USA. Trabajo **"Synthetic and industrial jarosites and their application in tissue engineering"**



# **Synthetic and industrial jarosites and their application in tissue engineering**

**Eleazar Salinas-Rodríguez<sup>1</sup>, Juan Hernández-Ávila<sup>1</sup>, Eduardo CerecedoSáenz<sup>1</sup>, Estefanía Espinosa-Morales<sup>1</sup>, F. Raúl Barrientos-Hernández<sup>1</sup>, Ramón G. Salinas-Maldonado<sup>1</sup>, Alondra García-Cerón<sup>1</sup>, Fatima M. Cruz-Franco<sup>1</sup>, M.P. Gutiérrez-Amador<sup>2</sup>, Arely M. González-González<sup>3</sup> and Raúl Rosales-Ibáñez<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Academic Area of Earth Sciences and Materials, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Highway Pachuca-Tulancingo, km. 4.5, Mineral de la Reforma, Hidalgo. C.P. 42184. Mexico. salinasr@uaeh.edu.mx (E.S.-R.); herjuan@uaeh.edu.mx (J.H.-A.); eduardoc@uaeh.edu.mx (E.C.-S.); es305316@uaeh.edu.mx (E.E.-M.); frbh68@hotmail.com (F.R.B.-H.); sa380249@uaeh.edu.mx (R.G.S.-M.); ga337807@uaeh.edu.mx (A.G.-C.); cr323332@uaeh.edu.mx (F.M.C.-F.);

<sup>2</sup>Apan High School, Autonomous University of the State of Hidalgo, Apan C.P. 43920, Mexico. amadorg@uaeh.edu.mx (M.P.G.-A.)

<sup>3</sup>Tissue Engineering Lab, Faculty of High Studies Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Tenayuca-Chalmita S/N, Cuatepec Barrio Bajo, Alcaldía Gustavo A. Madero, Ciudad de México C.P. 07239, México.

**Eleazar Salinas Rodríguez**

**Abstract:**

Jarosite formation is due to the weathering of sulphide ores that in many cases contain precious metals like silver and gold, being these compounds a source of such metals. Frequently, this formation process occurs in acid-sulphate soils where acidic environments are present. These compounds, joint with beudantite and alunite are part of a great family of mineral species called alunites, in which the general formula is  $AB_3(SO_4)_2(OH)_6$ , where A is the alkaline site that can be occupied by  $H_3O^+$ , Na, Rb, Ag, K,  $NH_4^+$ ,  $\frac{1}{2}Pb$  or  $\frac{1}{2}Hg$ , and B can be Al(III), Cu(II), or Fe(III). According the aforementioned, in metallurgical processes where Fe is a problem, the natural formation of jarosites was reproduced for Fe elimination from leaching liquors prior electrowinning stage, like is the case of the zinc recovery. In this way, the jarosite type-compound can be synthesized in laboratory to evaluate its kinetic formation, reactivity, metals incorporation and the ability of recovery by leaching processes the precious metals contained in these compounds. During many years, the syntheses of these compounds was carried out at high temperatures (95 °C) and long times of reaction (up to 24 hours), which represented high costs if this process could be applied industrially for silver recovery. However, the synthesis process was improved decreasing both, temperature and time (60-70 °C and 3 hours), reaching the precipitation of micro particles of jarosite of sizes varying from 0.2 to 1 µm and spherical and euhedral morphologies. Recently, the synthesis of these compound are related to some novel applications, like their use as cathodes and/or anodes in Li-ion batteries. But in this case, this material synthesized according the novel

parameters aforementioned, was evaluated using cytotoxic assays to determine its possible application as biomaterial. In this work, the synthesis of jarosite was done using Ca, Mg and Sr as doping elements that can also give an additional improvement during its behaviour as biomaterial during bone regeneration. The main results obtained, are that after 10 days the cell proliferation was good, concluding that these synthetic compounds are viable as a biomaterial, due to their non-toxic property. On the other hand, these jarosites show osteoinduction when added to the swine dental pulp stem cell and for this reason, can be used for orthodontic purposes. For this reason, these compounds were used for the elaboration of scaffolds, which also were evaluated confirming its non-toxic behaviour and the possibility to be used in experiments in vivo for the bone regeneration, which is in course. Finally, the same cytotoxic assays were done on the jarosites precipitated in the zinc industry, finding better results and giving a future application to these industrial waste, proposing that this residue considered hazardous, could be used in tissue engineering for bone regeneration.

### **What will audience learn from your presentation?**

- Explain how the audience will be able to use what they learn? In this work, authors were working in the synthesis of jarosite type compound during more than 15 years, trying to find new innovation to be applicable to the zinc industry. However, with the modification of the synthesis parameters could be find smaller and rounded particles,

which were evaluated in cytotoxic assays, finding that these compounds are able to be used in the elaboration of scaffold for tissue engineering for in vivo experiments for bone regeneration.

- Is this research that other faculty could use to expand their research or teaching? We think that the findings could be used in environmental remediation. The aforementioned is because in the zinc industry this type of compounds are precipitated for Fe elimination from leaching solutions, generation so a great amount of these residues that are considered contaminant and hazardous.
- Does this provide a practical solution to a problem that could simplify or make a designer's job more efficient? Yes, because the industrial compounds that are considered hazardous, had also a good response during cytotoxic assays, so these results could give added value to an industrial waste.

### **Biography of presenting author**

Dr. Eleazar Salinas Rodríguez is studied his doctorate at the University of Barcelona, graduated in 1998. He joined to the Autonomous University of the State of Hidalgo in 1994, starting the collaboration to improve the research in the area of Materials Sciences obtaining the position of Titular Professor in that institution and being the leader of the group that worked in the conformation of the actual Academic area of Earth Sciences and metallurgy. Also, he has been leader of projects related

to leaching of precious metals from minerals, wastes. He has published more than 80 research articles in several journals.

**Details of presenting author to be mentioned in certificate:**

Name: Eleazar Salinas Rodríguez

Affiliation: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo – ICBI -AACTyM

Country: Mexico

**Other Details:**

Presentation Category: Oral

Session Name: Biomaterials

Email: salinasr@uaeh.edu.mx

Alternative Email: esalinas1994nov@hotmail.com

Contact Number: +52 771 7120 74171

Whatsapp Number: +52 771 7120 74171