



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

***INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA***

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

**Reaprovechamiento de residuos mineros de Zimapán como posibles almacenadores de energía**

## TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO DE MATERIALES

PRESENTA

*Leonardo Sánchez Espino*

**DIRECTORES DE TESIS:**

DR. ELEAZAR SALINAS RODRIGEZ  
DR. LUIS HUMBERTO MENDOZA HUIZAR

PACHUCA DE SOTO, HGO. , MÉXICO a 09 de Enero del 2025



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

Mineral de la Reforma, Hgo., a 10 de enero de 2025

Número de control: ICB1-D/025/2025  
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 al Egresado de la Licenciatura en Ingeniería en Materiales **Leonardo Sánchez Espino**, quien presenta el trabajo de titulación **"Reaprovechamiento de residuos mineros de Zimapán como posibles almacenadores de energía"**, 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. Juan Hernández Ávila

**Secretario:** Dr. Luis Humberto Mendoza Huizar

**Vocal:** Dr. Eleazar Salinas Rodríguez

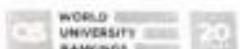
**Suplente:** Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz

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



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@uah.edu.mx  
vergarar@uah.edu.mx



[uah.edu.mx](http://uah.edu.mx)

*Dedicatoria*

*Primeramente, a Dios por permitirme alcanzar esta meta en mi vida, por poner en mi camino a las personas adecuadas, por darme sabiduría, fortaleza y la perseverancia para poder concluir con esta etapa.*

*A mi mayor ejemplo de vida y mi motivación mi Mamá **María Antonia Espino Reyes** por creer en mi incluso cuando yo mismo lo dudaba, por tu esfuerzo para guiarme en esta vida, por tus palabras de aliento y tus oraciones, por no rendirte nunca y multiplicar tus esfuerzos para que a mí no me faltara nada. Todo lo que he logrado te lo debo a ti, este logro es ante todo un homenaje a tu amor y esfuerzo, hoy puedo decir que juntos cosechamos lo que un día sembraste sola.*

*A mis abuelos **†Aniceto Espino Iglesias** y **†María Cruz Reyes Carpio** por ser mis segundos padres, por su sabiduría que me transmitieron, por ser una parte fundamental de mi vida, por enseñarme sus valores los cuales hoy me definen como ser humano y profesionalmente, por su amor incondicional y por creer en mí, por enseñarme a soñar y siempre buscar nuevos retos, pero sobre todo por enseñarme que la familia es la fuerza más grande para poder alcanzar cualquier meta.*

### *Agradecimientos*

*A lo largo de este proyecto he contado con la ayuda de diversas personas, empezare con mis catedráticos pertenecientes al Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales que guiaron a mi formación a lo largo de mi carrera universitaria.*

*Con principal mención a mis asesores de este proyecto:*

*Dr. Juan Ávila Hernández por su orientación, consejos y guía a través de estancia universitaria, por compartir sus conocimientos en procesos metalúrgicos para poder llevar cabo esta investigación.*

*Dr. Eleazar Salinas Rodríguez por su guía como director de tesis en el apoyo en este presente proyecto, por sus conocimientos en metalurgia y caracterización, por sus consejos enriquecedores en mi formación académica.*

*Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz por su amistad y consejos a lo largo de mi formación académica, por compartir sus conocimientos en temas de Difracción de rayos X, MEB-EDS*

*Dr. Luis Humberto Mendoza Huizar por su compañerismo, paciencia y dedicación, por sus consejos y guía en temas de electroquímica que fueron fundamentales para poder realizar esta investigación.*

*A mis amigos y compañeros de licenciatura principalmente a David Livan Loyola, Ariadna Aguilar Zúñiga, Lucero Alejandra Curiel, por su amistad consejos y risas causadas a lo largo de esta trayectoria, por hacer amenos esos días largos y pesados de universidad, por incentivar a seguir descubriendo y progresando académicamente.*

*A mi familia porque llevo un poco de cada uno de ellos por siempre incentivar el estudio y la busca de conocimiento, por sus consejos y cariño.*

*A Marian Yuliana de la Peña Zamora por llegar a cambiar mi perspectiva de vida, por su amor incondicional, por creer y confiar en mis capacidades para poder terminar este proyecto, por su guía y consejos en esta recta final.*

## RESUMÉN

Por mucho tiempo se ha considerado a los residuos de la industria metalúrgica conocidos como jales como un problema ambiental y dañino hacia las personas que se encuentran cercanas de ellos. Sin embargo, en este trabajo se considera que pueden ser utilizados como materia prima para aplicaciones tecnológicas principalmente como lo es el almacenamiento de energía y así al mismo tiempo eliminar un factor contaminante.

Por lo cual se realizó el estudio del reaprovechamiento de los residuos mineros de Zimapán (presa de muestro Santa María de Zimapán) como posibles almacenadores de energía.

De igual forma se pretende resolver el problema de obtención de energía para diferentes aplicaciones y su misma vez poder combatir un grave tema de contaminación.

Se realizó la caracterización por medio de análisis instrumental de muestras de jal por MEB-EDS, y DRX, presentando una composición química con elementos mayoritarios de  $Al_2O$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $P_2O_5$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $CO_3$ ,  $SO_4$ ,  $MgO$ ,  $MnO$ .

Posteriormente se determinó la generación de energía eléctrica mediante pruebas de voltaje, las cuales se midieron con la ayuda de un multímetro para establecer la cantidad de voltaje que nos proporcionan, en un rango de 100mV a 5V.

Para lo cual determinar su aplicación, se realizaron pruebas de concentración realizando diferentes prototipos de pilas para obtener el mayor voltaje y estabilidad.

Se realizaron curvas de descarga con las pilas seleccionadas con el mejor rendimiento para determinar el tiempo de vida útil a diferentes escenarios de resistencias eléctricas con un tiempo establecido.

## ABSTRACT

For a long time, waste from the metallurgical industry, known as tailings, has been considered an environmental problem and harmful to the people who are close to it. However, in this work it is considered that they can be used as raw material for technological applications mainly such as energy storage and thus at the same time eliminate a polluting factor.

For this reason, the study of the reuse of mining waste from Zimapán (Santa María de Zimapán sample dam) was carried out as possible energy storage.

In the same way, it is intended to solve the problem of obtaining energy for different applications and at the same time to be able to combat a serious issue of pollution. Characterization was carried out by means of instrumental analysis of jal samples by MEB-EDS, and XRD, with which the morphology and mineralogical composition of the mining waste was known.

Subsequently, it was determined if they present voltage by doing conduction tests, which were measured with the help of a multimeter to establish the amount of voltage they provide us.

In order to determine its application, concentration tests were carried out by making different prototypes of batteries to obtain the highest voltage and stability.

Discharge curves were performed with the selected batteries with the best performance to determine the useful life time at different scenarios of electrical resistances with a set time.

## Contenido

<b>RESUMÉN</b>	5
<b>ABSTRACT</b>	6
<b>Índice de figuras</b>	9
<b>Índice de tablas</b>	10
<b>Índice de Graficas</b>	10
<b>CAPITULO I</b>	11
<b>INTRODUCCIÓN</b>	11
<b>CAPITULO II</b>	12
<b>MARCO TEORICO</b>	12
<b>ANTECEDENTES</b>	12
Historia de las minas de Zimapán	12
¿Qué son los Jales?	13
Manejo de Presas de Jales en México.	13
Presas de jales.	14
¿Qué es la jarosita?	15
Jarositas sintéticas	16
Las baterías a través de los años	17
Electrolitos de Estado Sólido	21
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	22
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	23
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	23
<b>CAPÍTULO III</b>	24
<b>MATERIAL, EQUIPO Y DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	24
Localización del mineral a estudiar	24
Muestreo	25
Cuarteo	25
	25
Preparación de Jarositas con Jales de Zimapán	26
Reactivos utilizados para la preparación de Jarosita-Jal	26
Preparación de jarosita con Manganeso-Jal:	27
Diagrama de proceso de elaboración de Jarosita sintética con Jal	28
Caracterización	30
Difracción de Rayos X	30
Análisis por Fluorescencia de Rayos-X	32
<b>CAPÍTULO IV</b>	33
<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	33
Análisis Químico	33
Caracterización de Desechos Mineros de Zimapán	35

Microscopía Electrónica de Barrido	37
Pruebas de Conducción Eléctrica	52
Prueba de Diferentes Diseños de Pilas	55
Elaboración de Diseño 1	55
Diseño 2 Jarosita Li-Mn	56
Diseño 3 Jarosita Li-Mn	57
Pruebas con Diferentes Electrolitos	59
Batería de Jarosita	61
Experimentación de voltaje de jal sin dopar	62
Prueba de jal como Electrolito	63
Optimización de jal y agua desionizada	64
Pruebas de Curvas de descarga	68
Primeras Curvas de descarga	71
Segundas Curvas de Descarga	72
Conclusiones	80
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	82
<b>Anexo</b>	84
La energía en la termodinámica	84
Ecuación de Nernst	85
<b>Potencial Electroquímico</b>	85
Celdas Electroquímicas	87
Difraccion de rayos X a las diferentes jarositas	88
Pruebas concentración de Jal	93

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Escombreras de Zimapán, Hgo.	24
<b>Figura 2</b> Cuarteador de jones	25
<b>Figura 3</b> Difractómetro de Rayos X del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales	30
<b>Figura 4</b> Interacción de Rayos X en el espécimen	31
<b>Figura 5</b> Interacción de los Rayos-X con los electrones (Espectroscopía de Fluorescencia, n.d.)	32
<b>Figura 6</b> Espectro muestra de Jal-Zimapán	36
<b>Figura 7</b> Microscopía Jal de Zimapán aumento 200x	37
<b>Figura 8</b> Microscopía Jal de Zimapán aumento 1000x	38
<b>Figura 9</b> Microscopía Jal de Zimapán aumento 4000x	39
<b>Figura 10</b> composición Jal Zimapán	39
<b>Figura 11</b> Mapeo de elementos Jal de Zimapán	41
<b>Figura 12</b> Microscopía Jarosita (Jal-Mn) aumento 200x	42
<b>Figura 13</b> Microscopía Jarosita (Jal-Mn) aumento 1000x	43
<b>Figura 14</b> Microscopía Jarosita (Jal-Mn) aumento 4000x	44
<b>Figura 15</b> Mapeo de los elementos Jarosita (Jal-Mn)	45
<b>Figura 16</b> Mapeo de elementos Jarosita (Jal-Mn)	46
<b>Figura 17</b> Microscopía Jarosita (Jal- (Li-Mn)) aumento 200x	47
<b>Figura 18</b> Microscopía Jarosita Li-Mn aumento 1000x	48
<b>Figura 19</b> Microscopía Jarosita Li-Mn aumento 4000x	49
<b>Figura 20</b> Mapeo de Jarosita-Jal-(Li-Mn)	50
<b>Figura 21</b> Mapeo de elementos (Jarosita-Jal)- (Li-Mn)	51
<b>Figura 22</b> Celda Jarosita-Aluminio	;Error! Marcador no definido.
<b>Figura 24</b> Diagrama primera pila	55
<b>Figura 25</b> Primera pila Li-Mn	56
<b>Figura 26</b> Segunda Pila Li-Mn sobre una placa de acetato	57
<b>Figura 28</b> Cuarta Pila Li-Mn	58
<b>Figura 29</b> Optimización de Jal	64
<b>Figura 30</b> Diseño de Pila para Curvas de Descarga	68
<b>Figura 31</b> Celdas electroquímicas (EL FÍSICO LOCO: Pila Daniell, n.d.)	87
<b>Figura 32</b> Difracción Jarosita	88
<b>Figura 33</b> Difracción de jarosita Mn	89
<b>Figura 34</b> Difracción de Jarosita Li	90
<b>Figura 35</b> Difracción de Jarosita Li-Mn	92

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Cantidad de Reactivos utilizados en la elaboración de Jarositas.....	26
<b>Tabla 2</b> Elementos Traza en mg/kg en muestras de jales del distrito minero Zimapán.....	33
<b>Tabla 3</b> ELEMENTOS MAYORES EN % EN MUESTRAS DE JALES DEL DISTRITO MINERO ZIMAPÁN .....	34
<b>Tabla 4</b> Picos de Difracción de Jal-Zimapán .....	36
<b>Tabla 9</b> Prueba con Grafito y diferentes electrodos.....	53
<b>Tabla 10</b> Prueba de Conducción con diferentes elementos y Jarositas dopas con grafito .....	54
<b>Tabla 11</b> Primera Comparación de Voltajes	
<b>Tabla 12</b> Segunda Comparación de Voltajes .....	59
<b>Tabla 13</b> Tercera Comparación de Voltajes	
<b>Tabla 14</b> Cuarta Comparación de Voltajes .....	60
<b>Tabla 15</b> Voltajes de Batería de Jarosita.....	61
<b>Tabla 16</b> Primera Prueba de Voltaje	
<b>Tabla 17</b> Segunda Prueba de Voltaje	
<b>Tabla 18</b> Tercera Prueba de Voltaje .....	62
<b>Tabla 19</b> Voltaje como electrolito sólido .....	63
<b>Tabla 20</b> Tipos de $\Delta$ G .....	84
<b>Tabla 5</b> Picos de Difracción Jarosita .....	88
<b>Tabla 6</b> Picos de Difracción de jarosita Mn .....	89
<b>Tabla 7</b> Difracción de Jarosita Li.....	90
<b>Tabla 8</b> Difracción de Jarosita Li-Mn.....	92

## Índice de Graficas

<b>Gráfico 1</b> Primera Prueba con 0.1g de Jal.....	65
<b>Gráfico 2</b> Tercera prueba con 0.3g de Jal .....	66
<b>Gráfico 3</b> Prueba con 0.4g de Jal y Microlitros .....	67
<b>Gráfico 4</b> Descarga con resistencia de 1220K $\Omega$ y 1550 K $\Omega$ .....	71
<b>Gráfico 6</b> Descarga con resistencia de 1220K $\Omega$ .....	72
<b>Gráfico 7</b> Descarga con resistencia de 1330 K $\Omega$ .....	73
<b>Gráfico 8</b> Descarga con resistencia de 1560 K $\Omega$ .....	74
<b>Gráfico 9</b> Descarga con resistencia de 2 M $\Omega$ .....	75
<b>Gráfico 10</b> Descarga con resistencia de 4.3 M $\Omega$ .....	76
<b>Gráfico 11</b> Descarga con resistencia de 5.4 M $\Omega$ .....	77
<b>Gráfico 12</b> Descarga con resistencia de 11M $\Omega$ .....	78
<b>Gráfico 13</b> Descarga con resistencia de 51M $\Omega$ .....	79
<b>Gráfico 14</b> Segunda Prueba con 0.2g de Jal .....	93
<b>Gráfico 15</b> Prueba con 0.4g de Jal .....	94
<b>Gráfico 16</b> Prueba con 0.5g de Jal.....	95
<b>Gráfico 17</b> Prueba con 0.6g de Jal .....	95
<b>Gráfico 18</b> Prueba con 0.7g de Jal .....	96
<b>Gráfico 19</b> Prueba con 0.8g de Jal .....	97
<b>Gráfico 20</b> Prueba con 0.9g de Jal .....	98
<b>Gráfico 21</b> Prueba con 1g de Jal.....	99
<b>Gráfico 22</b> Prueba con 0.5g de Jal y Microlitros .....	100
<b>Gráfico 23</b> Prueba con 0.2g de Jal y Microlitros .....	101

## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN

El estado de Hidalgo es uno de los más importantes en cuanto a minería dentro del país este, los más importantes yacimientos mineros se encuentran en los siguientes municipios: Molango, Tlanchinol, Xochicoatlán, Lolotla, Mineral del Monte, Pachuca y Zimapán.

Zimapán es de los municipios del Estado de Hidalgo con mayor presencia de empresas mineras de las cuales destacan: Carrizal Minning SA de CV, Beneficiadora la Purísima SA de CV, Comercializadora Sago Import Export SA de CV, Santa Cruz Silver Minning Ltd., Cía. Minera El Espíritu S de RL de CV.

Es por ello que las actividades minero-metalúrgicas generan gran cantidad de jales en esta región, ocasionando a su vez un grave problema de contaminación a la población, algunos con estragos más fuertes que otros como llegan a ser problemas respiratorios para los pobladores irritabilidad en los ojos, también se ve afectado el medio ambiente con la contaminación de suelo y de mantos acuíferos.

Se sabe que gran cantidad de los jales desechados aún conservan una gran cantidad de minerales que pueden llegar a ser utilizados en distintos tipos de proyectos, y muy pocos son los que se consideran para su reutilización.

Por otro lado, las jarositas son residuos generados durante la producción de zinc electrolítico, y están compuestas principalmente de sulfatos de hierro y uno o varios metales alcalinos con formula general:  $MeFe_3(SO_4)_2(OH)_6$  Donde Me puede ser: Na,K,Rb,Ag,Pb,Hg entre otros (N. G. Picazo-Rodríguez 1, 2022).

## CAPITULO II

### MARCO TEORICO

#### ANTECEDENTES

##### ***Historia de las minas de Zimapán***

Zimapán viene de las palabras de origen náhuatl , cimatl, "cimate" y pan, "en o sobre". Entendido como "Sobre el cimate o entre el cimate", La fundación de Zimapán se llevó a cabo en el año 1522 por los españoles que cambiaron la letra "C" por la "Z".

Se sabe que antes de ser colonizada por los españoles ya había minas pues los primeros habitantes tenían adornos u ornamentas de plata, pero los primeros registros de minería se tienen a partir de 1575 donde en la época precortesiana era parte de la Alcaldía Mayor de Xilotepec donde se descubrieron las primeras minas lo que provocó que los españoles asentados en Xilotepec poblaran Zimapán.

En el año 1632 se descubre la mina Lomo de Toro que hasta la fecha sigue estando activa, con ella dio comienzo el esplendor minero de Zimapán colocándolo como una de las zonas mineras más importantes del país.

Con la llegada del catedrático Andrés Manuel del Rio en 1800, quien fue parte del Real Seminario de Minería, dio a conocer el plomo pardo de Zimapán, que después de ser analizado se descubrió un elemento desconocido que era procedente de la mina La Purísima y él fue nombrado provisionalmente "Zimpanio" u "Eritronio", pero no es sino hasta 1830 que el químico sueco Nils Gabriel Sefström el cual lo redescubrió en un mineral de hierro y logró demostrar que se trataba de un nuevo metal. Al cual lo llamó Vanadio en honor a la diosa nórdica Vanadis, símbolo de la belleza y la fertilidad. El vanadio llegó a dar un giro completo a la industria ya que en la actualidad tiene diferentes usos como son: aleaciones de metal, piezas de mecánica, súper imanes, estabilizador, pero uno de los que más destaca es como superconductor y en piezas electrónicas.

## ***¿Qué son los Jales?***

Se les conoce como Jales aquellos residuos mineros que quedan una vez que se han extraído los minerales de interés, en estos se encuentran minerales que no se lograron extraer por completo, reactivos que fueron utilizados para la extracción, elementos presentes en las rocas que fueron utilizadas.

No todos los jales son iguales ya que estos dependen del origen de extracción o bien método que se ha utilizado para la purificación de los minerales.

## ***Manejo de Presas de Jales en México.***

México destaca dentro de los primeros diez productos más importantes del mundo en minería, los estados de la república mexicana que destacan son Sonora, Zacatecas, Chihuahua, Durango, Guerrero, San Luis Potosí, Hidalgo y Guanajuato, uno de los principales problemas que esta industria genera es la disposición y almacenamiento de final de sus residuos, una de las principales formas de almacenamiento de esto es a través del uso de presas.

De acuerdo con el Inventario Homologado Preliminar de Presas de Jales, en México existen quinientas ochenta y seis presas de jales en México con diferentes estatus de operación: activas, inactivas, inactivas con posibilidad de reactivarse, temporales, inconclusas y desconocidas, entre otras. (Breña Naranjo & Zetina Robles, 2022).

Sumado a la contaminación de metales pesados también implica el uso de grandes cantidades agua tomando en cuenta la situación actual es uno de los más grandes problemas y por ello los nuevos métodos de procesamiento para jales es una alternativa determinante, teniendo como principal objetivo de la remoción del agua para su rehusó y muchas veces se termina reutilizando en la misma industria minera, ya que de igual manera se tienen registros de desbordamientos de estas ocasionando destrozos a las comunidades cercanas a estos.

Este tipo de suceso indica el gran riesgo que representan no solo en su etapa de vida útil si no también con aquéllas que han sido abandonadas y que no tienen una buena supervisión.

### ***Presas de jales.***

El estado de Hidalgo se caracteriza por haber sido durante siglos uno de los más importantes productores de Oro, Plata, Cobre, Plomo y Zinc en México gracias a la explotación minera de recursos metálicos. Por lo cual esto también conlleva a que se hayan generado un gran volumen de jales depositados en presas durante décadas de minería en el estado, y muchas de las cuales no han recibido mantenimiento adecuado durante mucho tiempo.

La presa de jales es una estructura que su principal función es almacenar y depositar los desechos mineros que son enviados de las plantas mineras, estas presas son diferentes en sus diseños ya que dependen de la topografía y morfología del suelo.

Estas van conectadas a las plantas mediante tuberías, las presas están diseñadas para albergar sólidos y no líquidos por lo cual el agua se rebomba muchas veces para poder volver a ser utilizadas en los procesos mineros.

Estás deben de poder cumplir con al menos los siguientes requisitos para que puedan operar:

1. Que estén diseñadas para poder resistir la fuerza de posibles terremotos.
2. Contar con un drenaje adecuado a su capacidad para evitar la acumulación de líquidos.
3. Tener muy en cuenta las condiciones del suelo, en algunos casos como en el de la extracción de oro donde se utiliza cianuro, son usados revestimientos para prevenir alguna filtración.

Los jales presentan una mineralogía variable y compleja constituida principalmente por calcosilicatos, sulfuros y sulfosales. Dentro de los cuales elementos como el Arsénico, Antimonio, Selenio, Zinc, Cobre, Plomo, Cadmio, Bismuto y Manganeso, destacan por sus altas concentraciones, estos son elementos que se les considera altamente tóxicos para el medio ambiente.

## *¿Qué es la jarosita?*

Fue descubierta en el año de 1852 por August Breithaupt en el barranco del Jaroso, en la Sierra Almagrera (Almería), España. (Química. Es, 2023)

La jarosita también conocida como piedra de alumbre es un sulfato de potasio y hierro hidratado básico  $[Fe_3(OH)_6(SO_4)_2]$ . Se llega a forma en depósitos de mena por la oxidación de sulfuros de hierro. Uno de sus usos más comunes es como hemostático tras el afeitado.

Se catalogó como un sulfato, pero lo que lo diferencia de los demás es que es insoluble en agua, se caracteriza por tener un color amarillento-pardo por lo cual como piedra de colección es muy cotizada, es difícil de identificar ya que se suele confundir con la goethita ( $Fe_2OH$ ) y la limonita ( $FeO(OH)$ ).

Su uso se remonta hasta la edad media en la cual se empleaba en el curtido de pieles, como astringente en medicina y como mordiente en tintes y estampados por lo cual lo convertía en un mineral de gran valor estratégico.

En la actualidad sus usos son más complejos como son la exploración espacial destacando principalmente el planeta marte donde se encontraron yacimientos de jarositas en las rocas volcánicas,

De los usos más importantes que se le han dado es en la industria minera como son en plantas de zinc para poder controlar los contenidos de hierro de los licores de lixiviación antes de que se pase al proceso de electrólisis y evitar así problemas en la recuperación electrolítica de zinc.

## ***Jarositas sintéticas***

El uso de jarositas sintéticas en la actualidad es más común de lo que se piensa, destaca en la industria minera del zinc, en la recuperación de metales preciosos, uno de usos donde más destaca es en la aplicación en baterías de ion de litio como ánodos y cátodos ya que se ha comprobado que pueden realizar intercambios iónicos electroquímicos.

Estudios anteriores en el campo de la medicina, demuestran que las propiedades de las jarositas sintéticas tienen una alta compatibilidad al ser dopadas con distintos elementos por lo cual se les puede considerar como un biomaterial.

Al analizar diferentes tipos de soluciones jarosíticas, donde cuyas muestras fueron dopadas con calcio manteniendo un pH de trabajo de 7.2 demostró cambios de estructura debido a la presencia del elemento dopante dentro de la estructura modificándose parcialmente.

Estudios recientes han demostrado la capacidad de estos compuestos de realizar intercambios iónicos electroquímicos, existiendo fases estructuralmente estables permitiendo su amplitud hacia otros campos de investigación. (J.R.Serralde-Lealba, 2022).

## **Las baterías a través de los años**

En la actualidad no podemos imaginar la vida sin el uso de pilas o baterías. En casi todo lo que usamos se necesita una fuente de energía que les ayude a funcionar, sin embargo, no siempre fue así, pero para que esto pudiera cambiar tuvo que estar presente la electroquímica.

- Las primeras pilas se remontan a los años 250 a.c conocida como la pila de Bagdad se desconoce con que fines fue utilizada esta era vasijas de cerámica que en su interior tenían cilindros de cobre con puntas de hierro. ( . . Introducción (Definiciones), n.d.)

### **• En el año 1730**

- Charles Francois de Cisternay du Fay descubrió que las cargas de igual polaridad se repelen y las de distinta carga se atraen

### **• En el año 1800**

- Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta que hace la primera pila voltaica siguiendo el principio de óxido-reducción con un electrolito y un puente salino.

### **• (1544-1603)**

- Tuvieron que pasar varios años y varios científicos experimentando con la electricidad como fue el caso de William Gilbert. ( . . Introducción (Definiciones), n.d.)

### **• En el 1760**

- Benjamín Franklin propone la teoría del fluido único el cual proponía que la presencia de electricidad era “electricidad positiva” y la ausencia de esta era “electricidad negativa”.

• **Para el año 1820**

- Hans Christian Orsted descubre el magnetismo en la corriente eléctrica con esto André-Marie Ampère contribuye formulando su famosa Ley de electricidad.

• **Para el año de 1853**

- Johann Wilhelm Hittorf descubre que no todos los iones viajan, algunos tienden a viajar más rápido que otros cuando a estos se les aplicaba una corriente, este descubrimiento trajo el concepto de número de transporte.

• **En el año 1879**

- Edwin Herbert Hall descubre la aparición de un campo eléctrico producido por la separación de cargas a esto años después se conocería como el efecto Hall.

• **En 1836**

- John Frederic Daniell inventa una batería que consta de dos fluidos, esta fue la primera batería en poder proporcionar una fuente constante de corriente durante un período de tiempo a esta se le conoció como la celda de Danielle.

• **En 1859**

- Gaston Planté crea una batería a partir plomo-ácido, esta revolucionó el mundo ya que era más fácil de poderla transportar.

• **En el año 1889**

- Se desarrolla la pila de Ludwig Mond y su asistente Carl Langer la cual consistía en combustible de hidrógeno-oxígeno usando electrodos de platino perforado.

### En el año 1904

- Friedenthal sugiere lo que vendría a ser el principio del pH ya que encontró que el principio de los iones Hidrógeno e Hidroxilos en las soluciones acuosas fue de  $1 \times 10^{-14}$ .

### En el año 1912

- Bernstein demuestra que el potencial eléctrico es el fenómeno del cambio de propiedades iónicas.

### • En 1922

- Jaroslav Heyrovský, a quien se le nombró como "padre de la química electroanalítica," registró una curva corriente-tensión de una solución de hidróxido de sodio utilizando un electrodo de mercurio de goteo y atribuyendo el salto de corriente entre -1,9 y -2,0 V a la deposición de los iones de sodio sobre el mercurio. (La, s/f)

### En el año de 1924

- Alexander Naumovich Frumkin dio grandes contribuciones sobre los fundamentos de las reacciones en electrodos principalmente en la interfase del electrodo-electrolito sobre la tasa de electrones a través de ella.

### En 1926

- Con la invención de la denominada batería de tracción de Drumm la tracción eléctrica dio un cambio significativo esta consistía en una pila de níquel-zinc se volvió popular al ser aplicada en un tren en Irlanda.

• **Para el año 1943**

- Carl Wargner formula el mecanismo de la conducción iónica en zirconia dopada el cual propone las bases de la iónica del estado sólido trayendo consigo conceptos como el crecimiento de difusión limitada de escalas en los metales a altas temperaturas, también la pasividad, la oxidación de la aleación y la protección catódica.

**En 1951**

Butler se asoció con R.W. Gurney introducen el concepto de niveles de energía en los cálculos electroquímicos

• **En el año 1952**

- Hans Wenking y Gerhard Bank crean el primer potenciómetro.

• **En 1960**

- Karl V. Kordesch inventa la celda primaria alcalina que esta sustituye el zinc-carbón y el promotor clave de la tecnología de las baterías de RAM (alcalinas recargables de dióxido de manganeso). (La, s/f)

## **Electrolitos de Estado Sólido**

Conforme avanza las nuevas tecnologías energéticas la demanda de baterías más seguras y con menor emisión contaminante han aumentado. Una de las baterías más usadas en la actualidad son las Baterías de Litio o (LIB) por sus siglas en inglés, estas están hechas a base de electrolitos orgánicos, los cuales son inflamables y volátiles, es por ello que se ha optado por utilizar conductores iónicos de tipo sólidos en los cuales permite el movimiento de los iones a través de su estructura muchos de esto son a bases de polímeros sólidos formados por una sal de litio, destacan principalmente por presentar mayor seguridad de sobrecalentamiento esto gracias a sus sistema de prevención mecánica de fugas. (Gol, 2018)

Los electrolitos de estado sólido se pueden clasificar en dos tipos los cuales son: Electrolitos Solidos Poliméricos y Electrolitos Sólidos Inorgánicos. Los electrolitos sólidos inorgánicos son a base de óxidos como son óxido de litio, Boro, Fosforo (Lian et al., 2019)

Si se compara las baterías que utilizan electrolitos líquidos con los sólidos tienen una mayor seguridad y estabilidad térmica es por ello que en las últimas décadas se ha buscado un mayor uso de las mismas.

Estas se dividen de acuerdo con el tipo de electrólito empleado, siendo dos tipos clasificados en base a su origen y son los de origen orgánicos y los de origen poliméricos.(Lian et al., 2019)

Uno de los campos donde más se utilizan este tipo de baterías es en el campo de la tecnología y la nanotecnología ya que por el tamaño de pilas que se utilizan es más factible por el tamaño que estas pueden llegar a tener lo otra de sus ventajas a destacar es que son menos reactivos que los electrolitos líquidos.

Sus propiedades más importantes para destacar son: buenas propiedades mecánicas, buena flexibilidad, la gran mayoría tiene autorreparación cuando existen fases agrietadas, tienen una excelente conductividad iónica. (Lian et al., 2019)

## JUSTIFICACIÓN

Uno de los mayores problemas que deja la minería en México es la acumulación de desechos mineros (Jales), la falta de leyes que mantengan una regulación medioambiental adecuada sobre estos ha ocasionado diferentes problemas tanto económicos y sociales. En el estado de Hidalgo la contaminación por desechos mineros es demasiado grande derivado de las diferentes zonas mineras que presenta el estado. (*NOM 157 SEMARNAT 2009 a 22 12 2023.PDF*, n.d.)

En el municipio de Zimapán Hidalgo uno de los principales sitios mineros del estado, estos desechos representan un gran foco de contaminación que van desde erosión del suelo, contaminación de mantos acuíferos, erosión eólica, cambios de pH en los suelos, liberación de minerales. (De Diputados et al., 2023)

En la caracterización mineralógica que presentan estos desechos se encuentran elementos semiconductores los cuales pueden llegar a ser aprovechados como materia prima para la generación de energía volálica, a través o mediante la elaboración de pilas secas o húmedas.

En la actualidad estamos enfrentado un mundo donde todo a nuestro alrededor funciona con energía ya sea proporcionada median baterías recargables o bien por baterías desechables que a su vez generan más contaminación, el poder encontrar vías alternas para la obtención de energía para diferentes dispositivos se ha vuelto de suma importancia. (De Diputados et al., 2023)

## OBJETIVO GENERAL

Determinar las propiedades fisicoquímicas y eléctricas de los desechos mineros metalúrgicos de las minas de Zimapán, que permitan evaluar su potencial en la fabricación de celdas galvánicas elaboradas con estos residuos.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Muestrear las escombreras (Santa María, Zimapán Hidalgo), para obtener materiales homogéneos representativos.
- ❖ Caracterizar las muestras de las escombreras por diferentes métodos (FRX, Difracción de Rayos X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido MEB-EDS, ASS, Granulometría) para identificar los componentes en los residuos.
- ❖ Determinar las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales seleccionados, para evaluar su uso potencial en la fabricación de las pilas.
- ❖ Diseñar y fabricar prototipos de pilas, que empleen los materiales estudiados.
- ❖ Determinar la curva de descarga de las pilas construidas bajo diferentes condiciones de consumo de energía.

## CAPÍTULO III

### MATERIAL, EQUIPO Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el siguiente capítulo se describen las características generales del mineral utilizado, así como su ubicación, muestro, y el procedimiento para poder caracterizarlo.

También se describe el proceso que se siguió para poder determinar las propiedades eléctricas que presenta.

#### ***Localización del mineral a estudiar***

Los jales de Santa María de Zimapán son las escombreras más antiguas de esta región minera las cuales se encuentran localizadas en el municipio de Zimapán Hidalgo, lo cual se muestra en la Figura 1.



**Figura 1** Escombreras de Zimapán, Hgo (Google Maps, 26/08/24 s.f.).

## Muestreo

El mineral con el que se trabajó se obtuvo de las locaciones anteriormente mencionadas, se realizó de una forma selectiva, tomando muestras representativas de la parte inferior, media y superior. En la Figura 1 se pueden observar las zonas muestreadas, las que se representan con puntos de color rojo.

Se tomó un total de cuatro muestras representativas de las escombreras con 50 kg. aproximadamente por muestra.

## Cuarteo

Se realizó un cuarteo manual con la finalidad de poder homogenizar las cuatro muestras (50kg c/u), posterior a esto se realizó un cuarteo mediante un cuarteador de Jones (figura 2), en el cual se le agrega el mineral obtenido hasta tener una muestra más homogénea de la que se tomaron las muestras para poder realizar el análisis químico, Fluorescencia de Rayos X (FRX), Difracción de Rayos X, Microscopía Electrónica de Barrido en conjunción con Microanálisis por Dispersión de Energías (MEB-EDS), granulometría.

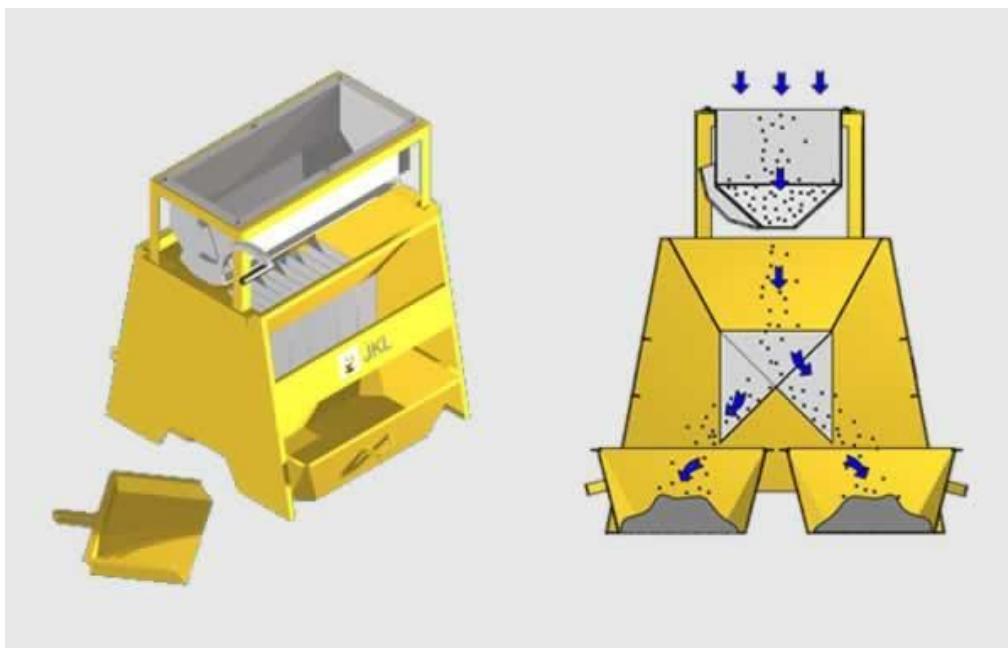


Figura 2 Cuarteador de jones (Daniel, 2015)

## Preparación de Jarositas con Jales de Zimapán

### Reactivos utilizados para la preparación de Jarosita-Jal

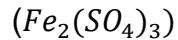
Para la elaboración de las jarositas sintéticas se utilizan distintos tipos de reactivos a continuación se muestran en la Tabla 1 cuales fueron empleados para la elaboración de estos.

**Tabla 1** Cantidad de Reactivos utilizados en la elaboración de Jarositas

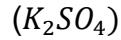
Reactivos	Jarosita con Manganoso- Jal	Jarosita con Litio-Jal	Jarosita (Litio- Manganoso)-Jal
Sulfato Férrico $(Fe_2(SO_4)_3)$	20 gramos	20 gramos	20 gramos
Sulfato de Potasio $(K_2SO_4)$	8.7 gramos	8.7 gramos	8.7 gramos
Sulfato de Manganoso $(MnSO_4)$	8.5 gramos	0 gramos	8.5 gramos
Sulfato de Litio $(LiSO_4)$	0 gramos	6.4 gramos	6.4 gramos
Agua Desionizada	500 ml	500ml	500ml
Jal	3.7 gramos	3.5 gramos	4.3 gramos

**Preparación de jarosita con Manganeso-Jal:**

Cálculos matemáticos para tener la estequiometría de los reactivos para una molaridad de 0.1mol:



$$(0.5L) (0.1\text{mol}) (400\text{g/mol}) = 20\text{g}$$



$$(0.5L) (0.1\text{mol}) (174.26\text{g/mol}) = 8.7\text{g}$$

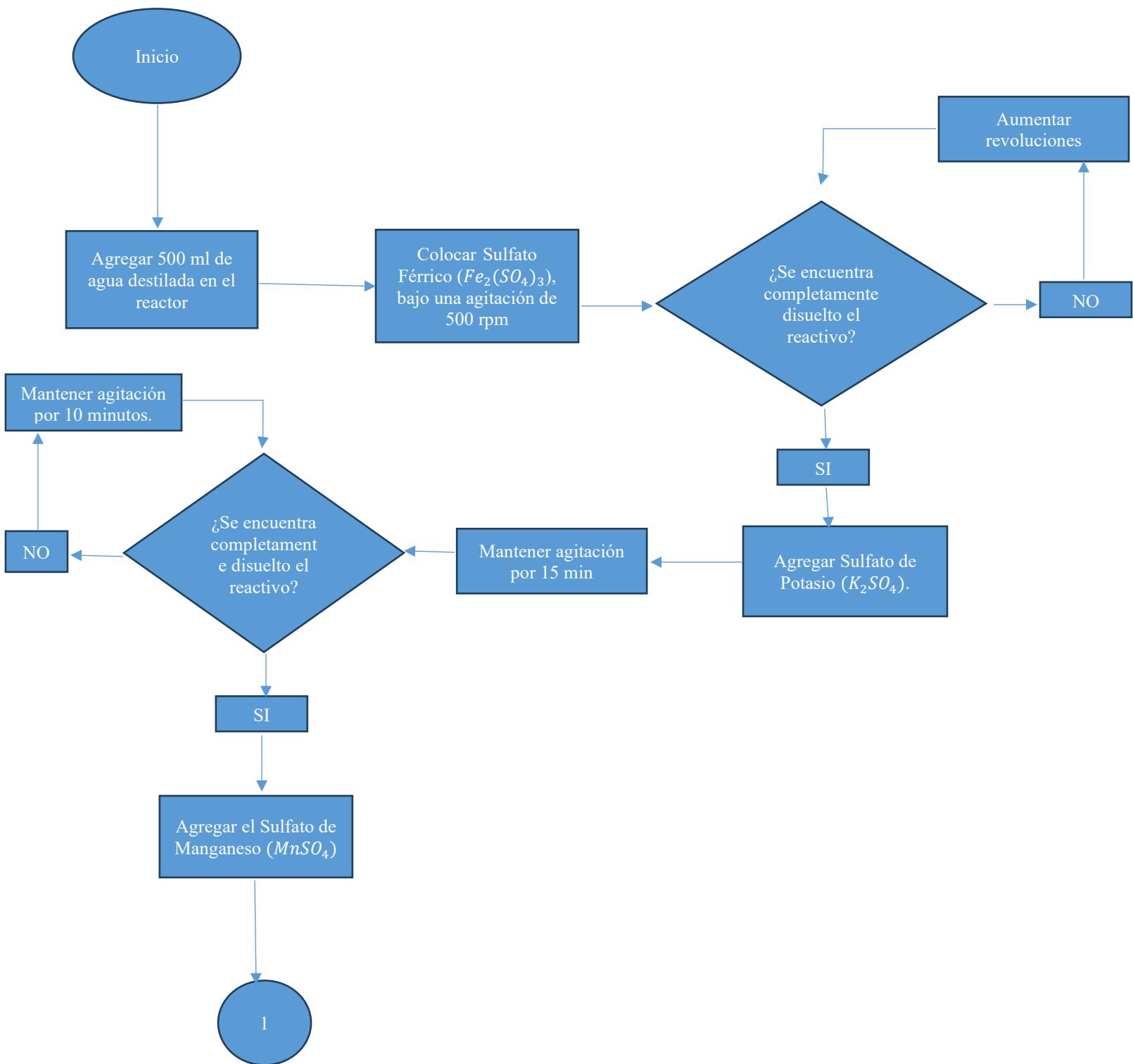


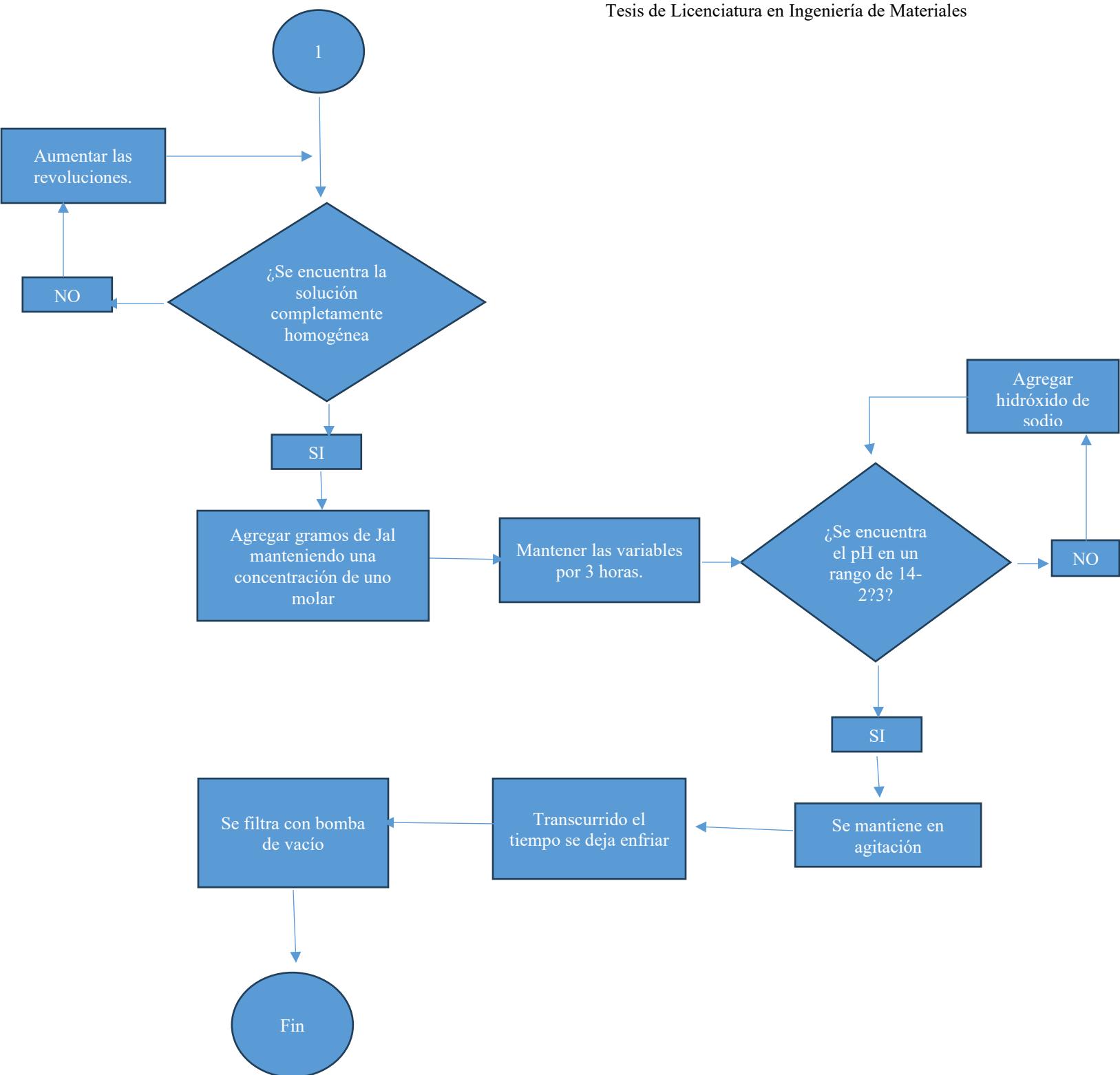
$$(0.5L) (0.1\text{mol}) (169.02\text{g/mol}) = 8.5\text{g}$$

Jal

$$\sum \frac{g \text{ de sulfatos}}{10}$$
$$\frac{37.2g}{10} = 3.7g$$

## Diagrama de proceso de elaboración de Jarosita sintética con Jai





## **Caracterización**

### **Difracción de Rayos X**

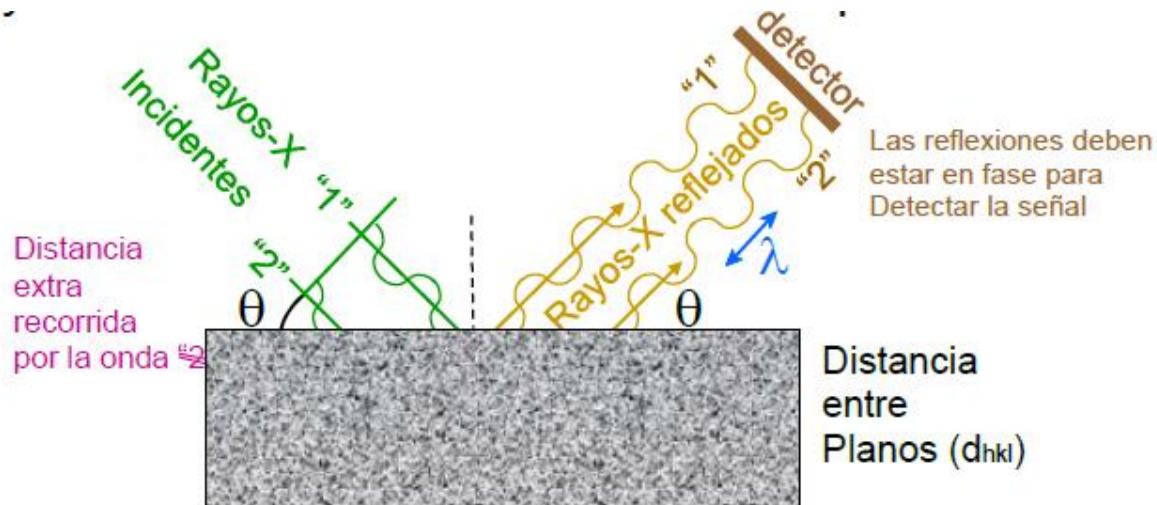
Se llevó a cabo una caracterización química por medio de Difracción de Rayos X (DRX), en el cual se utilizó un Difractómetro de rayos X marca INEL, modelo EQUINOX 2000 (Figura 3), con sistema de detección simultánea en el rango de  $2\theta$  de 0 a  $110^\circ$ , y utilizando un cátodo de cobre y un voltaje de 220 V.



**Figura 3** Difractómetro de Rayos X del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales

Para identificar los elementos presentes en la muestra, se hacen incidir rayos X sobre la misma, para determinar el ángulo característico de cada átomo.

Lo anterior permite identificar de que elemento se trata, en la Figura 4 se esquematiza este proceso .



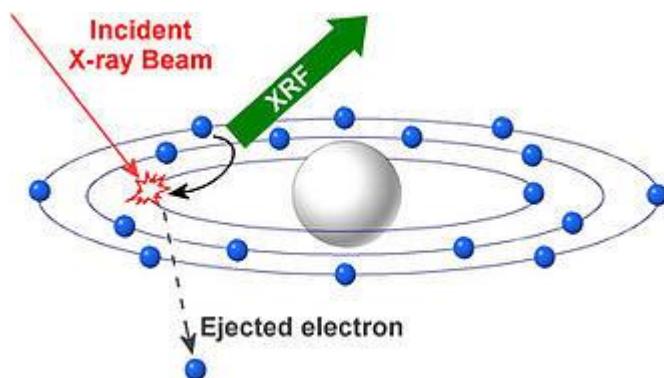
**Figura 4** Interacción de Rayos X en el espécimen (Klyndyuk et al., 2021)

En esta técnica es importante montar la muestra en una probeta de aluminio correctamente lavada y seca, donde se coloca el material a analizar con la ayuda de una espátula de igual manera bien lavada se compacta bien el material en la probeta para después correr la muestra en el equipo para incidir los rayos X sobre la muestra cómo se observa en la Figura 4, cada prueba fue de una duración de 10 minutos.

## Análisis por Fluorescencia de Rayos-X

Esta es una técnica analítica la cual se utiliza para analizar la composición química, se puede usar en sólidos, líquidos y puede analizar composiciones de un rango de 100ppb a 100ppm. (*Espectroscopía de Fluorescencia*, n.d.)

Se realiza la irradiación por un haz primario de rayos X el cual proviene de un tubo de rayos X lo que provoca la emisión de rayos X fluorescentes con energías discretas características de los elementos presentes en la muestra como se representa en la (Figura 5).



**Figura 5** Interacción de los Rayos-X con los electrones (*Espectroscopía de Fluorescencia*, n.d.)

El material estudiado se analizó por Fluorescencia de Rayos X (FRX) (70,71), para ello se utilizó un espectrómetro marca SIEMENS operado en vacío, bajo las siguientes condiciones analíticas.

La muestra se irradió con un anticátodo de Rh empleándose los siguientes cristales LiF200, Ge111, y T1AP, la calibración del equipo se realizó con diferentes óxidos minerales de composición conocida.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

La búsqueda de aplicaciones a materiales de desecho como lo constituye los jales, estos requieren de una caracterización precisa y detallada de los mismos. En las siguientes secciones se reportan los resultados obtenidos de dichos estudios realizados. (Lian et al., 2019)

#### ***Análisis Químico***

Se realizó un análisis químico a los jales de Zimapán con la finalidad de conocer todos los elementos que se encuentran presentes. El análisis muestra los resultados en la Tabla 2 donde se observan los elementos trazas presentes en los jales mientras que en la Tabla 3 se muestran los elementos mayoritarios.

**Tabla 2** Elementos Traza en ppm en muestras de jales del distrito minero Zimapán

Muestra	Pb	Zn	Cd	Cu	As	Bi	Sb	Se	Fe	Cr	Ni
Mínimo	1300	3500	31.6	261	119	12.0	91.6	0.1	21300	57	22
Máximo	16000	32400	1752.2	2008	38700	379.1	3884	65.8	300000	399	173
Promedio	3934.2	11363.2	609.4	912.7	13134.8	127.1	565.5	19.3	122273.7	196.8	85.4
Mediana	3600	10450	567.15	850.5	11105	104.5	496.7	17.03	104550	159.5	67.5

De los elementos más representativos que se pueden encontrar como elementos trazas Cr, Ni, Cd, Cu, Zn estos son los considerados de generar energía eléctrica, a su vez encontramos presencia de arsénico el cual es un elemento considerado uno de los más contaminantes a mantos acuíferos y erosión de tierra

**Tabla 3 ELEMENTOS MAYORES EN % EN MUESTRAS DE JALES DEL DISTRITO MINERO  
ZIMAPÁN**

<b>Muestra</b>	<b><math>Al_2O</math></b>	<b>Co</b>	<b><math>K_2O</math></b>	<b>MgO</b>	<b>MnO</b>	<b><math>Na_2O</math></b>	<b><math>P_2O_5</math></b>	<b><math>TiO_2</math></b>	<b><math>SiO_2</math></b>	<b><math>CO_3</math></b>	<b><math>SO_4</math></b>
<i>Mínimo</i>	0.661	7.093	0.12	0.038	0.038	0.039	0.034	0.050	1.732	0.50	0.021
<i>Máximo</i>	9.088	28.347	4.818	0.374	0.374	0.916	0.206	0.433	30.399	17.38	12.50
<i>Promedio</i>	3.682	14.196	1.985	0.182	0.182	0.617	0.120	0.176	19.486	6.684	4.197
<i>Mediana</i>	2.834	13.229	1.210	0.167	0.167	0.606	0.136	0.125	18.804	6.515	3.890

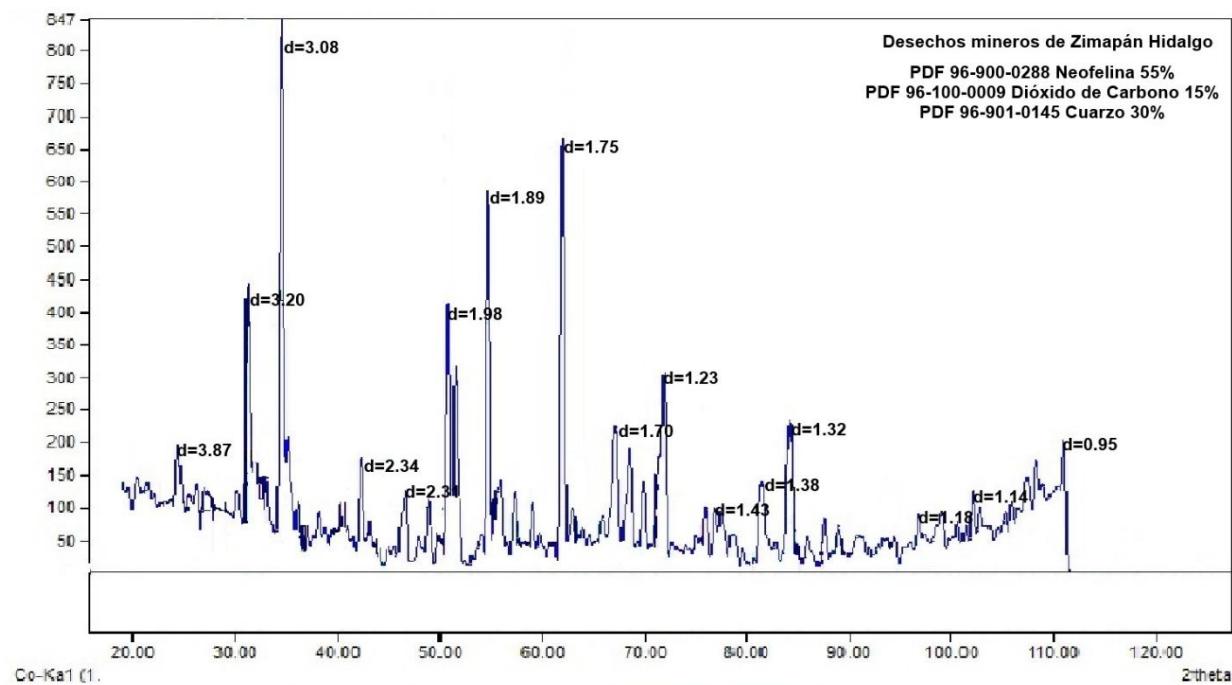
Con los resultados anteriores se puede determinar la presencia de distintos minerales que aún se encuentran en los desechos mineros de la zona de Zimapán, con lo cual lleva a producir una contaminación al medio ambiente y a las personas que se encuentran cerca de estos.

## ***Caracterización de Desechos Mineros de Zimapán***

La prueba se realizó a cada una de las jarositas preparadas, también se realizó al Jal utilizado y a jarosita sin agregar Jal y se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Figura 6 y en las Tabla 4.

Se observa el difactrograma (Figura 6) la muestra de Jal de Zimapán despues de haber pasado por un malla de 500 micras. En la cual se indexaron los pdf 96-900-0288 nepheline 45%, pdf 96-100-0009 dióxido 28%, pdf 96-901-6401 cristobalita 16%, pdf 96-901-0145 cuarzo 11%, en el difactograma se tomaron 16 picos representativos los cuales se encunetran en numerados en la Tabla 4 donde se puede apreciar en un orden de mayor a menor con sus respectivos angulos y resultados de su distancia interplanar, y a que pdf corresponde cada uno.

A partir del estudio de DRX de los jales de Zimapán, se obtuvo el análisis mineralógico lo que dio como resultado la siguiente composición mineralógica que fueron Prita, Pirrotita, Marcasita, Arsenopirita, Calcopirita, Galena, Esfalerita, Boulangerita, Calcita ( $CaCO_3$ ), algunos Calcosilicatos, como Diópsida  $[CaMg(SiO_3)_2]$ , Hedenbergita  $[Ca_2Fe_3(SiO_3)_2]$ , Augita  $(CaMgSi_2O_6)$  y Wollastonita  $(CaSiO_3)$ , Cuarzo ( $SiO_2$ ), Greenockita (CdS), la Otavita ( $CdCO_3$ ) y la Monteponita (CdO), esfalerita (ZnS).

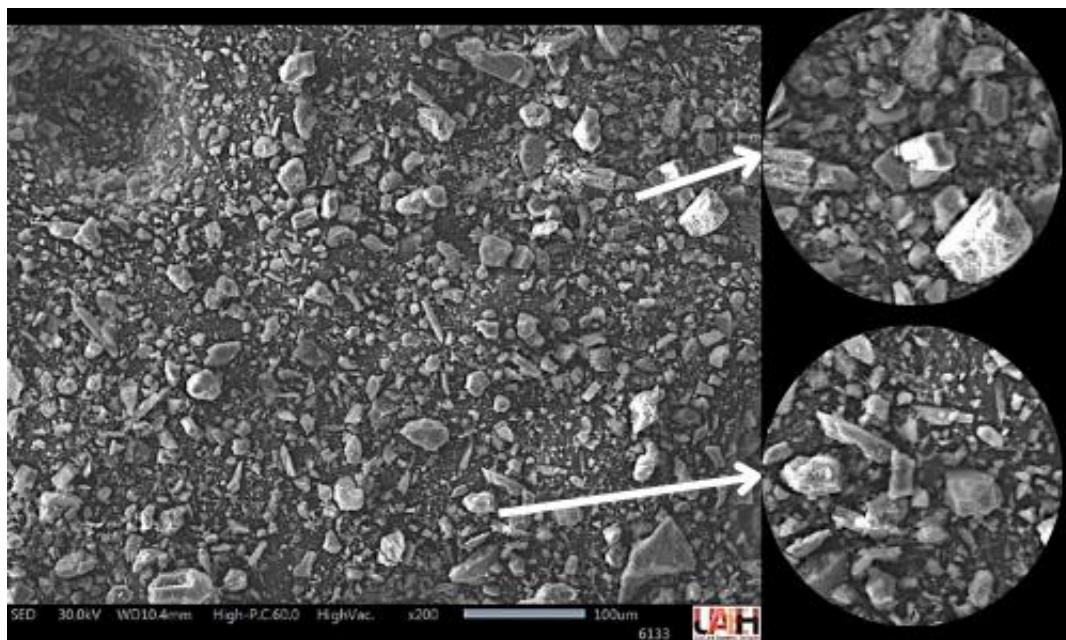
**Figura 6** Espectro muestra de Jal-Zimapán**Tabla 4** Picos de Difracción de Jal-Zimapán**Jal-Zimapán**

Pico	Θ	d	Relación a PDF
1	33.76	3.08	Nefelina
2	61.40	1.75	Dióxido de Carbono
3	56.48	1.89	Cuarzo
4	32.27	3.20	Dióxido de Carbono
5	53.61	1.98	Cuarzo
6	71.43	1.23	Neofelina
7	84.00	1.32	Neofelina
8	63.41	1.70	Neofelina
9	111.00	0.95	Cuarzo
10	26.00	3.87	Cuarzo
11	44.88	2.34	Neofelina
12	45.50	2.31	Dióxido de Carbono
13	80.42	1.38	Neofelina
14	103.00	1.14	Neofelina
15	77.20	1.43	Neofelina
16	92	1.18	Dióxido de Carbono

## ***Microscopía Electrónica de Barrido***

La segunda técnica de caracterización que se realizó fue Microscopía Electrónica de Barrido esta técnica hace uso de un haz de electrones altamente energéticos para examinar objetos a una escala muy fina, con ellos podemos ver Topografía, Morfología, Composición e Información Cristalográfica.

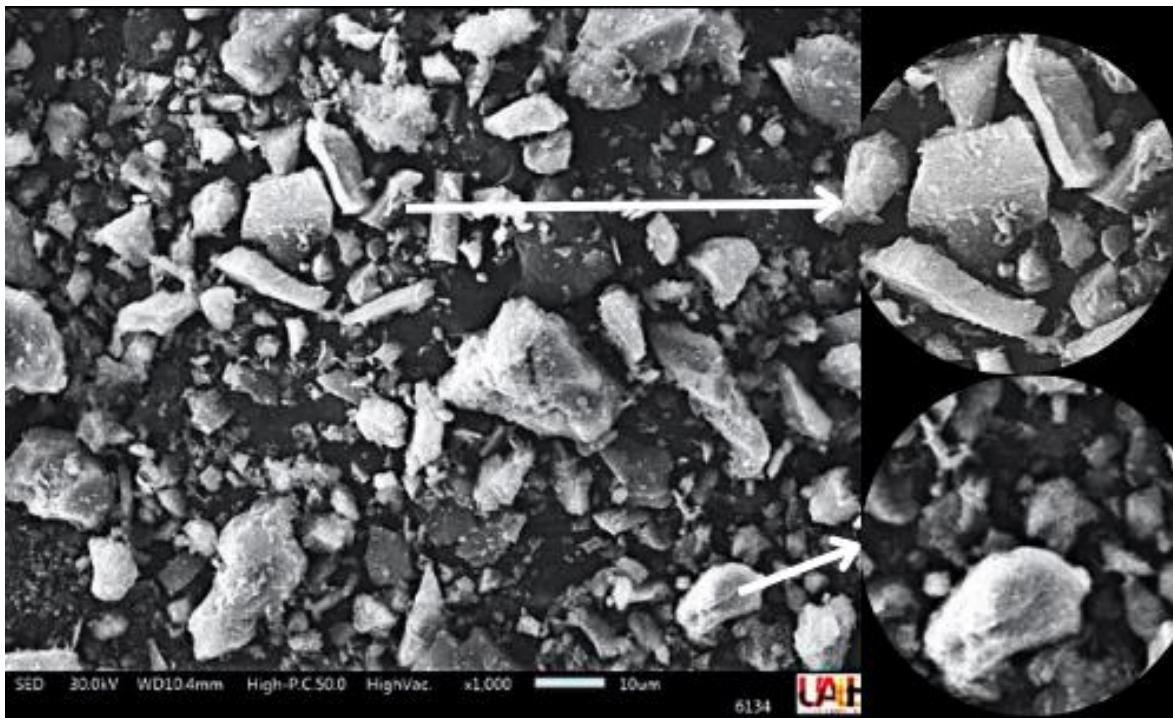
Mediante el uso de electrones secundarios se obtuvieron las imágenes de las figuras 12-28, donde se observan los tamaños de partícula obtenidos y la morfología de los elementos presentes, después del análisis de tamizado, los cuales van desde 2 a 5  $\mu\text{m}$ , en forma semi onduladas.



**Figura 7** Microscopía Jal de Zimapán aumento 200x

En una imagen general (la Figura 7) se puede apreciar partículas mal distribuidas en el centro minerales con fractura concoide son esferoidales, por lo cual significa que presenta una estructura cristalina de tipo hexagonal, se puede ver diferentes tipos de cristales como son del tipo anhedrales los cuales se muestran en el

aumento de la parte superior, mientras que en el aumento de la parte inferior se ven cristales de tipo tabulares.



**Figura 8** Microscopia Jal de Zimapán aumento 1000x

Como se puede observar en la Figura 8 la Microfotografía del Jal aumentada 1000x donde se puede ver más claramente la morfología presente, se pueden apreciar cristales del tipo romboédricos, hexagonales, y tabulares en el aumento de la parte superior, mientras que en el aumento de la parte inferior observamos cristales del tipo anhedrales.

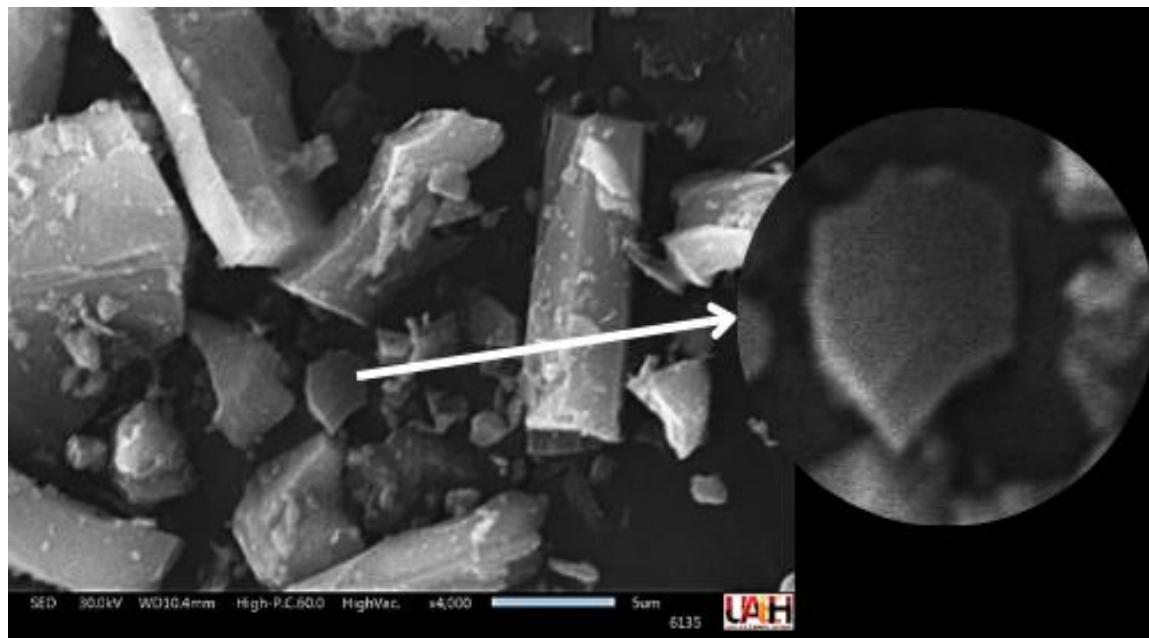


Figura 9 Microscopia Jal de Zimapán aumento 4000x

En un aumento de 4000x (figura 9) se pueden ver mejor los cristales tabulares y hexagonales presentes en los jales de Zimapán, estos últimos se pueden apreciar mejor en el aumento de la imagen las cuales son características de jarosita.

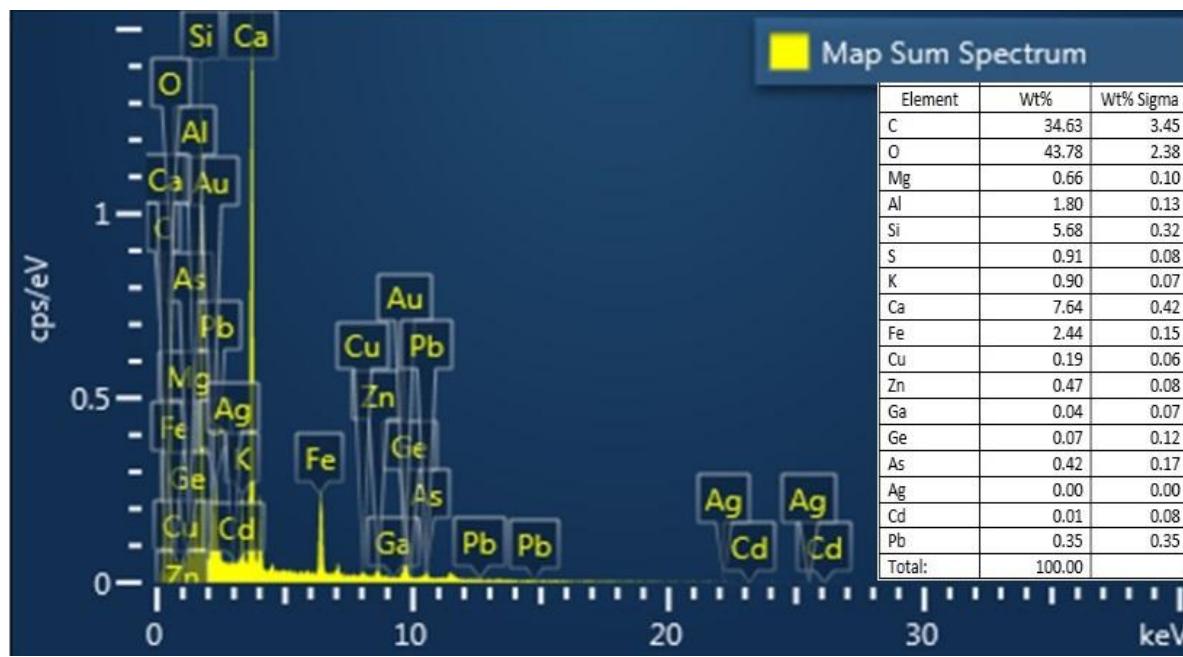
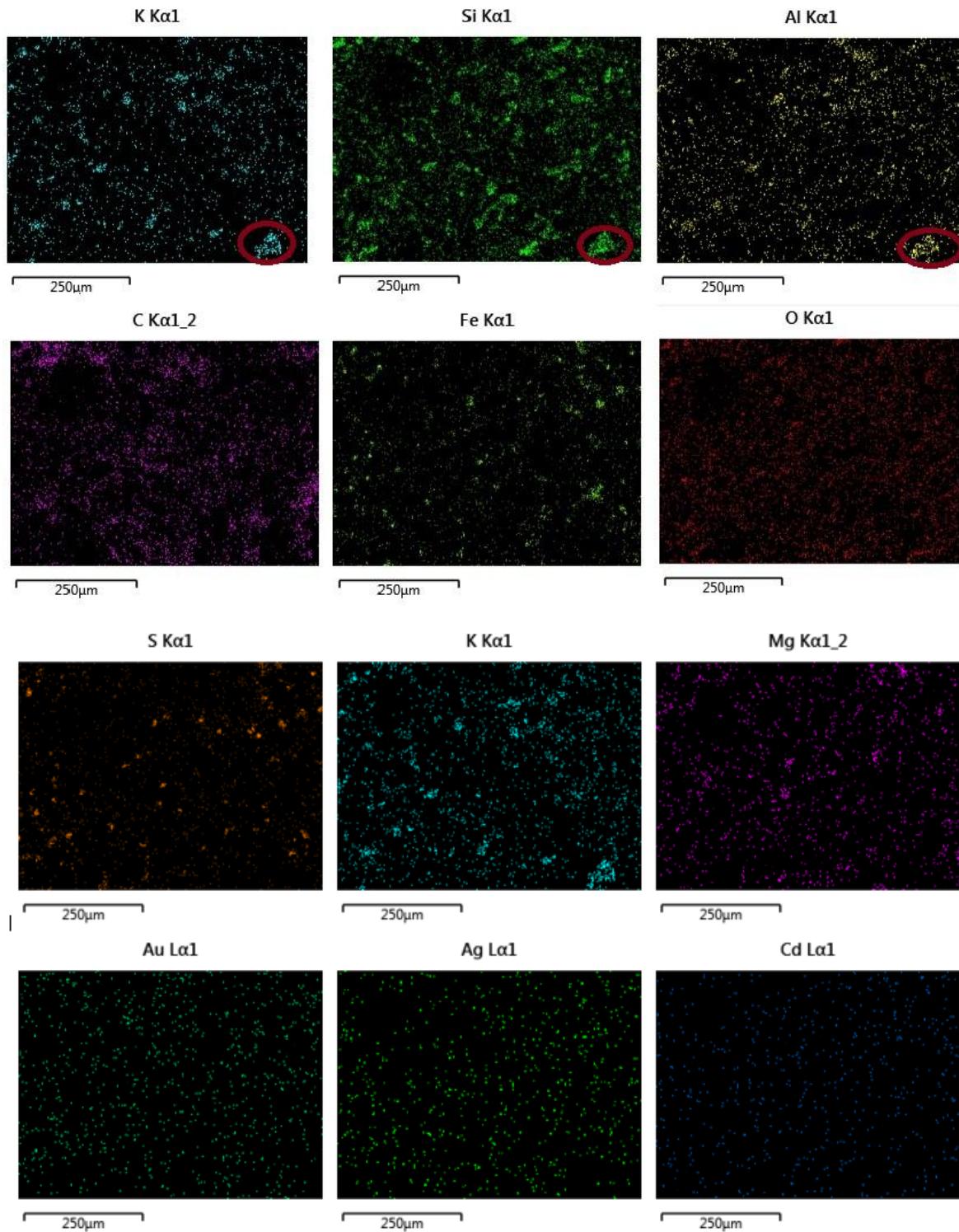
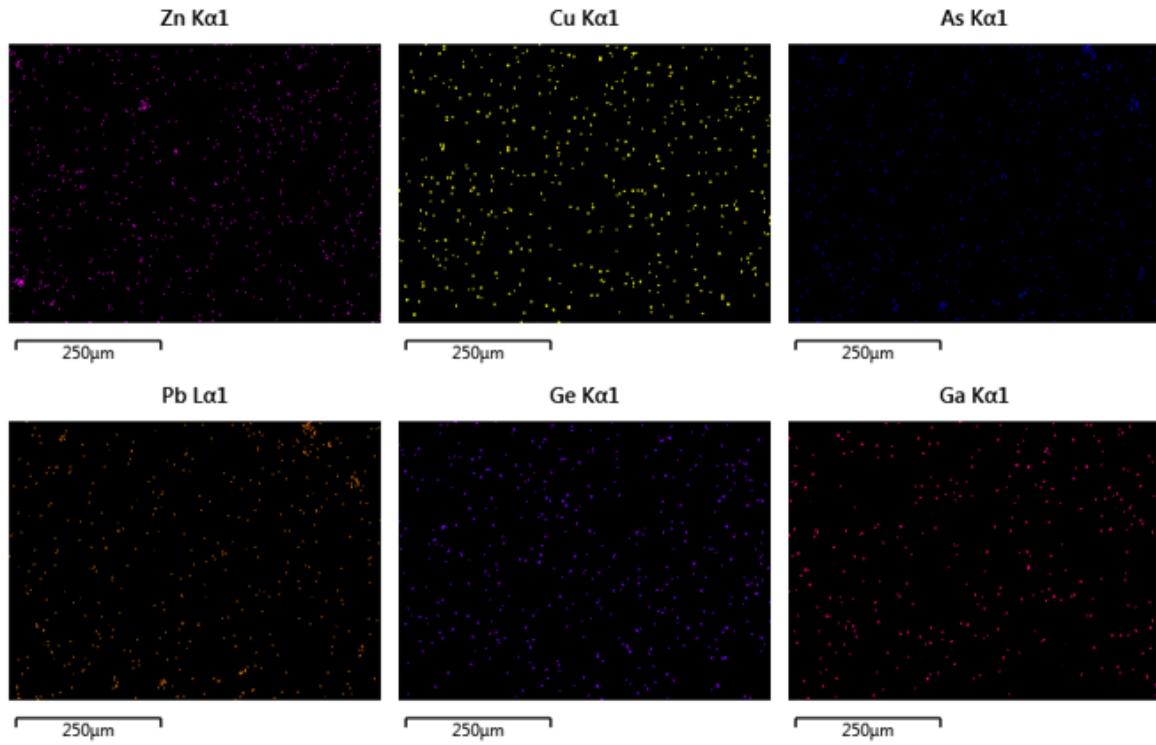


Figura 10 composición Jal Zimapán

En la Figura 10 se puede apreciar los elementos que se encuentran presentes en los Jales de Zimapán de los cuales tenemos como mayoritarios a: Si, Ca, O, Al, Au, As, Pb, Cu, Zn, Ge, y de los elementos minoritarios presentes son: Cd, Mn, Ag, K.





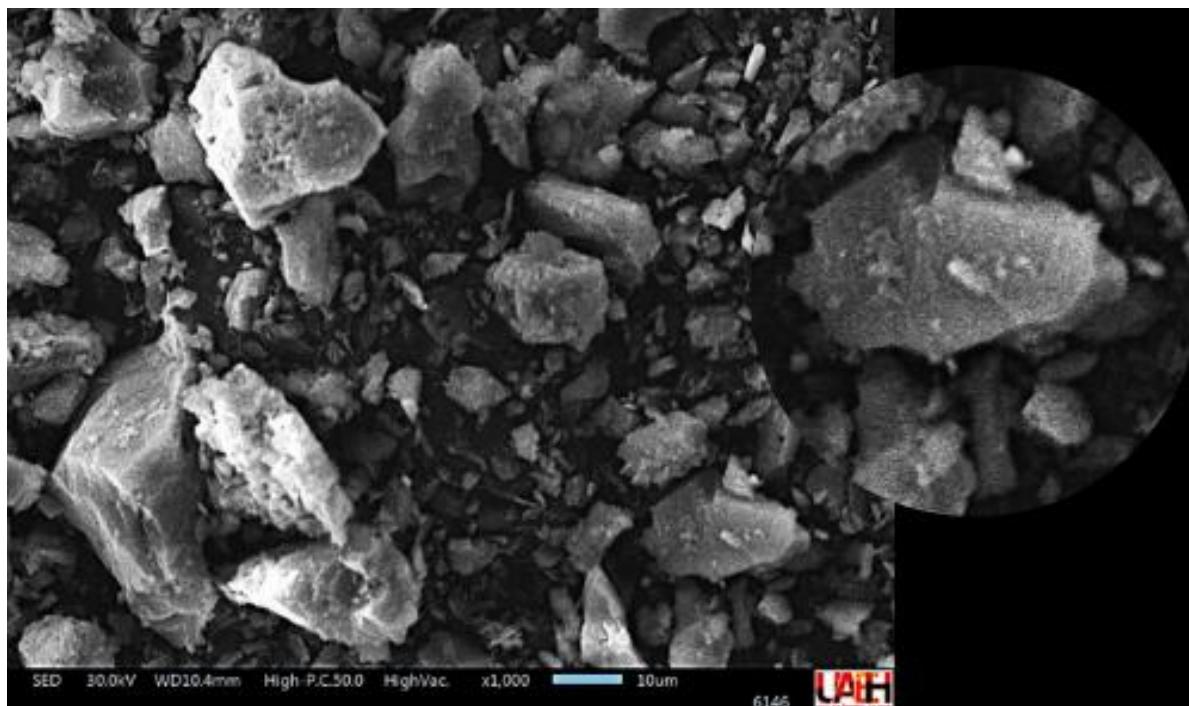
**Figura 11** Mapeo de elementos Jal de Zimapán

Se puede observar el mapeo de los elementos presentes en el jal antes mencionados en la Figura 11, podemos comprobar la presencia de nefelina en la primera línea observando la parte que se encuentra marcadas de color rojo .



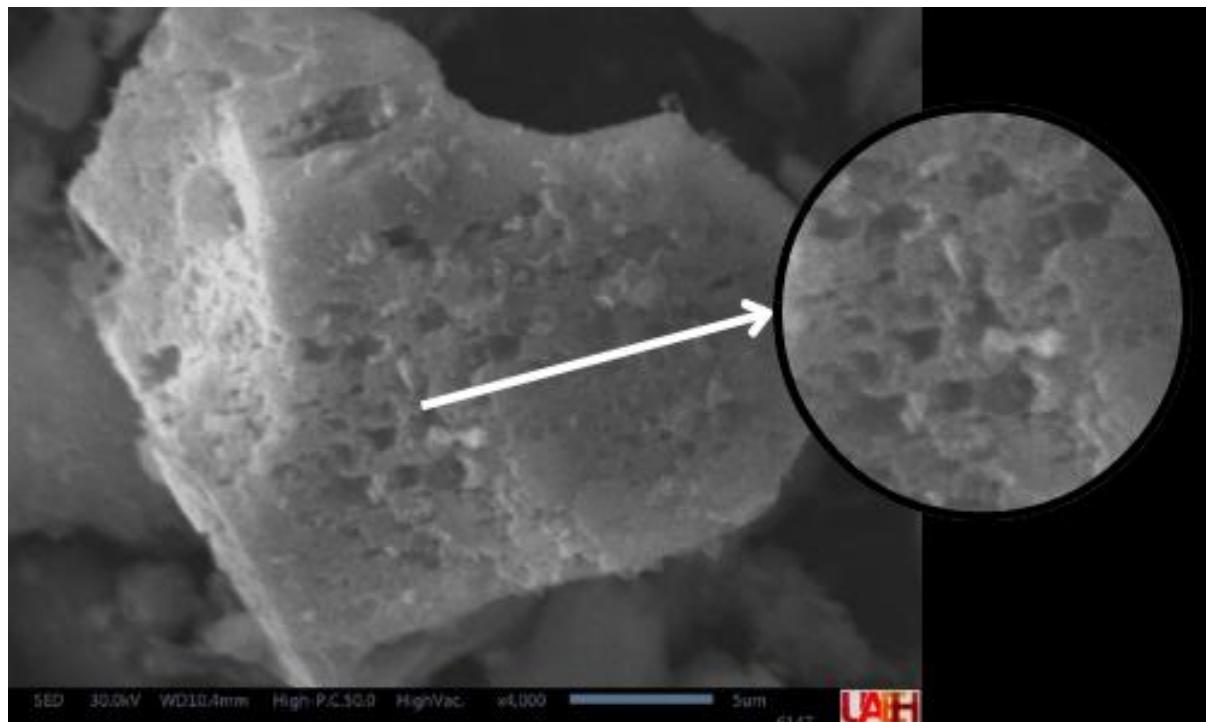
**Figura 12** Microscopia Jarosita (Jal-Mn) aumento 200x

Como se puede observar en la Figura 17, la microfotografía con un aumento de 200x de la unión de la Jarosita-Jal las cual fue dopada con Manganese, presenta pequeños fragmentos aciculares de arcilla como se ve en el aumento de la parte superior, mientras que en la parte inferior se ve cristales del tipo romboédricos.



**Figura 13** Microscopia Jarosita (Jal-Mn) aumento 1000x

En un aumento a 1000x (Figura 13) se puede apreciar mejor los hábitos romboédricos, en la parte del aumento podemos destacar cristales hexagonales correspondientes a la Jarosita, se puede notar que algunos de los cristales presentan porosidad.



**Figura 14** Microscopia Jarosita (Jal-Mn) aumento 4000x

Observándolo en un aumento de 4000x como se muestra en la Figura 19 presenta un hábito cristalino de tipo hexagonal el cual presenta porosidad como se puede ver en el aumento de la figura.

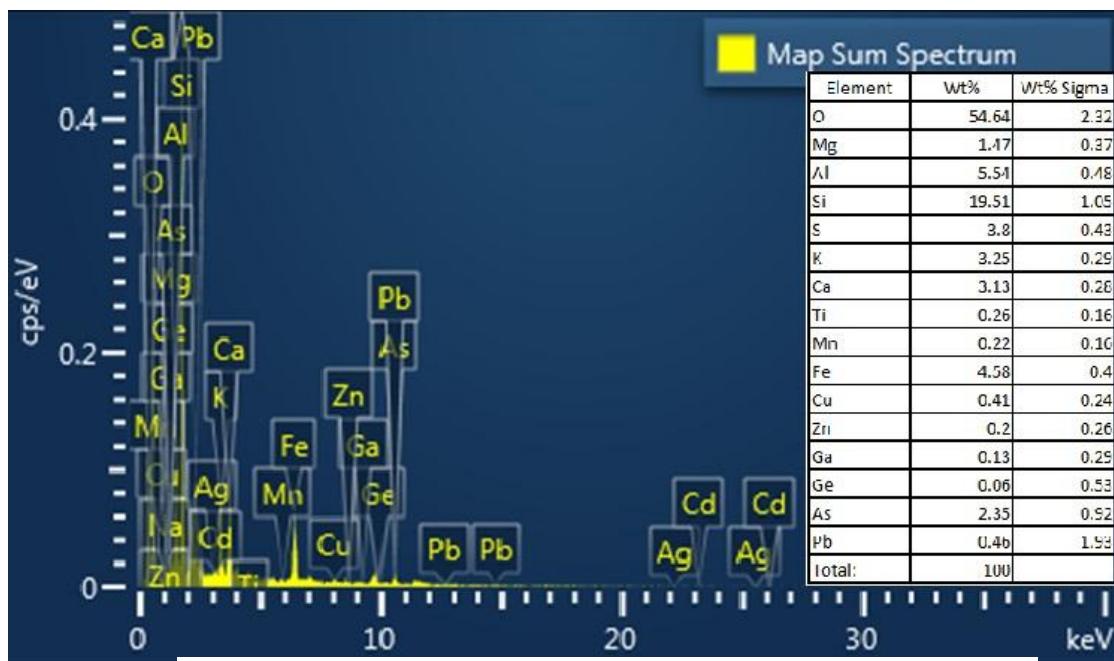
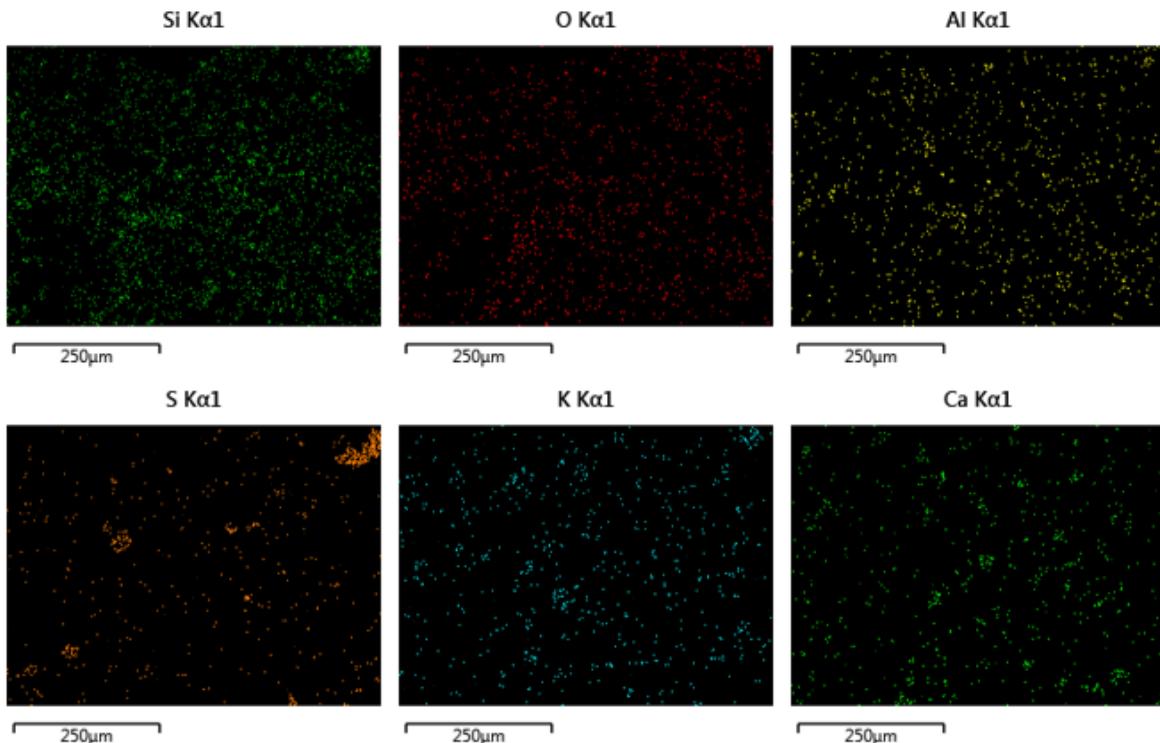
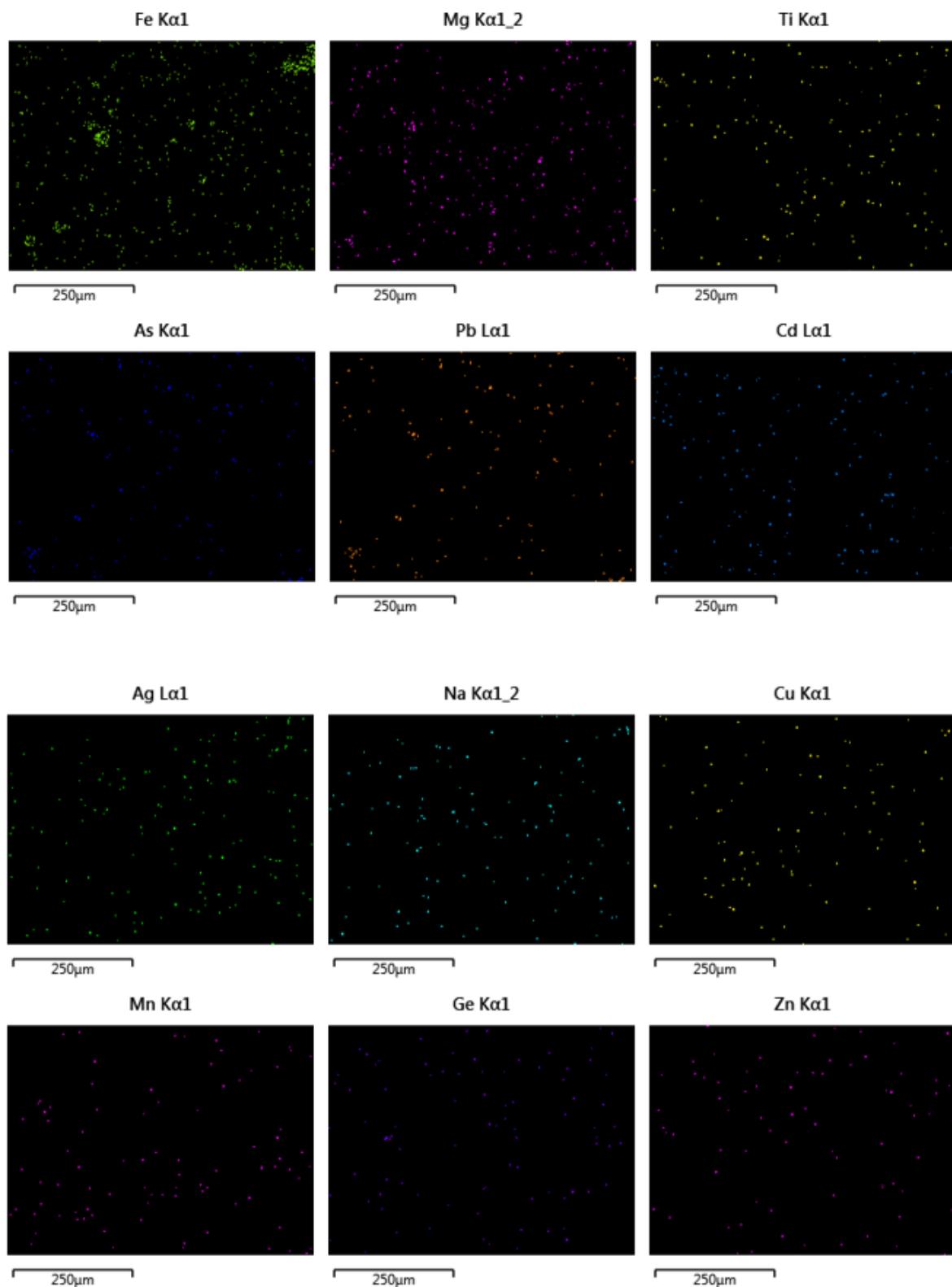


Figura 15 Mapeo de los elementos Jarosita (Jal-Mn)

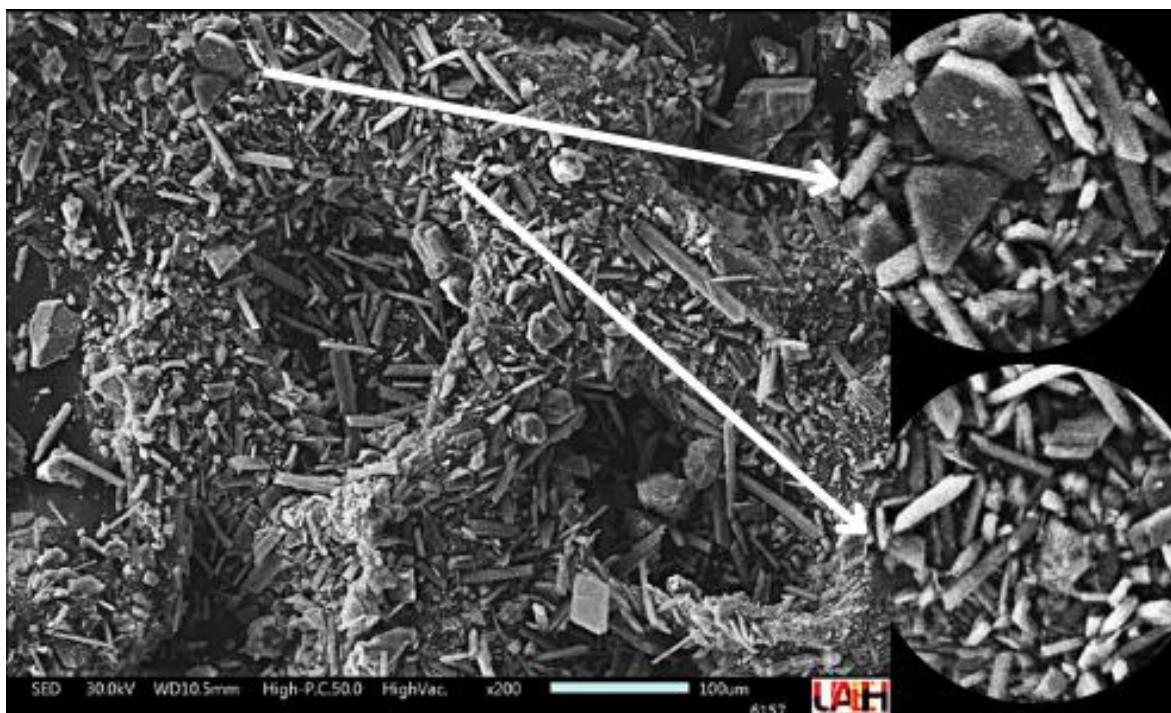
En la Figura 15 se observa el mapeo de los elementos presentes dentro de la Jarosita(Jal-Mn) como elementos mayoritarios presentes son: Ca, Pb, Si, Al, O, As, Mg, Ge, Zn. Mientras que como elementos minoritarios son: Ag, Cd, Cu, Ti, Na.





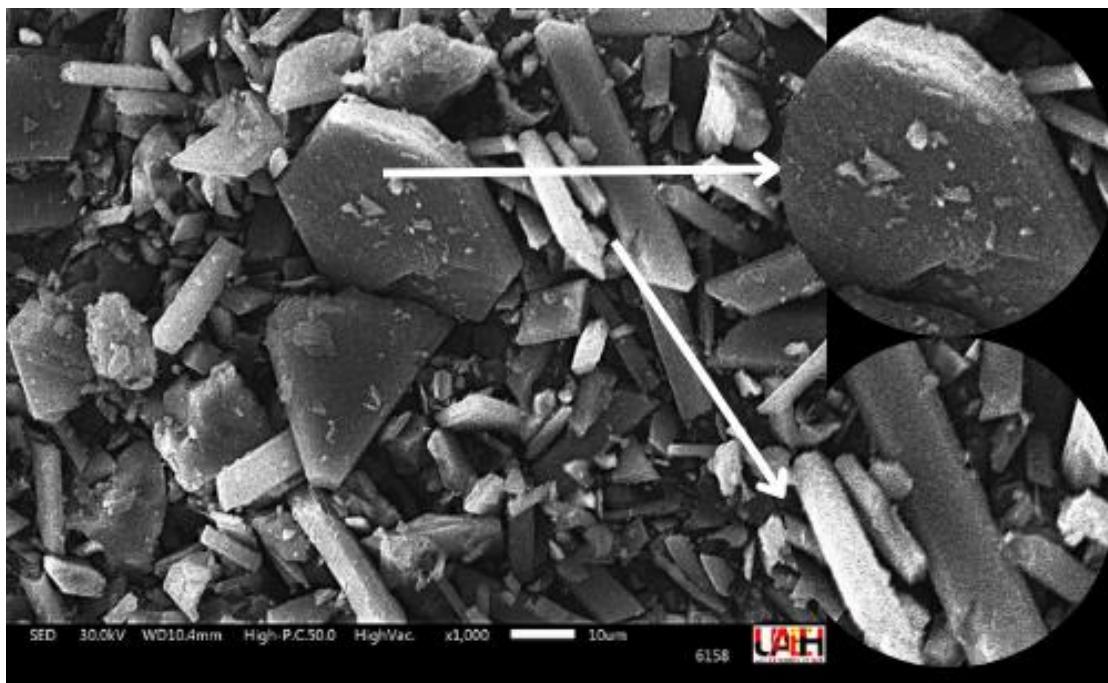
**Figura 16** Mapeo de elementos Jarosita (Jal-Mn)

En la figura 16 se puede observar el mapeo de los elementos presentes en la (Jarosita-Jal)-(Mn) antes mencionados.



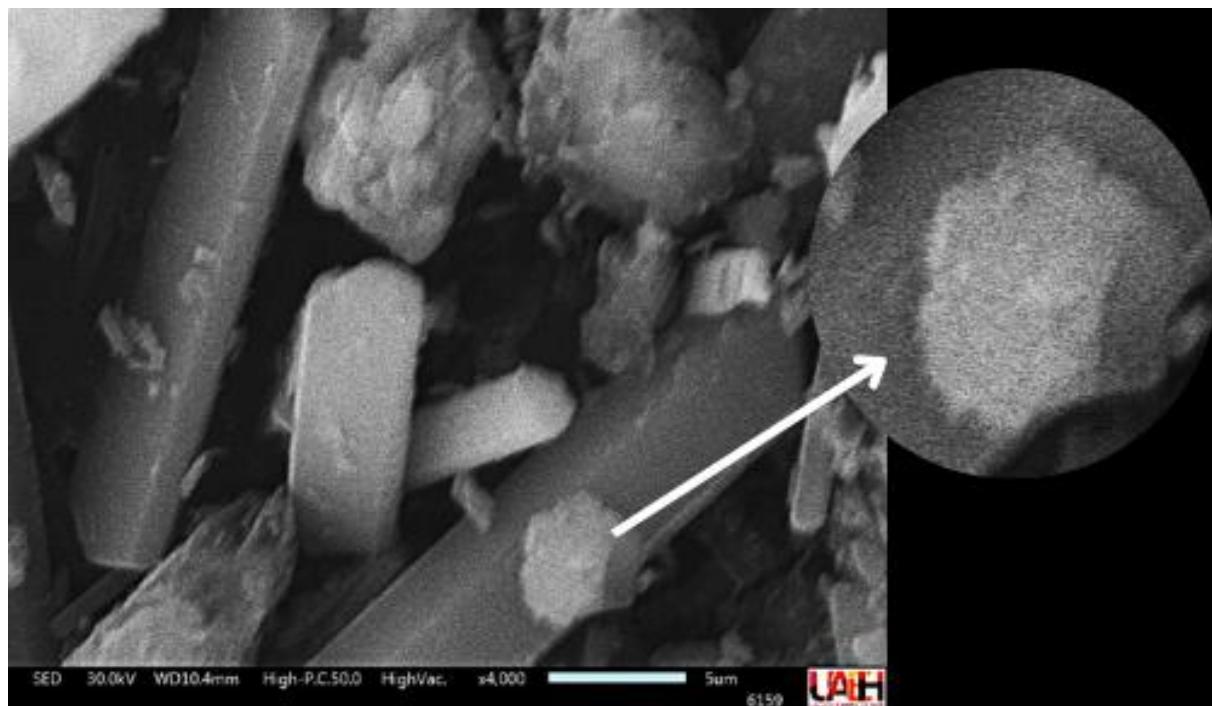
**Figura 17** Microscopia Jarosita (Jal- (Li-Mn)) aumento 200x

La Figura 17 corresponde a la Microscopia de la Jarosita (Jal) dopada con Li-Mn en un aumento de 200x, Se puede preciar diferentes tipos de cristales en el aumento de la parte superior se pueden ver cristales del tipo hexagonales, en el aumento de la parte inferior se pueden ver cristales aciculares correspondientes al oxido de silicio.



**Figura 18** Microscopia Jarosita Li-Mn aumento 1000x

En la microfotografía general aumentada a 1000x Figura 23, se puede ver partículas anedrales que son propias de la jarosita, estas las podemos observar en el aumento de la parte superior, mientras que en la parte inferior se observan cristales aciculares de silicio.



**Figura 19** Microscopia Jarosita Li-Mn aumento 4000x

En la figura 24 se parecia aumento de 4000x a la microfotografia donde se puede observar los cristales tabulares de aproximadamente de 3 micras de largo, y en el aumento de la figura se observa cristales del tipo hexagonales caracteristicos de la jarosita y el jal.

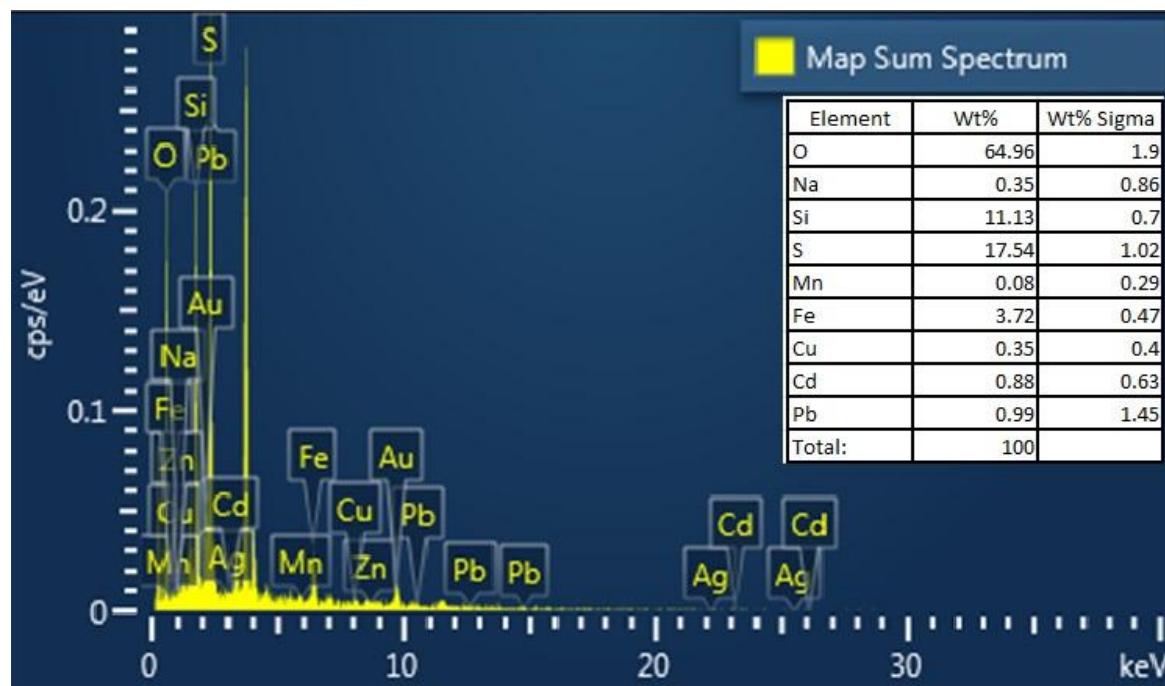
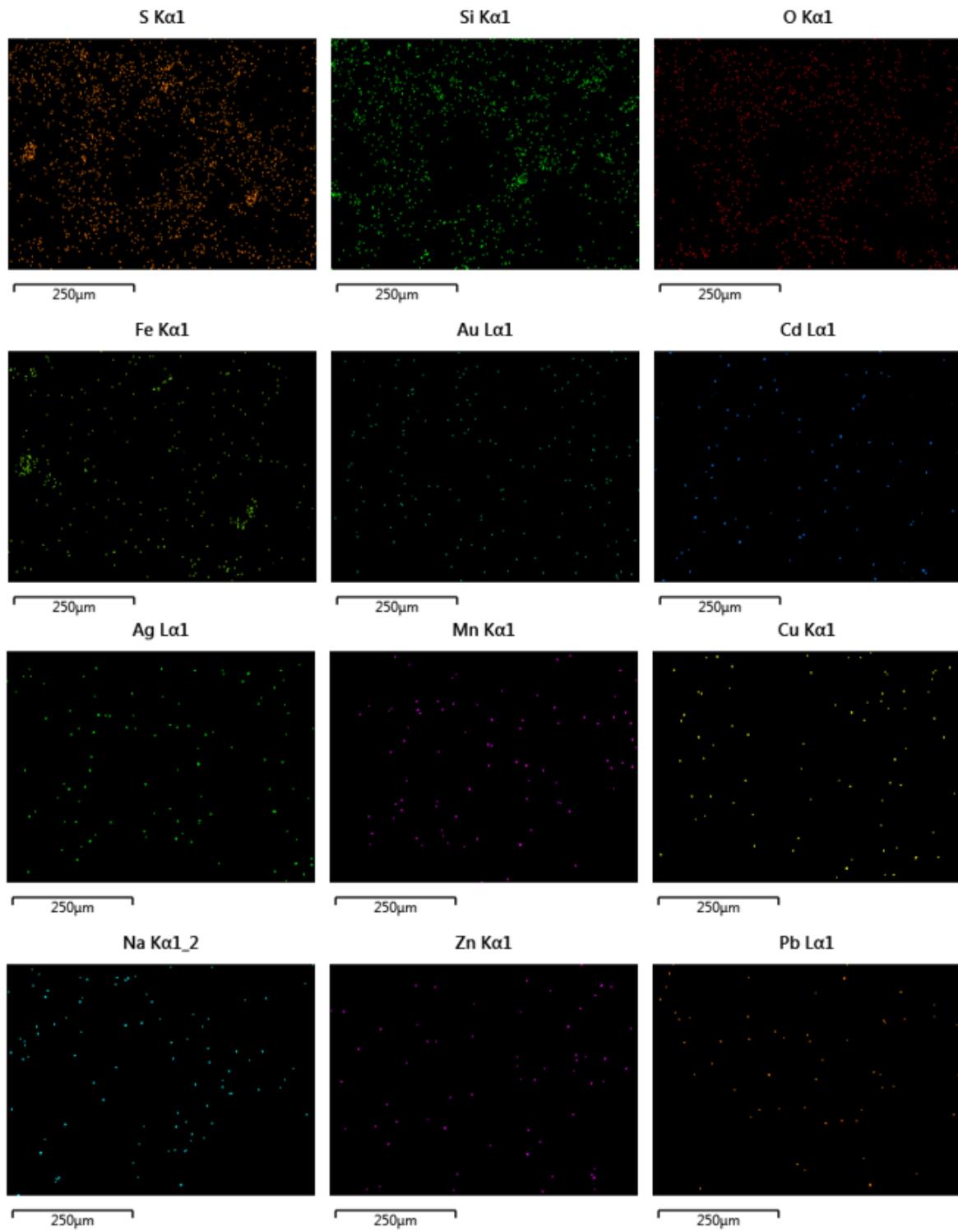


Figura 20 Mapeo de Jarosita-Jal-(Li-Mn)

Se puede observar en la Figura 25 la presencia de elementos presentes contenidos en la Jarosita como mayoritarios tenemos: O, Si, Pb, Au, Na, Fe a su vez también se puede ver los elementos minoritarios los cuales son: Cd, Ag, Zn, Mn.



**Figura 21** Mapeo de elementos (Jarosita-Jal)- (Li-Mn)

En el Mapeo de elementos (Figura 21) se observa la distribución de los elementos presentes los cuales se describieron anteriormente.

### **Pruebas de Conducción Eléctrica**

Para poder medir la corriente que se genera a partir de los jales se propone utilizar una celda galvánica como medio de conducción.

Una pila de Daniel la cual se basa en el principio de la oxidación de Zn a  $Zn^{+2}$  y la reducción de  $Cu^{+2}$  a Cu estos sumergidos en un medio electroquímico. La transferencia de electrones se lleva a través de un alambre conductor externo. Las barras de Zn y de Cu son los electrodos y se conectan mediante un cable. Por lo que los iones del electrolito del puente salino deben ser inertes respecto a las soluciones de las dos medias celdas y respecto a los electrodos.

Para poder realizar las pruebas se prepararon distintas muestras de cada una de las jarositas dentro de tubos capilares humedecidas con glicerina, se hicieron dos capilares por cada jarosita a los cual uno de ellos se dopó con grafito, mientras que el otro se dejó sin dopar.

Para poder hacer una celda de Danielle se colocaron dentro de un capilar la muestras de jarosita de un extremo y del otro lado se utilizaron distintos elementos como fueron Cu, Zn, Al, en el centro del capilar se colocó papel filtro que servirá como puente entre los ánodos y cátodos como se puede ver en la Figura 22 a estos se le agregaron glicerina como electrolito con la ayuda de un multímetro y caimanes se midieron los potenciales que estos arrojaron en la tabla 9 se pueden ver los resultados de estos.

**Tabla 5** Prueba con Grafito y diferentes electrodos**Jarosita Manganeso**

<b>Elemento de Referencia</b>	Sin Dopar	Dopado con Grafito
<b>Cobre</b>	0.02V	0.150V
<b>Aluminio</b>	0.110V	0.500V
<b>Zinc</b>	0.130V	0.780V

**Jarosita Litio**

<b>Elemento de Referencia</b>	Sin Dopar	Dopado con Grafito
<b>Cobre</b>	0.120V	0.155V
<b>Aluminio</b>	0.623V	0.620V
<b>Zinc</b>	0.856V	0.882V

**Jarosita Litio-Manganeso**

<b>Elemento de Referencia</b>	Sin Dopar	Dopado con Grafito
<b>Cobre</b>	0.080V	0.132V
<b>Aluminio</b>	0.534V	0.590V
<b>Zinc</b>	0.830V	0.847V

Con los datos obtenidos se encontró que la jarosita con mayor voltaje obtenido es la (Litio-Manganeso)-Jal, con respecto a las otras dos pruebas, el dopar con el grafito a pesar de que si incrementa el voltaje no es muy significativo por lo que se recomienda usar sin dopar.

Las pruebas anteriores se repitieron, pero usando grafito de grado laboratorio y manteniendo los mismos parámetros de la prueba anterior, estos resultados obtenidos se observan en la tabla 10.

**Tabla 6** Prueba de Conducción con diferentes elementos y Jarositas dopas con grafito**Jarosita Manganese**

<i>Elemento de Referencia</i>	<i>Sin Dopar</i>	<i>Dopado con Grafito</i>
<i>Cobre</i>	0.02V	0.160V
<i>Aluminio</i>	0.110V	0.525V
<i>Zinc</i>	0.130V	0.759V

**Jarosita Litio**

<i>Elemento de Referencia</i>	<i>Sin Dopar</i>	<i>Dopado con Grafito</i>
<i>Cobre</i>	0.120V	0.380V
<i>Aluminio</i>	0.623V	0.770V
<i>Zinc</i>	0.856V	0.985V

**Jarosita Litio-Manganese**

<i>Elemento de Referencia</i>	<i>Sin Dopar</i>	<i>Dopado con Grafito</i>
<i>Cobre</i>	0.080V	0.187V
<i>Aluminio</i>	0.534V	0.700V
<i>Zinc</i>	0.830V	0.922V

Se observa que la jarosita (Litio-Manganese)-Jal es la que sigue presentando un voltaje mas alto comparado con las otras dos pruebas , sin embargo, podemos notar que al usar grafito de grado laboratorio el voltaje obtenido es mayor comparado con el grafito normal, pero sigue siendo sin ser significativo por lo cual se tomó la decisión de trabajar el jal sin dopar con grafito.

## Prueba de Diferentes Diseños de Pilas

Para poder tener una medición certera del voltaje obtenido y poder darle una aplicación a esta, es necesario el tener un medio por el cual esta pueda ser transportada es por lo que se realizaron distintos prototipos para poder encontrar el óptimo para nuestras necesidades.

Para poder determinar la mejor estabilidad del material y el montaje como batería se hicieron diferentes diseños tomando la jarosita que mostró mejores resultados y voltajes más altos (Jarosita Li-Mn) a continuación en cada apartado se muestra cada una de ellas.

### Elaboración de Diseño 1

Se fabricó la primera pila en forma de empaquetamiento del mineral para obtener una batería, se realizó con un tubo de vidrio el cuál se le colocó en la parte central un papel filtro y de un extremo se colocó aluminio y en el otro la jarosita con el jal, se agregaron un cable en cada extremo para poder medir la corriente en la Figura 29 se puede ver un diagrama ilustrando la batería realizada. En la figura 30 se observa la primera batería.

Midiendo el voltaje con ayuda de un multímetro nos da un voltaje de 555mV como se observa en las figuras 29 y 30.

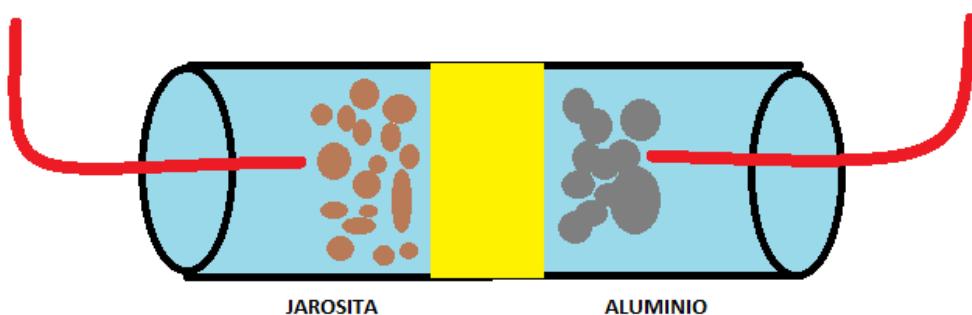


Figura 22 Diagrama primera pila



**Figura 23** Primera pila Li-Mn

### **Diseño 2 Jarosita Li-Mn**

Como segundo Diseño se seleccionó una placa de acrílico, por ser un material aislante de corriente permitiendo de esta forma tener una lectura sin interferencia y a su vez permitiendo colocar con mayor practicidad el ánodo y cátodo, para poder realizar las pruebas, en una placa de acrílico se realizó una perforación en la cual se agregó la jarosita con cloruro de sodio (NaCl) como electrolito, para poder medir la corriente se colocó una pieza de cobre en un extremo y en el otro aluminio para medir su voltaje qué el cual nos da un resultado de 555mV sin embargo la. Se muestra en la Figura 26.

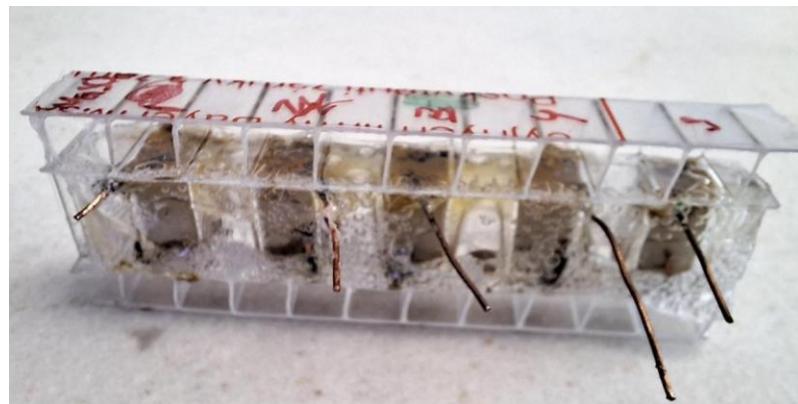


*Figura 24 Segunda Pila Li-Mn sobre una placa de acetato*

### **Diseño 3 Jarosita Li-Mn**

Como tercer diseño se optó por usar una placa de policarbonato ya que permite realizar más de una celda en una sola placa, utilizando las cavidades que ya presentan y a su vez permitiendo realizar cinco pruebas a la vez.

Se construyó en una placa de policarbonato entre cada separación se agregó la jarosita con Cloruro de Sodio (NaCl) hasta tener una consistencia húmeda de un extremo se colocó cobre (Cu) y del otro extremo aluminio (Al), para medir el voltaje cada una nos da 500mV al juntarlas como batería nos da 2.5V, se selló los extremos para mantener el medio húmedo. La podemos ver en la Figura 28.



**Figura 25** Cuarta Pila Li-Mn

## Pruebas con Diferentes Electrolitos

Con la finalidad de tener una comparación para determinar cuál es el mejor electrolito para emplear, por lo cual se procedieron hacer las celdas utilizando el ultimo diseño, se elaboraron seis celdas utilizando las mismas concentraciones esta prueba se realizó cuatro veces para poder medir una reproducibilidad en las siguientes tablas 11, 12, 13, 14 en las cuales se observa que existe un mejor rendimiento utilizando cloruro de potasio como electrolito.

**Tabla 7** Primera Comparación de Voltajes

Primera Comparación		
Numero de pila	Voltaje con NaSO4	Voltaje con KCl
1	0.617	0.622
2	0.615	0.550
3	0.616	0.570
4	0.618	0.565
5	0.608	0.540
6	0.611	0.480

**Tabla 8** Segunda Comparación de Voltajes

Segunda Comparación		
Numero de pila	Voltaje con NaSO4	Voltaje con KCl
1	0.480	0.558
2	0.558	0.550
3	0.503	0.512
4	0.504	0.560
5	0.543	0.545
6	0.520	0.510

**Tabla 9** Tercera Comparación de Voltajes

<b>Tercera Comparación</b>		
<b>Numero de pila</b>	Voltaje con NaSO4	Voltaje con KCl
1	0.428	0.585
2	0.370	0.548
3	0.587	0.550
4	0.320	0.550
5	0.412	0.535
6	0.384	0.580

**Tabla 10** Cuarta Comparación de Voltajes

<b>Cuarta Comparación</b>		
<b>Numero de pila</b>	Voltaje con NaSO4	Voltaje con KCl
1	0.289	0.480
2	0.390	0.547
3	0.374	0.465
4	0.340	0.544
5	30.420	0.390
6	0.343	0.500

### Batería de Jarosita

Con el propósito de medir el voltaje como una batería se utilizó el segundo diseño utilizando una conexión en paralelo, la forma que se elaboró fue en una placa de acetato de 3mm de espesor y de 6cm de largo con 2cm de ancho, se perforaron 8 cortes como se puede observar en la ilustración en la cual se agregó en cada una la jarosita a las cuales igual se le coloco un cable de cobre y en el otro extremo aluminio para poder medir su voltaje, cada sección nos da 250mV y al juntarlos se obtiene 2V. (Figura 32).

Con las pilas construidas anteriormente se fabricó una batería con 6 pilas para analizar la influencia de la resistencia interna de cada pila en el potencial final, los resultados se muestran en la tabla 15.



**Tabla 11** Voltajes de Batería de Jarosita

Numero de Batería	Voltaje obtenido
1	3.4 V
2	2.1 V
3	3.6 V

## **Experimentación de voltaje de jal sin dopar**

Para evaluar el rendimiento del jal sin dopar con jarosita. Se procedió hacer la misma experimentación solo con los residuos mineros (Jal) sin agregar a la jarosita, con lo anterior se encontró que los desechos mineros solo presentan voltaje,

Por lo cual en un tubo de vidrio se replicó el primer diseño de pila con jarosita se colocó de un extremo aluminio y en el centro papel filtro y en el otro se agregó jal, se les agrego cloruro de potasio con los cables de cobre para poder medir su voltaje, se elaboraron seis celdas, y se hizo por triplicado la experimentación, los resultados se muestran en las siguientes tablas 16, 17, 18. Al comprarse los resultados con los resultados del jal dopado con jarosita se encuentra que el voltaje es similar por lo que se optó por replicar la experimentación utilizando solo los desechos mineros.

**Tabla 12 Primera Prueba de Voltaje** **Tabla 13 Segunda Prueba de Voltaje** **Tabla 14 Tercera Prueba de Voltaje**

Primera Prueba		Segunda Prueba		Tercera Prueba	
Numero de pila	Voltaje obtenido	Numero de pila	Voltaje obtenido	Numero de pila	Voltaje obtenido
1	0.624 V	1	0.450 V	1	0.128 V
2	0.630 V	2	0.510 V	2	0.250 V
3	0.655 V	3	0.490 V	3	0.486 V
4	0.620 V	4	0.480 V	4	0.478 V
5	0.623 V	5	0.450 V	5	0.448 V
6	0.627 V	6	0.425 V	6	0.550 V

### **Prueba de jal como Electrolito**

Con los resultados obtenidos en las pruebas anteriores, se optó por evaluar el jal realizando dos celdas sin colocar papel filtro, utilizando cloruro de potasio como electrolito en una y en la segunda celda se utilizó agua desionizada, a ambas colocando un conducto de cobre y uno de aluminio para poder medir la presencia de voltaje los resultados de esta medición las podemos ver en la tabla 19.

Donde se realizaron seis muestras puede de esta forma teniendo una comparación mayor, donde se obtuvo que utilizando agua desionizada el voltaje que se obtiene es mayor comparado con el cloruro de potasio e incluso más estable.

**Tabla 15 Voltaje como electrolito sólido**

Numero de Pila	Voltaje con agua desionizada	Voltaje con KCl
1	0.500 V	0.505 V
2	0.485 V	0.508 V
3	0.515 V	0.498 V
4	0.498 V	0.399 V
5	0.505 V	0.502 V
6	0.510 V	0.489 V

### ***Optimización de jal y agua desionizada***

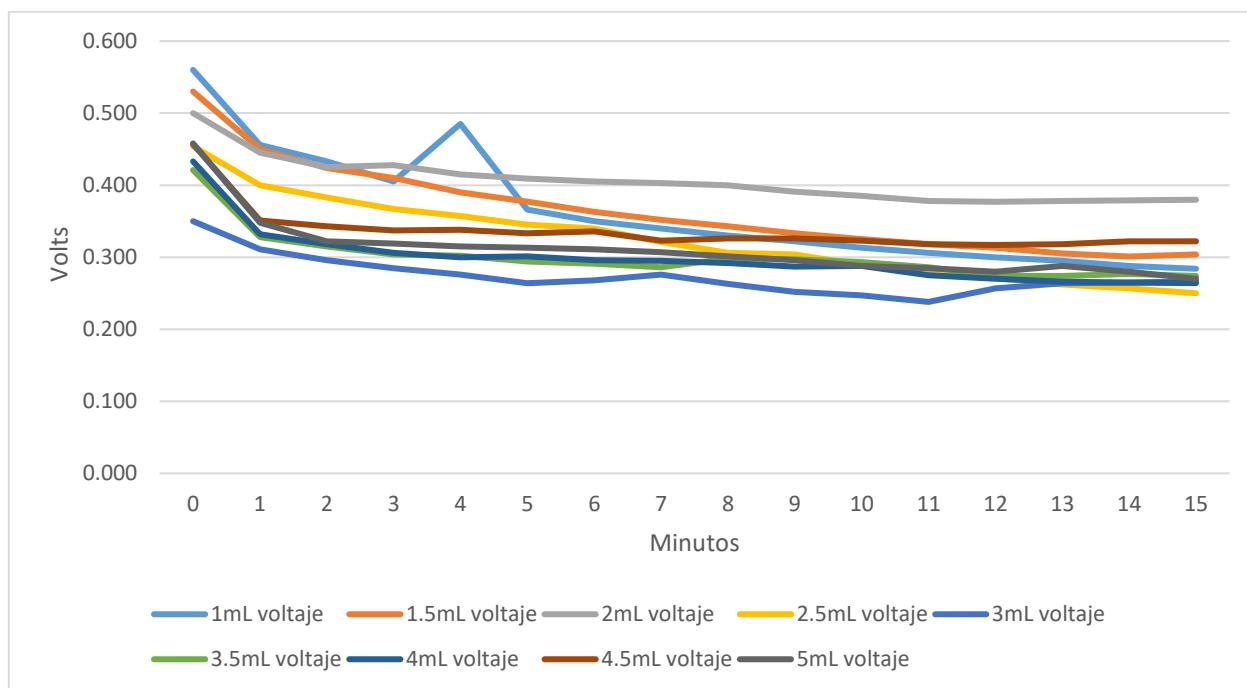
Al encontrarse resultados muy similares al utilizarse agua desionizada o cloruro de potasio, se procedió a utilizar agua desionizada con el fin de reducir costos y practicidad de la experimentación, para obtener un voltaje con mayor estabilidad se evaluó la relación de los desechos mineros con el agua desionizada, esto con el fin de poder determinar cuál es la concentración más optima de los residuos mineros y el agua desionizada.

Para poder llevar acabo esta prueba, se colocó en un vial (Figura 19), cierta cantidad de jal esta se fue modificando en cada experimentación, a la cual se le iba agregando el agua desionizada las pruebas se hicieron por quince minutos midiendo su voltaje cada minuto se inició con 1ml aumentando 0.5ml sucesivamente hasta llegar a los 5ml. Sin embargo, también se evaluaron bajando la concentración de jal y agua desionizada. A continuación, se muestran los gráficos las pruebas con más representativas dejando el resto de ellas en el anexo.



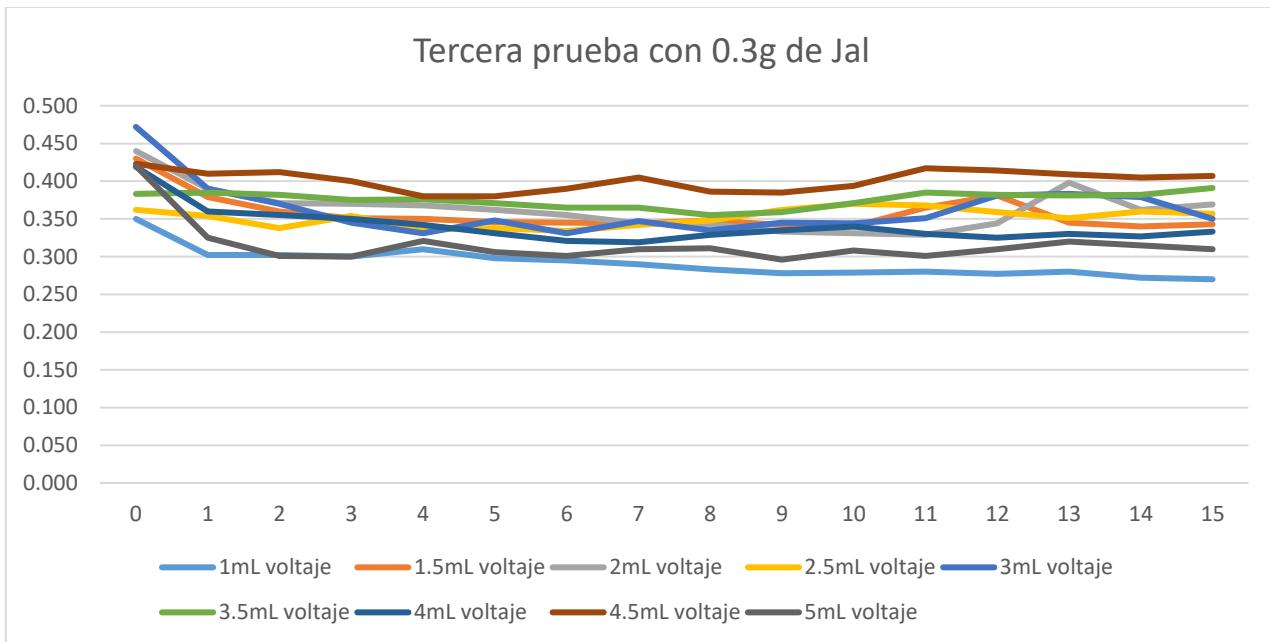
**Figura 26** Optimización de Jal

En el Grafico 1 se observa el primer experimento en donde se colocó 0.1 gramos de jal dentro del vial al cual se le agrego 1 ml de agua desionizada y con la ayuda de un multímetro se midió el voltaje que este generaba cada minuto por un lapso de 15 minutos, en el cual el valor más alto obtenido es de 0.560V utilizando un ml de agua desionizada y el valor mínimo fue de 0.238V cuando se utilizó 3ml.



**Gráfico 1** Primera Prueba con 0.1g de Jal

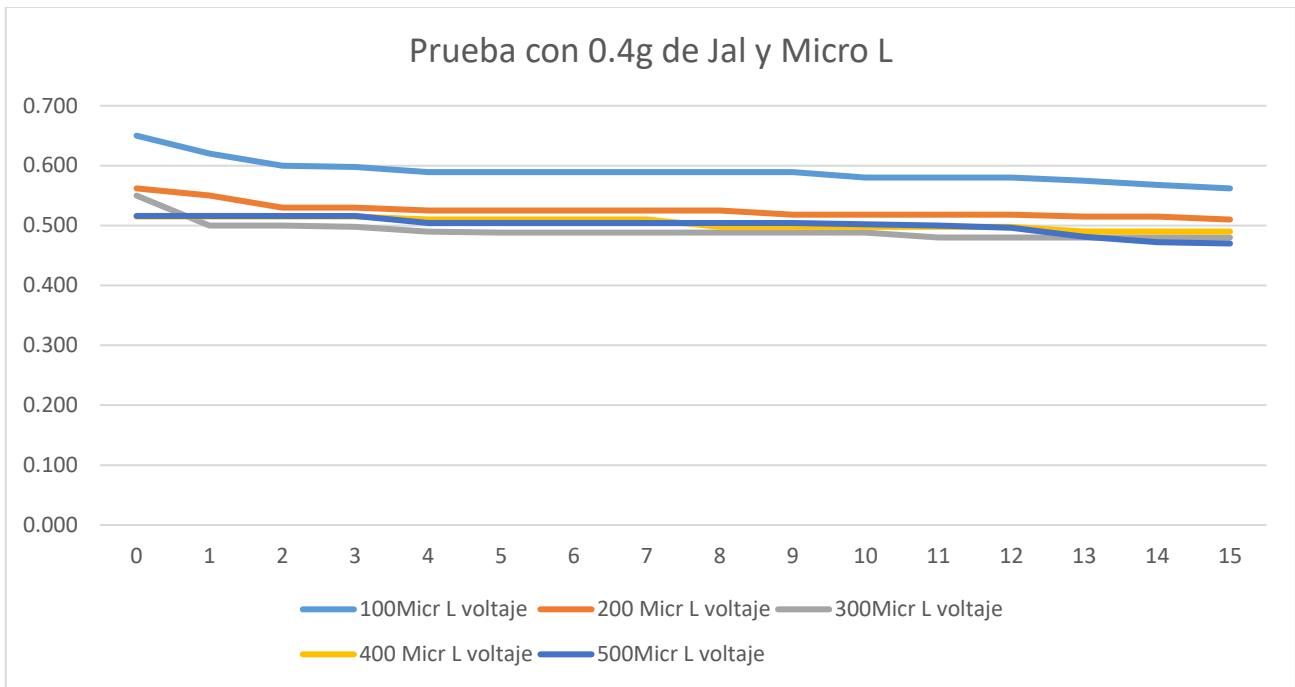
Al agregar 0.3 gramos de jal notamos un cambio en la estabilidad del voltaje generando una variación en este como lo podemos observar en el grafico 3, dándonos un valor máximo de 0.472V utilizando 3ml y un valor mínimo 0.270 V



**Gráfico 2** Tercera prueba con 0.3g de Jal

Se realizo la prueba con 0.4 gramos de jal y agregando 100 microlitros cada 15 minutos los resultados obtenidos se muestran en la Grafica 3, obteniendo un valor

mayor de 0.650V usando 100 microlitros, y un valor menor 0.470V usando 500 microlitros, comparando con los resultados anteriores se muestra una estabilidad en el voltaje.



**Gráfico 3** Prueba con 0.4g de Jal y Microlitros

Con las pruebas mostradas anteriormente se determinó que la mejor concentración de jal y agua desionizada es la que nos da la prueba con 0.4g de jal y 100 Microlitros, ya que con esta concentración nos da un voltaje estable y a su vez es de lo mayor voltaje obtenido.

### **Pruebas de Curvas de descarga**

Para poder evaluar la vida útil de una batería se tiene que considerar diferentes factores uno de los más importantes es el tiempo en el que nos dará un voltaje constante, para tener un tiempo certero de esto, se realiza una curva de descarga la cual consiste en medir un voltaje inicial y el final en un intervalo de tiempo esto con el fin de saber cuál será el promedio de energía eléctrica que nos estar entregado.

Para poder llevar acabo esta prueba se procedió a realizar pilas tomando en cuenta la concentración anteriormente encontrada, para realizar el prototipo se tomó el primer modelo de pilas hechas anteriormente, pero estas modificando el tipo de sellado, las cuales colocaron dentro de una placa de acetato y se sellaron utilizando resina epóxica para mantener la humedad dentro de ella como se muestra en la Figura 30.

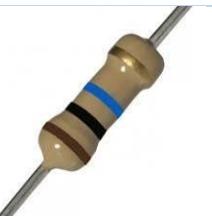


**Figura 27** Diseño de Pila para Curvas de Descarga

Una vez realizadas las pilas se seleccionaron diferentes resistencias para poder medir el tiempo de vida cada una de las pruebas en la tabla 16 se muestran gráficamente cuales fueron las ocupadas y el valor en ohms de cada una, con estas se hicieron las curvas las cuales se llevaron a cabo por triplicado.

**Tabla 16** Valores de Resistencias utilizadas

<b>Resistencias Utilizadas</b>	
<b>1220kΩ</b>	
<b>1330kΩ</b>	
<b>1560kΩ</b>	
<b>2Ω</b>	
<b>4.3Ω</b>	

<b>5.4Ω</b>	
<b>11Ω</b>	
<b>51Ω</b>	

## Primeras Curvas de descarga

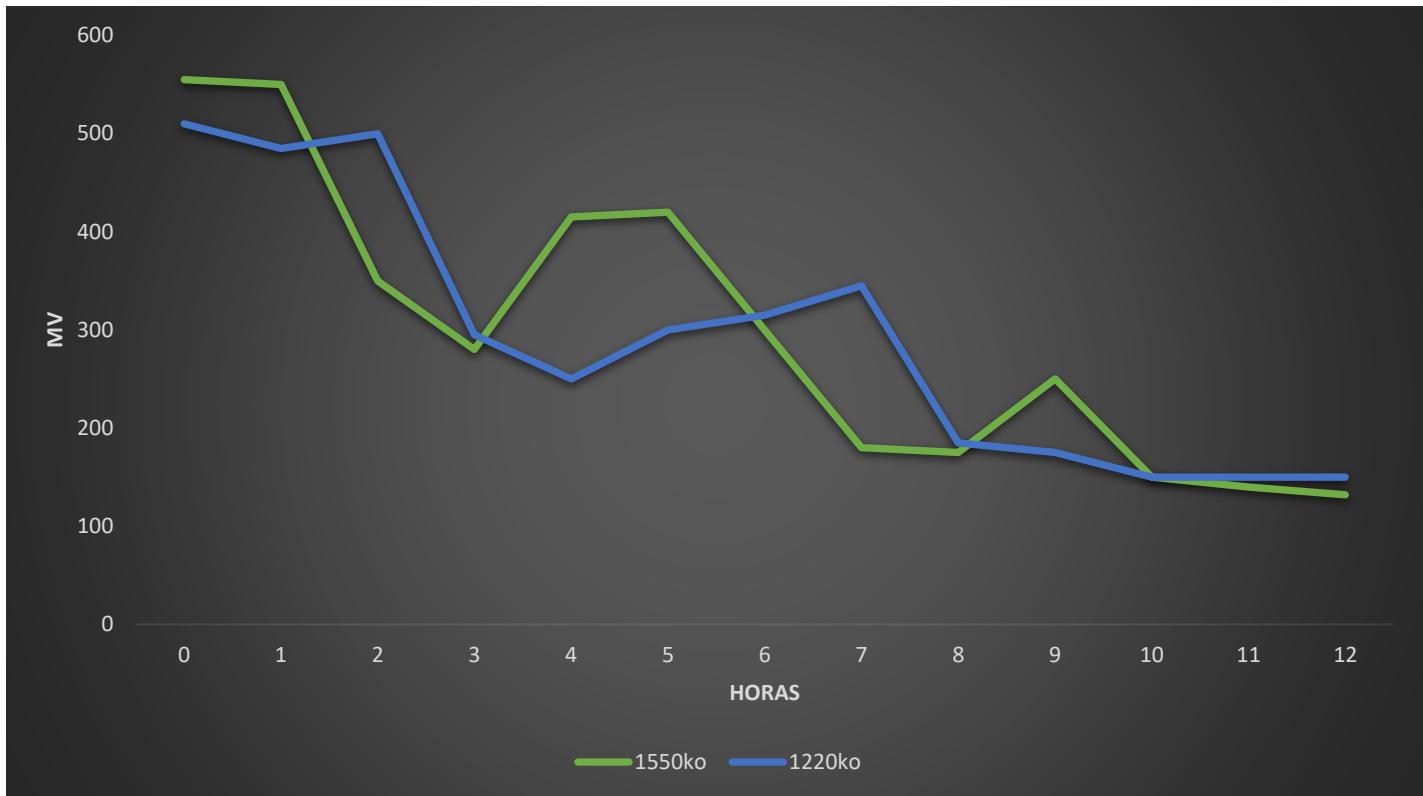
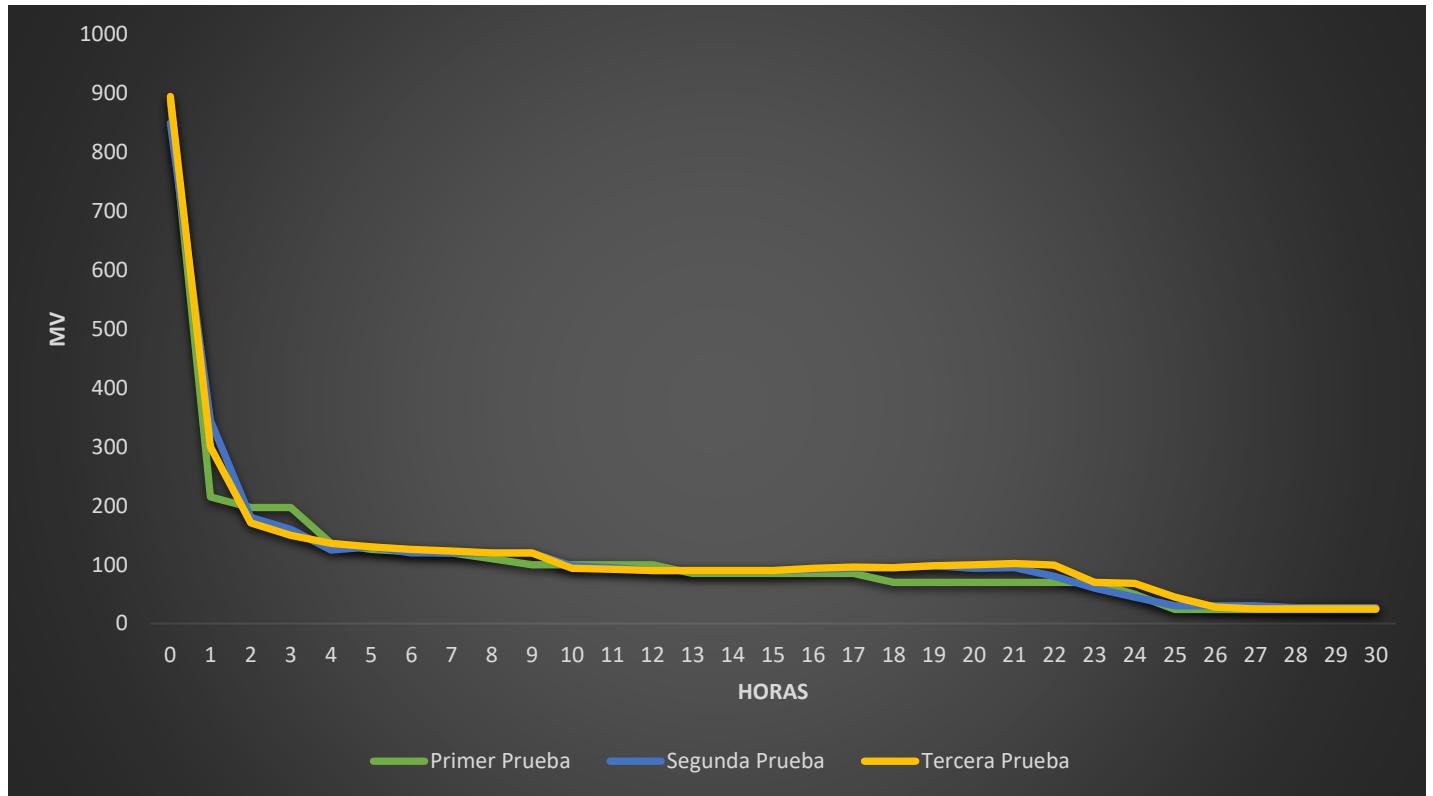


Gráfico 4 Descarga con resistencia de 1220KΩ y 1550 KΩ

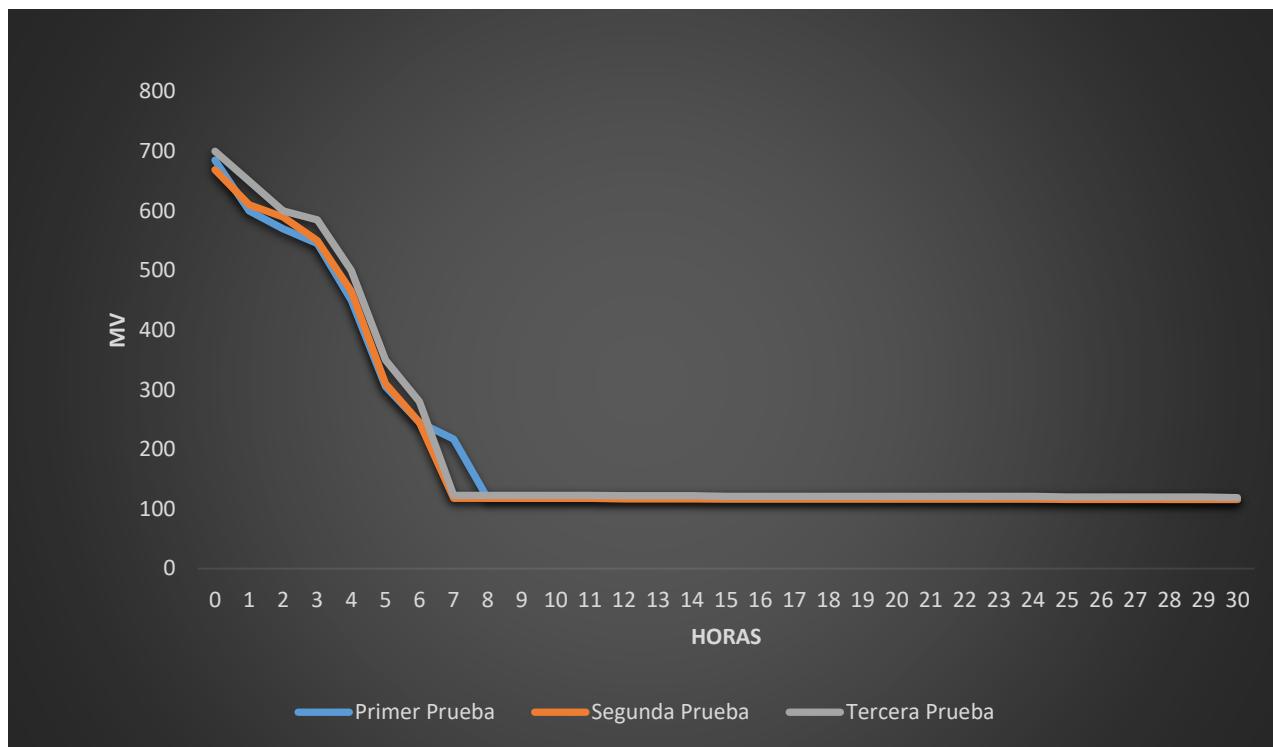
En el Grafico 4 podemos apreciar las curvas de descarga con diferentes resistencias una de 1220 kilo ohm y una segunda con 1550 kilo ohm, en un tiempo de doce horas, en ambos casos el comportamiento es similar presentando variaciones de carga y descarga impidiendo el poder realizar una lectura correcta, estos cambios se le asocian directamente a los carbonatos de calcio que se encuentran presentes en los jales.

Por lo cual para poder eliminar las variaciones de voltaje y poder realizar la curva de descarga de forma correcta, se les dio un tratamiento térmico a los desechos mineros, el cual consistió en agregar en un reactor 500 gramos de jal previamente pasado por una malla de 500 micras, agregándole 500ml de agua desionizada llevándolo a una temperatura de 80°C por un tiempo de 30 min, de esta manera poder eliminar los carbonatos presentes que provocan los cambios en el voltaje.

## Segundas Curvas de Descarga



En el Grafico 6 podemos apreciar la curva de descarga la cual se realizó por triplicado por treinta horas, utilizando una resistencia de 1220 Kilo Ohm, se puede observar que se replica el mismo comportamiento, durante las primeras cinco horas se descarga hasta estabilizarse en un rango de 120mV-130mV, nos da un promedio de 119.46mV, teniendo como valor máximo es de 895mV y mínimo valor es de 24mV.



**Gráfico 6** Descarga con resistencia de 1330 KΩ

Se puede observar en el Gráfico 7 la curva de descarga con una resistencia de 1330 Kilo Ohm se realizó durante treinta horas y por triplicado, se aprecia que durante las primeras siete horas es el tiempo que toma para estabilizarse en un voltaje de 118mV-123Mv esto por un promedio de veintitrés horas, con un promedio general de 205.75mV, teniendo como valor máximo de 700mV y con un valor mínimo de 116mV

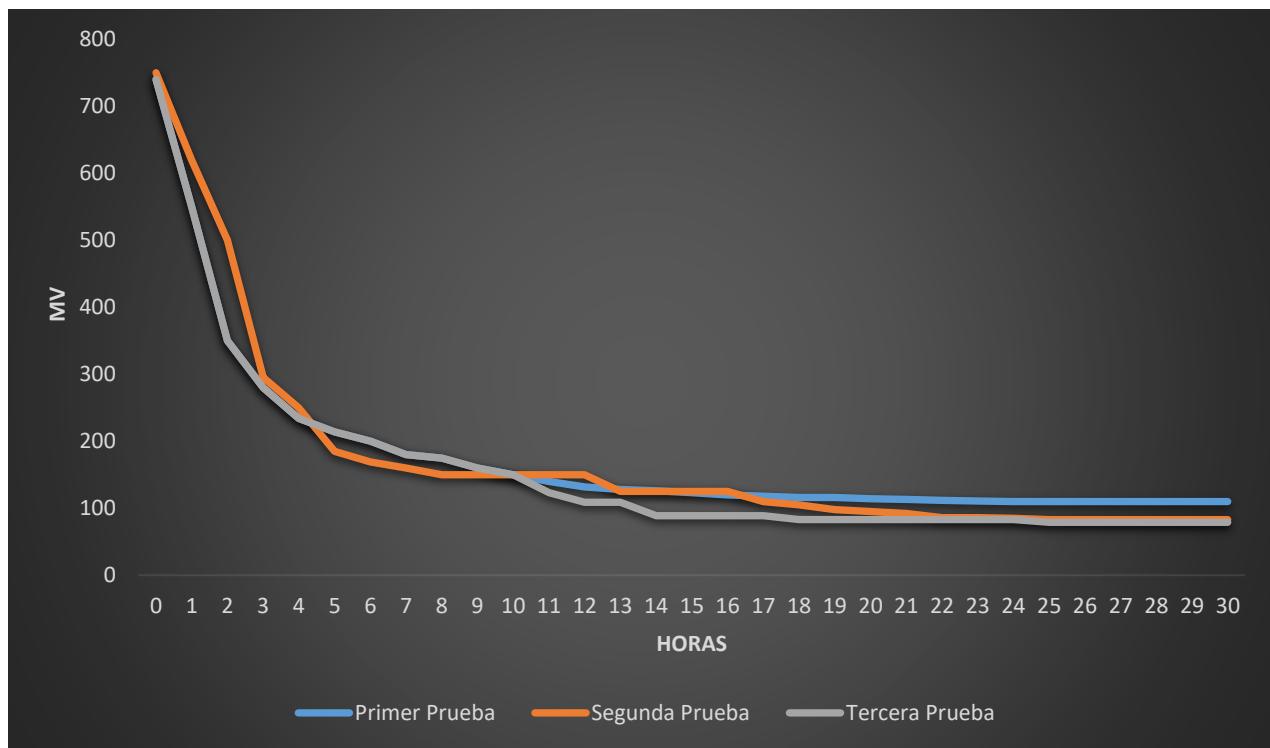


Gráfico 7 Descarga con resistencia de 1560 KΩ

La curva de descarga con 1560 Kilo Ohm se ve en la Gráfica 8, podemos ver una primera descarga entre las primeras cinco horas, estabilizándose hasta las catorce horas con un voltaje de 125mV, teniendo un promedio de 171mV, teniendo como valor máximo de 750mV y como valor mínimo 79mV.

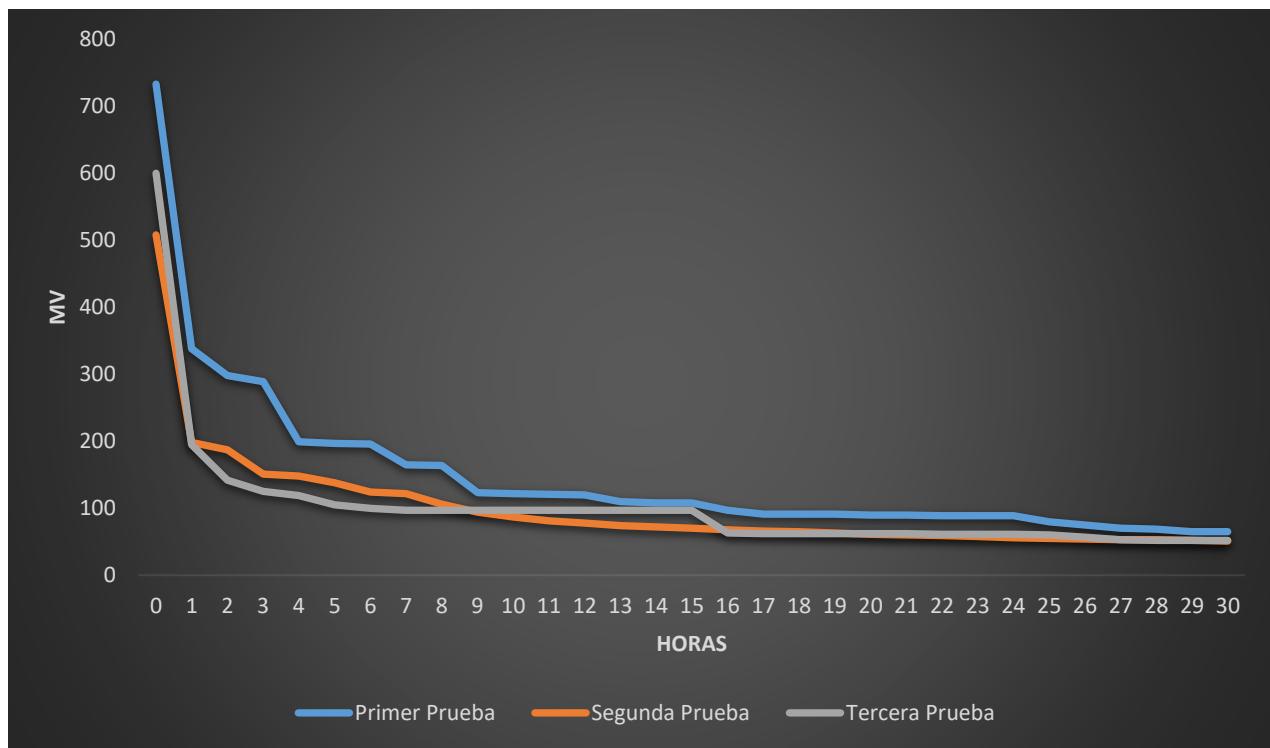
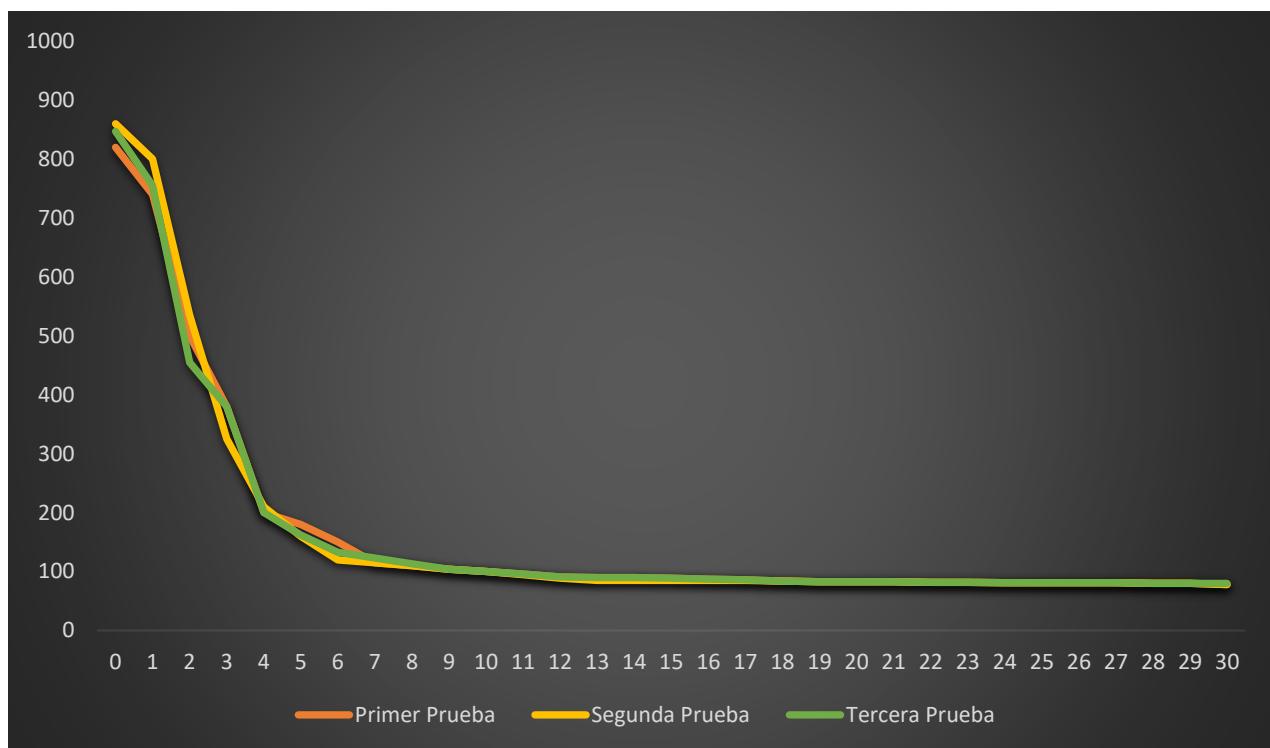


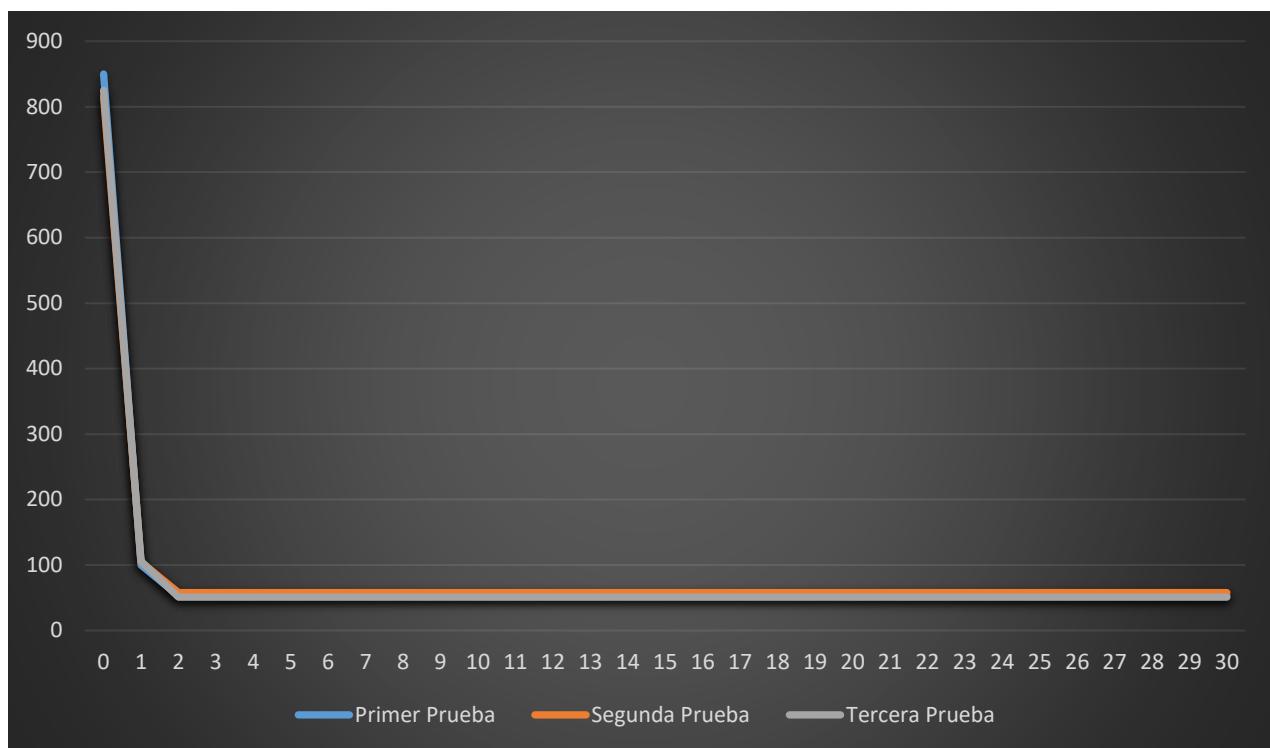
Gráfico 8 Descarga con resistencia de 2 MΩ

Como se puede observar en el Gráfico 9, un ligero cambio en la curva de descarga cuando se utiliza una resistencia de dos mega ohm la primer prueba es un poco distintas a las posteriores, más sin embargo las tres presentan un tiempo de descarga antes de estabilizarse, tiene una primer caída durante la primer hora estabilizándose con un valor promedio de 155mV, y vuelve a tener una segunda descarga pasando las dieciséis horas estabilizándose en un promedio de 78mV hasta las 27 horas que tienen una descarga estabilizándose entre los 50mV-60mV, como valor promedio tenemos 118mV, alcanzando un valor máximo de 733mV y un valor mínimo de 51mV.



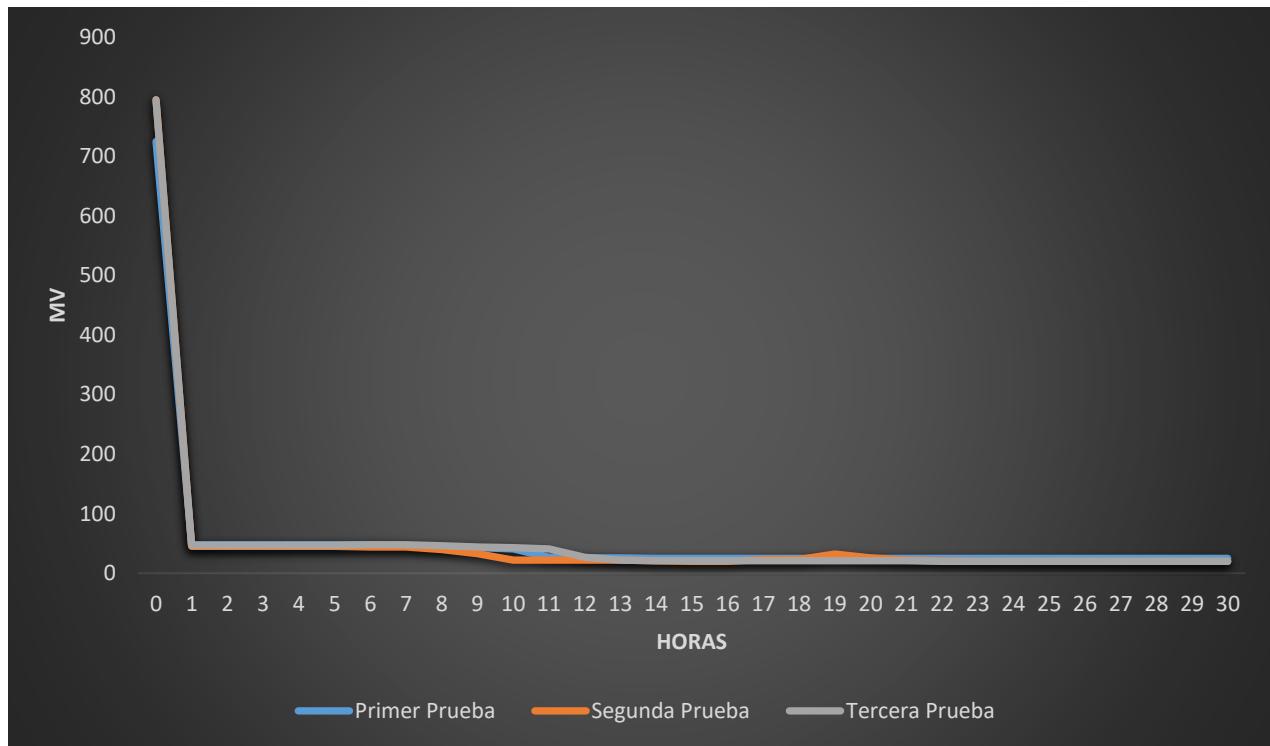
**Gráfico 9** Descarga con resistencia de 4.3 MΩ

Al utilizar una resistencia de 4.3 Mega Ohm tenemos una descarga durante las primeras cuatro horas como se puede apreciar en el Gráfico 10, alcanzando una estabilidad de un promedio de entre 200mV-100mV estos hasta pasar la décima hora volviendo a tener una estabilidad promedio de 85mV hasta finalizar el experimento, se obtuvo un valor de trabajo promedio de 164mV, se alcanzó un valor máximo de 860mV y un valor mínimo de 78mV.



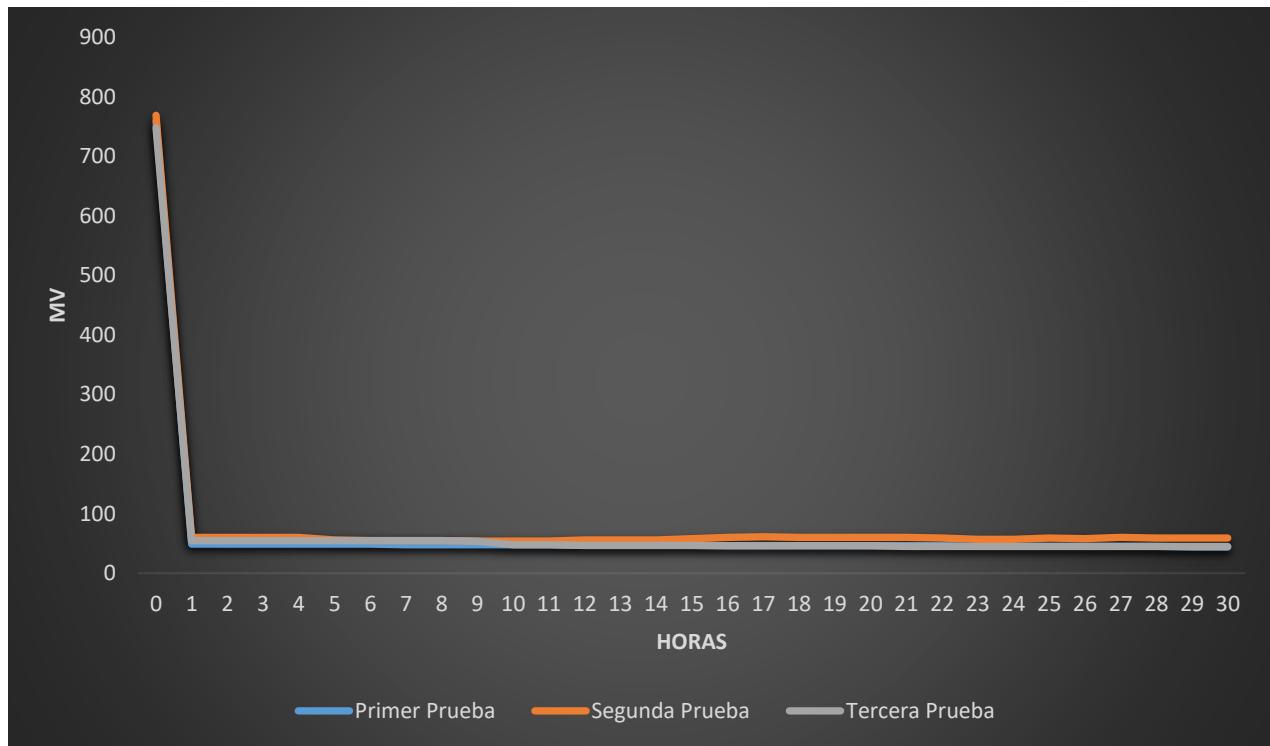
**Gráfico 10** Descarga con resistencia de 5.4 MΩ

En el Grafico 11 podemos ver una descarga más rápida al utilizar una resistencia de 5.4 Mega Ohm teniendo una descarga rápida durante la primera hora pasando de un valor de 800mV en promedio a 100mV, y en la segunda hora estabilizándose en un promedio de 55mV hasta el término del experimento, tenemos como valor máximo 850mV y un valor mínimo de 51mV, teniendo un valor de trabajo promedio de 60mV.



**Gráfico 11** Descarga con resistencia de 11MΩ

Como se puede apreciar en el Grafico 20 utilizando una resistencia de 12 Mega Ohm tenemos una descarga muy rápida en la primera hora dejándonos un voltaje de trabajo de 45mV en promedio, pasando nueve horas se estabiliza en 25mV en promedio hasta el término del trabajo, tenemos un valor promedio de trabajo de 54mV, alcanzando un valor máximo de 790mV y como valor mínimo de 20mV.



**Gráfico 12** Descarga con resistencia de  $51\text{M}\Omega$

Al aumentar la resistencia la descarga pasa en la primera hora como se puede ver en el Gráfico 13 Mega Ohm, estabilizándose en un promedio de 48mV hasta terminar el experimento. Se obtuvo un valor promedio de trabajo de 73mV, con valor máximo de 769mV y un valor mínimo de 44mV.

Comparando las curvas de descarga podemos observar que se necesita más tiempo o una resistencia mayor para poder descargar por completo la pila, esta parte ya no se pudo llevar a cabo por falta de tiempo.

## Conclusiones

- ❖ Con el trabajo previo podemos concluir que a partir de los elementos presentes en los desechos mineros de la presa Santa María de Zimapán Hidalgo se puede obtener energía eléctrica, utilizando el jal como un electrolito sólido el cual se puede utilizar para poder realizar pilas con un voltaje de 0.6 Volts.
- ❖ El agregar los desechos mineros con la jarosita presentan una buena unión entre ambos, sin embargo, esto no incrementa de forma muy notable el voltaje que se puede extraer de ellos, por lo cual no es viable realizarlo ya que haciendo este proceso se incremente su costo y por lo cual no sea rentable.
- ❖ Para poder obtener el mejor rendimiento en cuanto a voltaje en el electrolito sólido debemos tomar en cuenta el porcentaje de Jal y agua que se utilizara ya que si el porcentaje de humedad es mayor u en su caso menor el voltaje obtenido será de menor valor, y de la misma forma ocasionando un rendimiento de menor tiempo.
- ❖ Para poder tener un voltaje sin que presente variaciones, se tiene que eliminar los carbonatos presentes en los desechos mineros, ya que estos ocasionan vacíos que no permiten que fluya de manera correcta la energía.
- ❖ El voltaje que se genera se puede aumentar cambiando los cátodos en la pila, algunos de los sugeridos son a base de aluminio o zinc con los cuales se puede hasta duplicar el voltaje final.
- ❖ El tamaño de partícula en los desechos mineros también influye para poder obtener un buen resultado el recomendado es pasando por una malla de quinientas micras, para poder tener una mejor compactación y absorción al realizar la pila.

- ❖ El sellado de la pila también es un factor importante ya que si no se realiza de una forma correcta se secará el electrolito sólido provocando de esta manera que el voltaje de trabajo se pierda.
- ❖ Se propone estudiar la capacidad de recargar las pilas una vez que se sequen el poder volver a humedecer y ver cuantas veces se puede volver a recargar
- ❖ El cambio de temperaturas al elaborar la pila puede ser un factor que afecte ya que al encontrarse a temperaturas bajas el voltaje obtenido final puede ser menor, y en temperaturas altas se obtiene un mayor voltaje.

## BIBLIOGRAFÍA

Caballero, A. A. (2007). *Minerales de los distintos distritos mineros metálicos, Zimapán, Pachuca-Real del monte, Molango y su aplicación didáctica*. Pachuca Hidalgo.

Desconocido. (01 de Abril de 2016). *Técnicas para la Caracterización de Materiales*. Obtenido de *Técnicas para la Caracterización de Materiales*.

Eleazar Salinas, M. R. (17 de Marzo de 2015). *v46n1a12.pdf*. Obtenido de *v46n1a12.pdf*: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rsqm/v46n1/v46n1a12.pdf>

Fimbres, O. (28 de Julio de 2019). *Linked In*. Obtenido de *Linked In*: <https://es.linkedin.com/pulse/las-presas-de-jales-y-sus-caracter%C3%ADsticas-omar-fimbres>

*Fluorescencia de rayos X: tecnología de XRF explicada*. (15 de Enero de 2023). Obtenido de *Malvernpanalytical.com*: <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/xray-analysis/x-ray-fluorescence#:~:text=La%20fluorescencia%20de%20rayos%20X%20es%20una%20t%C3%A9cnica%20anal%C3%ADtica%20que,%C3%ADquidos%2C%20lodos%20y%20polvos%20suelos>

Frías, R. L. (2003). La Jarosita una andaluza universal. *Historia natural*, 60-61.

J.R.Serralde-Lealba, E.-S. i.-A.-R. (2022). Síntesis y caracterización de Jarosita dopada con calcio. *VI Seminario Regional de Materiales Avanzados*, (pág. 1). Pachuca Hidalgo.

Jerry M. Bigham aF. Sandy Jones a, B. Ö. (2010). Characterization of jarosites produced by chemical synthesis over a temperature. *International Journal of Mineral Processing*, 121-128.

lepinettema. (03 de Marzo de 2004). *jaro1.jpg*. Obtenido de *jaro1.jpg*: [http://tierra.rediris.es/merge/hidrotermalismo/jarosite\\_HN.pdf](http://tierra.rediris.es/merge/hidrotermalismo/jarosite_HN.pdf)

LOPEZ, J. S. (17 de Julio de 2008). *INVENTARIO MINERO DE ZIMAPAN*. Obtenido de *INVENTARIO MINERO DE ZIMAPAN*: [https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTécnicos/InventariosMinerosWeb/T1308SOL0004\\_01.PDF](https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTécnicos/InventariosMinerosWeb/T1308SOL0004_01.PDF)

Mexicano, S. G. (20 de Abril de 2022). *Directorio-Miner-2022.pdf*. Obtenido de *Directorio-Miner-2022.pdf*: <https://minedocs.com/22/Directorio-Miner-2022.pdf>

N. G. Picazo-Rodríguez 1, \*., .-P.-A. (2022). Use of Thermally Modified Jarosite for the Removal of Hexavalent Chromium by Adsorption. *crystals*, 1-11.

Quimica.Es. (2023). *Química.Es*. Obtenido de *Química.Es*: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Jarosita.html>

RÁUL MORENO TOVAR, J. T. (2012). INFLUENCIA DE LOS MINERALES DE LOS JALES EN LA BIOACCESIBILIDAD DE ARSÉNICO, PLOMO, ZINC Y CADMIO EN EL DISTRITO MINERO

ZIMAPÁN, MÉXICO. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 203-218. Obtenido de Revista Internacional de Contaminación Ambiental.

Electrolitos de estado sólido, una solución a los problemas de seguridad de las baterías de ion de litio. (2022, October 19). Imdea.org. <https://materiales.imdea.org/electrolitos-de-estado-solido-una-solucion-a-los-problemas-de-seguridad-de-las-baterias-de-ion-de-litio/>

Breña Naranjo, A., & Zetina Robles, E. F. (2022). Plan Nacional de Atención y Manejo de Presas de Jales en México. Perspectivas IMTA, 3(33). <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2022-33>

Extraído De Peter, F. :, Mohr, J., & Taylor, B. N. (1999). Recommended Values of the Fundamental Physical Constants, en. En J. Phys. Chem. Ref. Data (Vol. 28).

La. (s/f). Introducción.  
Química Física Atkins. (s/f).

## Anexo

### ***La energía en la termodinámica***

La energía es aquella que se produce mediante las reacciones químicas, y con ello, se puede considerar el trabajo eléctrico. El cual se define como el cambio infinitesimal en la cantidad de carga, que se desplaza a través de un potencial eléctrico (Extraído De Peter et al., 1999).

El trabajo eléctrico se lleva a cabo por los movimientos de electrones ya que estos tienen una carga específica de  $1.602 \times 10^{-19}$  C.

Cuando una reacción química sucede sin que se le suministre una energía externa se dice que es un proceso espontáneo. Este puede ocurrir de una forma rápida o lenta, una forma de poder predecir si una reacción será espontánea o no es utilizando la segunda Ley de la termodinámica la cual nos involucra los cambios de entropía del sistema y el cambio de entropía en el entorno, esto nos lleva a la propiedad de la energía libre de Gibbs. Lo anterior se representa matemáticamente de la siguiente forma.

$$\Delta G = \Delta H + T\Delta S$$

Cuando solo queremos saber la espontaneidad de la reacción solamente nos interesaría el cambio de  $\Delta G$  más que su valor una forma de determinar qué tipo de proceso es, esto lo podemos resumir en la siguiente tabla 1.

Tabla 17 Tipos de  $\Delta G$

$\Delta G \leq 0$	Espontáneo
$\Delta G \geq 0$	No espontáneo
$\Delta G = 0$	Sistema en equilibrio

Si se considera la entropía y entalpía de la reacción no depende de la temperatura esto se aplicará siempre que no exista un cambio de fase en la reacción.

## **Ecuación de Nernst**

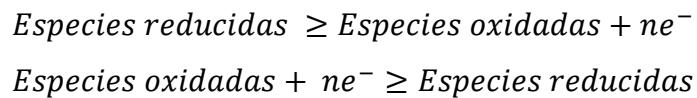
A finales del siglo XIX Walther Nernst desarrolló la ecuación que lleva su nombre esta ecuación relaciona las ecuaciones de Gibbs y el potencial estándar, esto relaciona el potencial de una celda electroquímica contra el potencial de reducción estándar y la concentración de los electrodos involucrados.

Con lo cual se puede utilizar para deducir una expresión para conocer el potencial de una pila con x concentración de un electrolito. La ecuación de Nernst se puede representar de la siguiente manera.

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln Q$$

## **Potencial Electroquímico**

Es el parámetro con el cual se mide la energía por una unidad de carga que se genera por una reacción de oxido-reducción. Y esta se pueden representar como semirreacciones lo cual se detona de la siguiente manera.



En la primera reacción se puede ver la representación de la oxidación en el ánodo y en la segunda se observa la reducción en el cátodo, con esto se pueden tener dos potenciales uno de oxidación y otro de reducción. Al potencial de celda también se

le conoce como fuerza electromotriz termodinámica. Tomando en cuenta el delta G de una reacción se pueden dividir los tipos de celdas que se tienen si es una reacción espontanea se tendrá una celda galvánica. Y un ejemplo de estas son las baterías de los automóviles.

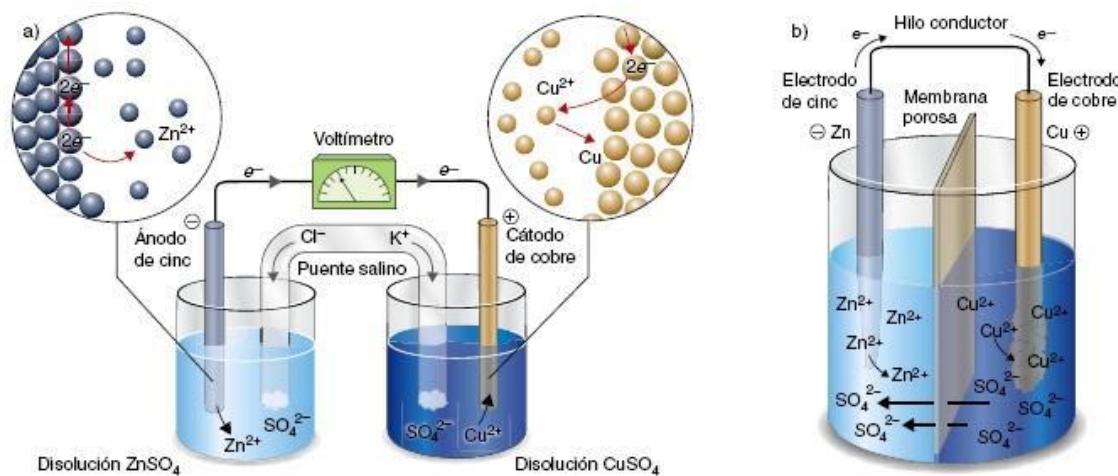
Si es una reacción no espontanea se tendrá una celda de tipo electrolítica a la cual se le tendrá que suministrar una energía externa para que la reacción suceda.

Una pila es la combinación de dos electrodos en la cual cada uno de ellos contribuyen al potencial completo de la pila, cuando se buscan los valores de los electrodos se designa un electrodo como estándar. Por lo general se selecciona el electrodo estándar de hidrógeno del cual se conocen sus valores. El potencial estándar está determinado tanto por las propiedades del electrodo de hidrógeno como por las del par al que corresponde el potencial. (Química Física Atkins, n.d.).

Al saber cuál es el potencial estándar se puede conocer cuál será la energía que podrá ser suministrada por la celda electroquímica para poder mover los electrones dentro de un circuito eléctrico. En el sistema internacional esto se mide en voltios (V) el cual un voltio equivale a  $1\text{kg}\cdot\text{m}^2\text{s}^{-3}\text{A}^{-1}$ .

## Celdas Electroquímicas

Las celdas electroquímicas constan principalmente de dos electrodos en contacto con un electrolito, estos componentes conforman una semipila. Si se utiliza un solo electrolito los electrodos pueden estar en un solo compartimento si se utilizan electrolitos distintos se utilizan compartimentos diferentes y tendrán que ser conectados mediante un puente salino lo cual se puede observar en la Figura 1.

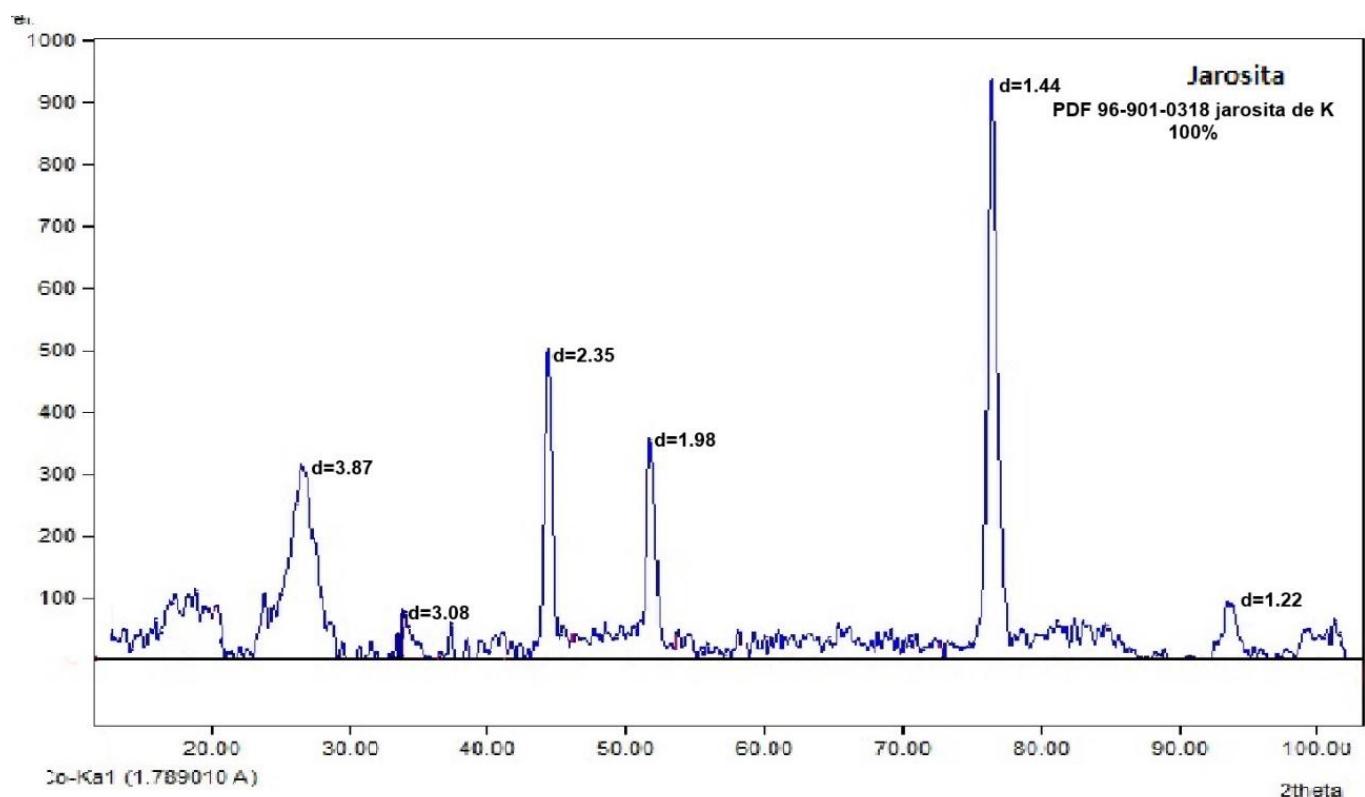


**Figura 28** Celdas electroquímicas (EL FÍSICO LOCO: Pila Daniell, n.d.)

La principal diferencia entre una pila galvánica y una celda electroquímica es que esta última necesita una fuente externa de corriente para impulsar la reacción no espontánea.

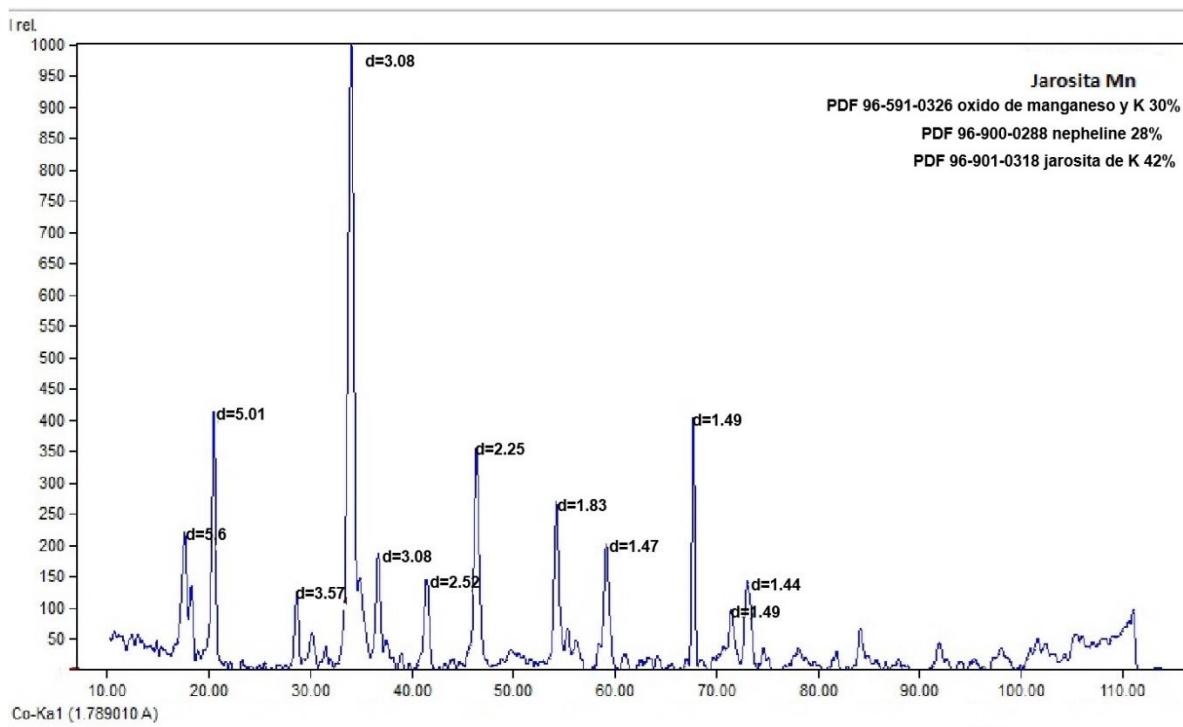
Para que esto pueda llevarse a cabo tiene que cumplirse el principio electroquímico llamado redox, la cual es una reacción en la que se produce una transferencia de electrones de una especie a otra (Química Física Atkins, s/f).

Por lo cual siempre debe de existir un agente oxidante y un agente reductor, si se ve desde el punto de vista de baterías, se necesita tener un ánodo y un cátodo, de igual forma se pueden separar las celdas en espontáneas que son aquellas que no necesitan una corriente externa para que pueda llevarse a cabo el fenómeno de oxido-reducción y las celdas electroquímicas que son alas que se les tiene que suministrar una corriente externa.

**Difraccion de rayos X a las diferentes jarositas****Figura 29** Difracción Jarosita**Tabla 18** Picos de Difracción Jarosita

Jarosita		
Pico	$\Theta$	$d$
1	76.85	1.44
2	44.68	2.35
3	53.61	1.98
4	26.67	3.87
5	93.63	1.22
6	33.75	3.08

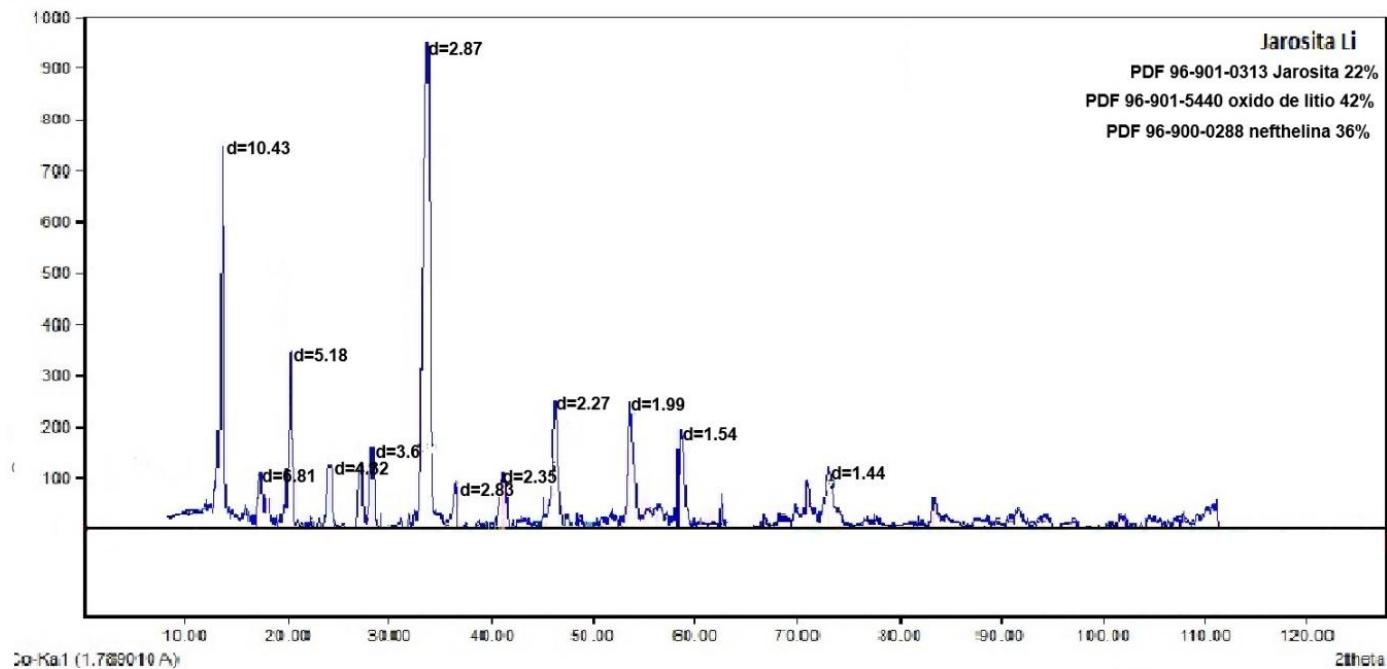
En la Figura 32 se observa el difactograma donde se indexó el PDF 96-901-0318 jarosita de potasio 100%, en la cual se puede corroborar seis picos que coinciden los cuales los podemos ver en la Tabla 5.

**Figura 30** Difracción de jarosita Mn**Tabla 19** Picos de Difracción de jarosita Mn**Jarosita Mn-Jal**

Pico	$\Theta$	D	Relación a PDF
1	33.76	3.08	Neopheline
2	20.53	5.01	Oxido de Manganeso
3	73.31	1.49	Jarosita de Potasio
4	46.64	2.25	Oxido de Manganeso
5	58.23	1.83	Jarosita de Potasio
6	18.21	5.6	Jarosita de Potasio
7	60.47	1.47	Neopheline
8	33.75	3.08	Oxido de Manganeso
9	76.85	1.44	Jarosita de Potasio
10	41.59	2.52	Oxido de Manganeso
11	29.03	3.57	Oxido de Manganeso
12	73.31	1.49	Jarosita de Potasio

Se indexaron los PDF 96-591-0326 Oxido de manganeso y potasio 30%, PDF 96-900-0288 nepheline 28%, PDF 96-901-0318 jarosita de potasio 42%, se puede

observaren la Figura 33. Con lo cual podemos comprobar que hubo una buena union entre la jarosita y los Jales dopandolos con Manganese los picos y valores de distancia interplanar la podemos ver en la tabla 6.



**Figura 31** Difracción de Jarosita Li

**Tabla 20** Difracción de Jarosita Li

*Jarosita Li-Jal*

Pico	Θ	d	Relación a PDF
1	36.26	2.87	Oxido de Litio
2	11.83	10.43	Oxido de Litio
3	19.88	5.18	Oxido de Litio
4	46.31	2.27	Jarosita de potasio
5	53.27	1.99	Jarosita de potasio
6	58.06	1.59	Jarosita de potasio
7	28.69	3.60	Jarosita de potasio
8	23.90	4.32	Oxido de Litio
9	76.85	1.44	Neopheline
10	44.68	2.35	Neopheline

11	37.60	2.83	Neopheline
12	15.09	6.80	Oxido de Litio

En la Figura 34 se observa el difactograma de Jarosita-Jal-(Litio), donde se indexaron PDF 96-901-0313 Jarosita de Potasio 22%, PDF 96-901-5440 Oxido de Litio 42%, PDF 96-900-0288 nepheline 36%, se puede corroborar la union entre la jarosita y los Jales dopandolos con Litio, teneiendo un mayor porcentaje de Oxido de Litio, los datos de los pico se pueden comprobar en la tabla 7.

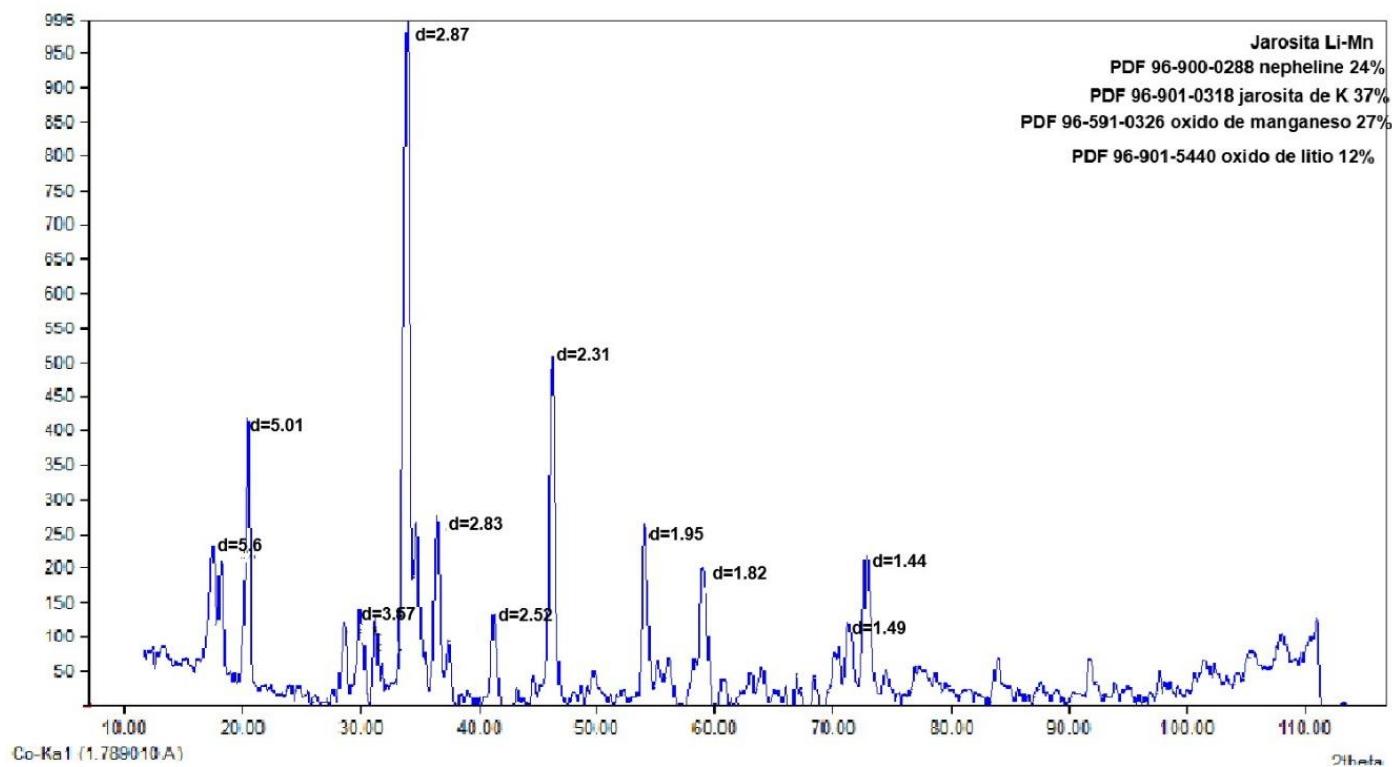


Figura 32 Difracción de Jarosita Li-Mn

Tabla 21 Difracción de Jarosita Li-Mn

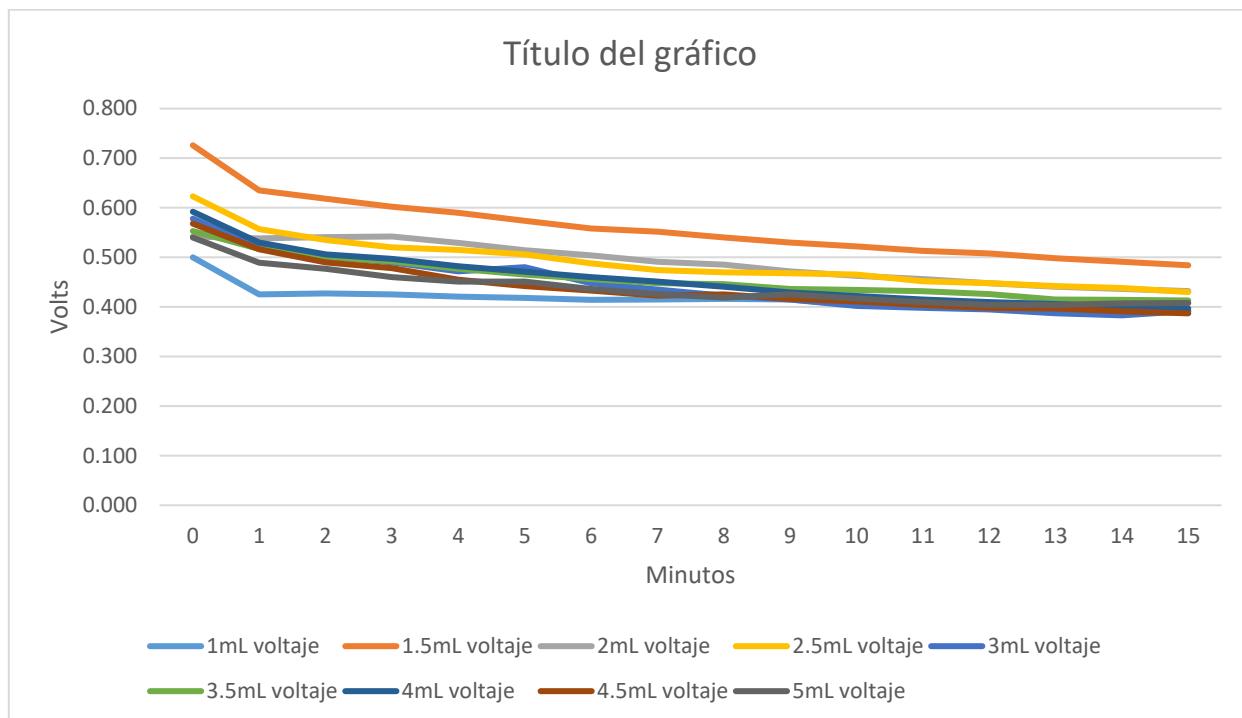
**Jarosita Li-Mn**

Pico	$\Theta$	d	Relación a PDF
1	36.26	2.87	Oxido de Litio
2	45.5	2.31	Neopheline
3	20.53	5.01	Oxido de Manganeso
4	37.6	2.83	Jarosita de potasio
5	54.35	1.95	Oxido de Litio
6	18.21	5.6	Jarosita de potasio
7	76.85	1.44	Jarosita de potasio
8	58.85	1.82	Oxido de Manganeso
9	41.54	2.52	Oxido de Manganeso
10	29.03	3.57	Oxido de Manganeso
11	73.31	1.49	Jarosita de potasio

Se indexaron los PDF PDF 96-900-0288 nepheline 24%, PDF 96-901-0313 Jarosita de Potasio 37%, PDF 96-591-0326 Oxido de manganeso y potasio 27%, PDF 96-901-5440 Oxido de Litio 12% los cuales los podemos observar en la Figura 35, donde presentan una muy buena unión entre ellos sin embargo predomina más el óxido de manganeso, mientras que en la tabla 8 se puede ver los valores de los picos obtenidos.

### **Pruebas concentración de Jal**

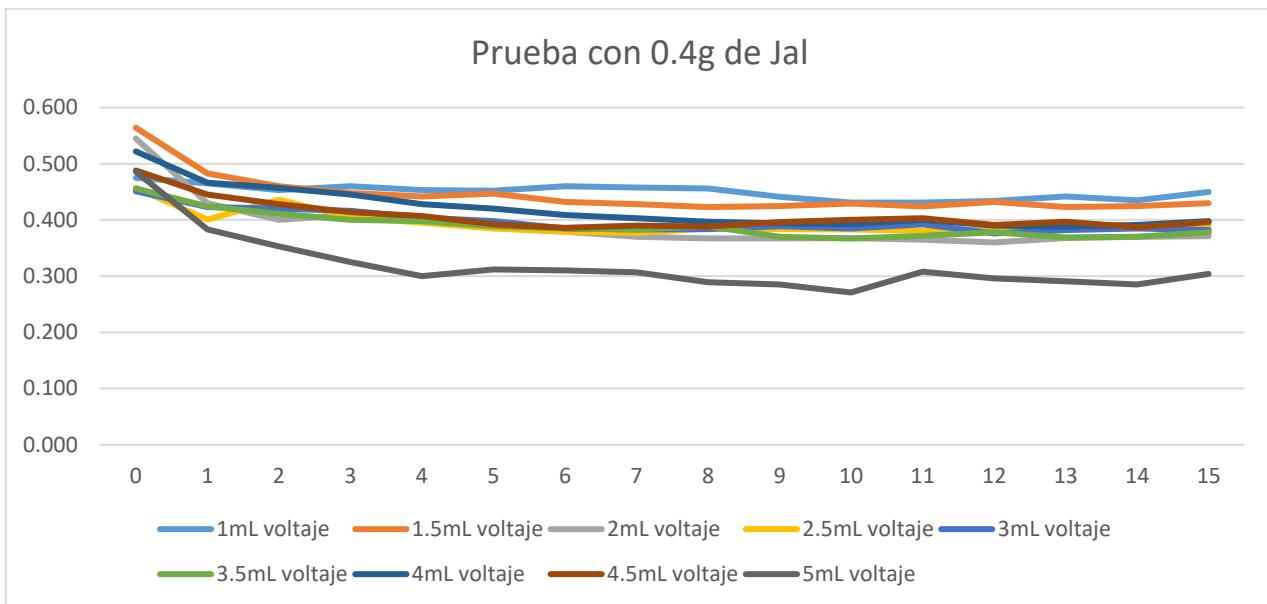
En el grafico 14 podemos tener una comparación al utilizar 0.2 gramos de jal y repitiendo las mismas variables del grafico 1, en este encontramos un incremento en el voltaje teniendo como el valor máximo de 0.726 V utilizando 1.5ml de agua desionizada.



**Gráfico 13 Segunda Prueba con 0.2g de Jal**

En el grafico 15 se muestra el comportamiento cuando se utiliza 0.4 gramos de jal y manteniendo los parámetros de los experimentos anteriores en ella podemos

observa una buena estabilidad al aplicar una descarga en esta prueba obtuvo como voltaje máximo 0.564 V y como voltaje mínimo 0.271 V



**Gráfico 14** Prueba con 0.4g de Jal

En el grafico 16 se observa el comportamiento del jal utilizando una concentración de 0.5 gramos de jal manteniendo los mismos parámetros del agua desionizada en esta se puede observa que entre mayor sea la cantidad de agua desionizada sea el comportamiento es inestables, en esta prueba se obtuvo un voltaje de 0.599V como máximo y un valor mínimo de 0.203V

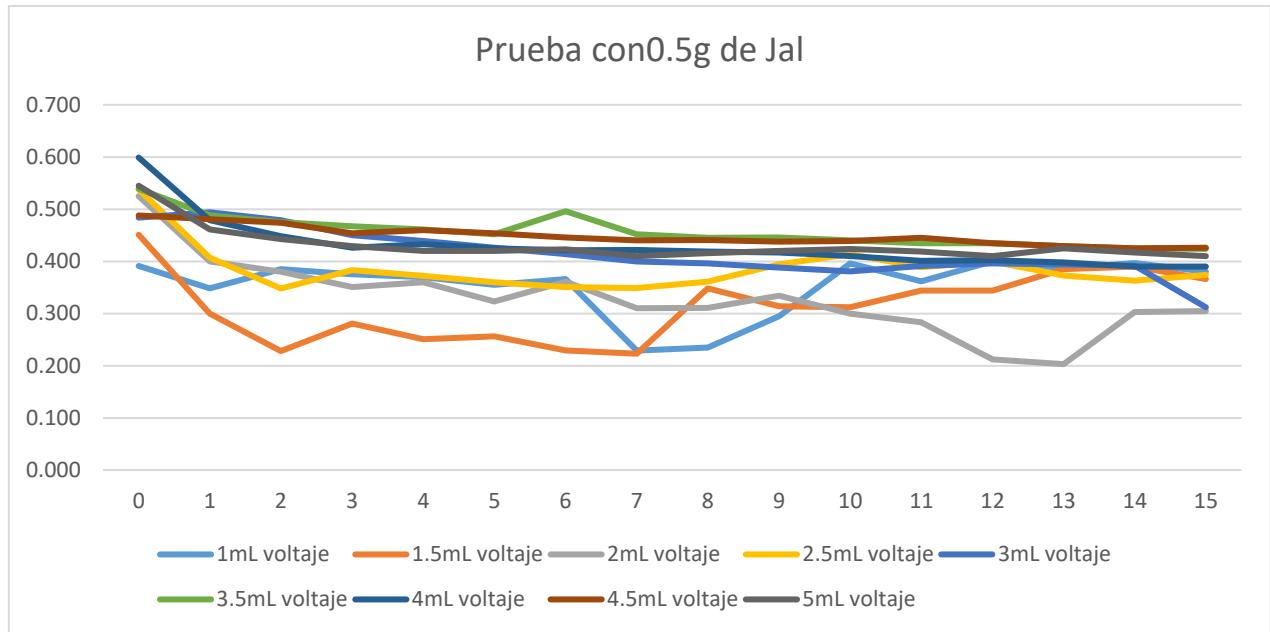


Gráfico 15 Prueba con 0.5g de Jal

Al utilizar una concentración de 0.6 gramos de jal se observa un comportamiento similar al usar 0.5 gramos, esto lo podemos ver en el grafico 17, en esta se obtuvo un voltaje máximo de 0.560V.

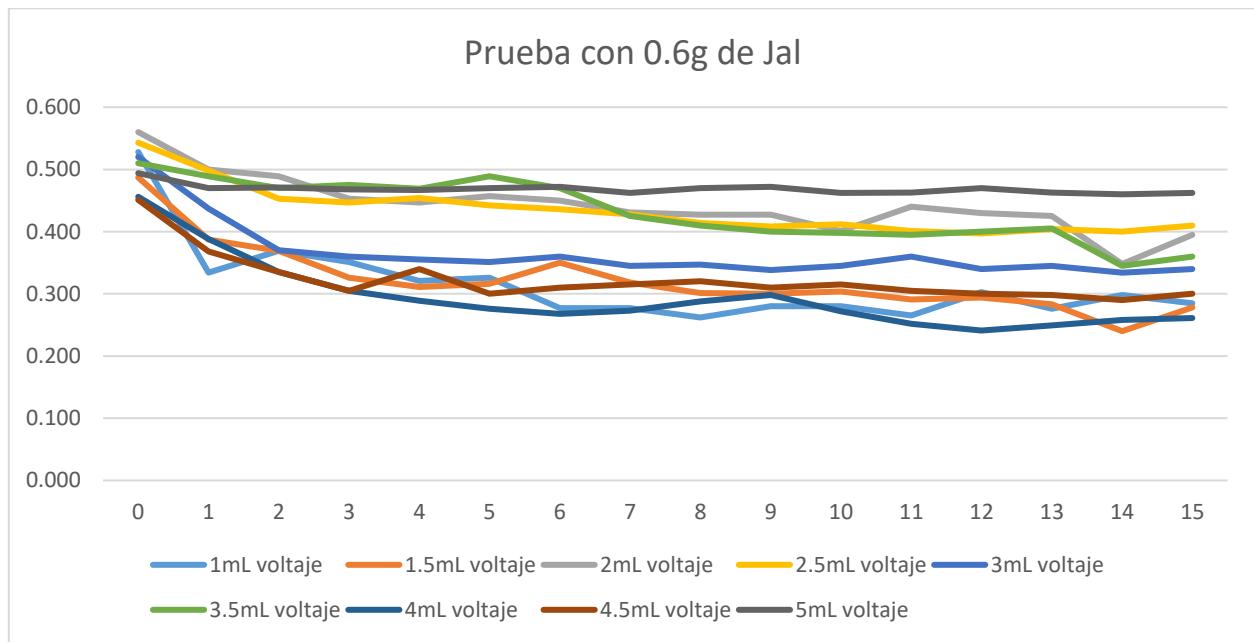
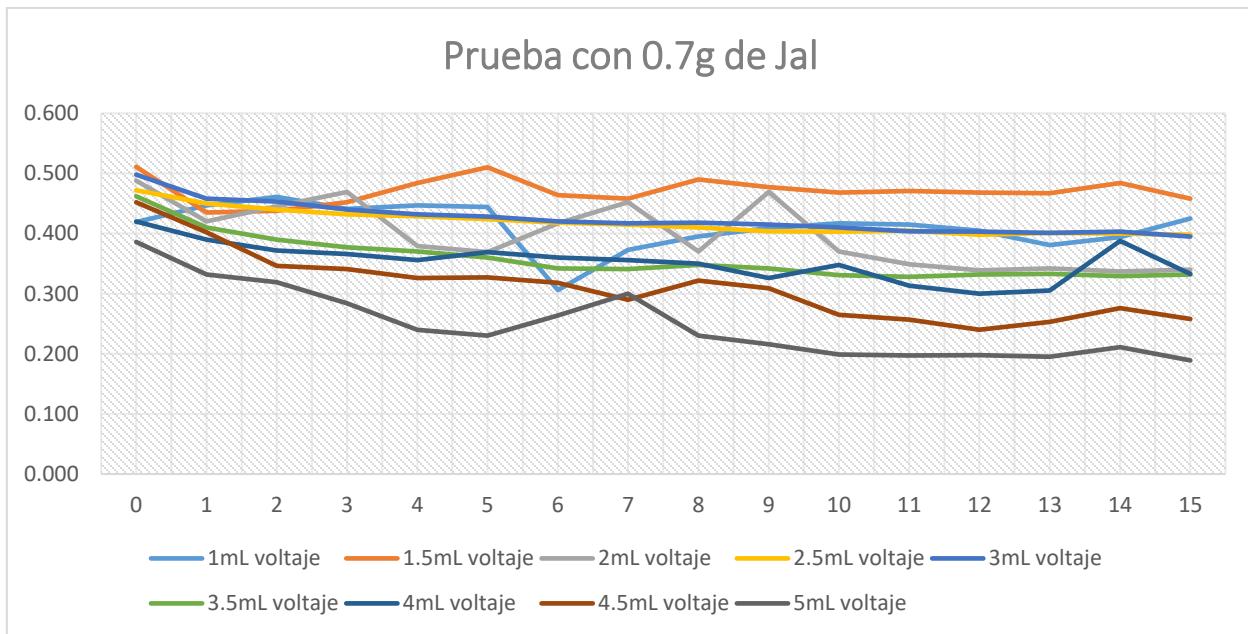


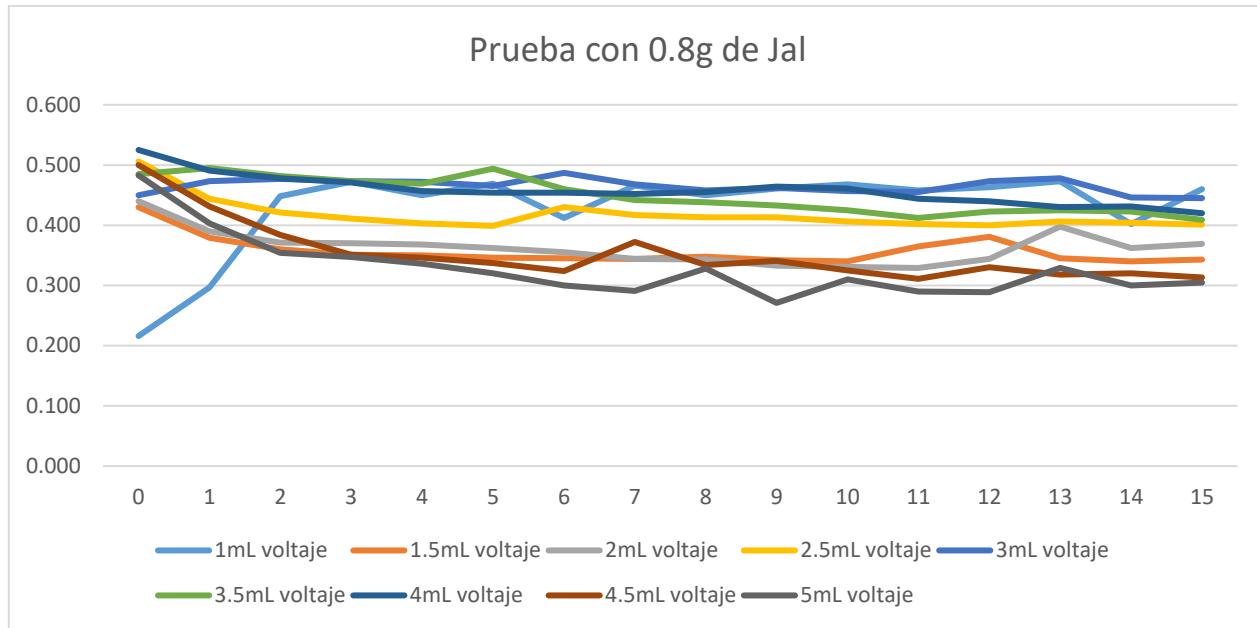
Gráfico 16 Prueba con 0.6g de Jal

En el Grafico 18 se observa la prueba realizada con 0.7 gramos de jal la cual presenta un cambio significativo al cambiar la concentración de agua desionizada en esta prueba se obtuvo el valor máximo de 0.511V .



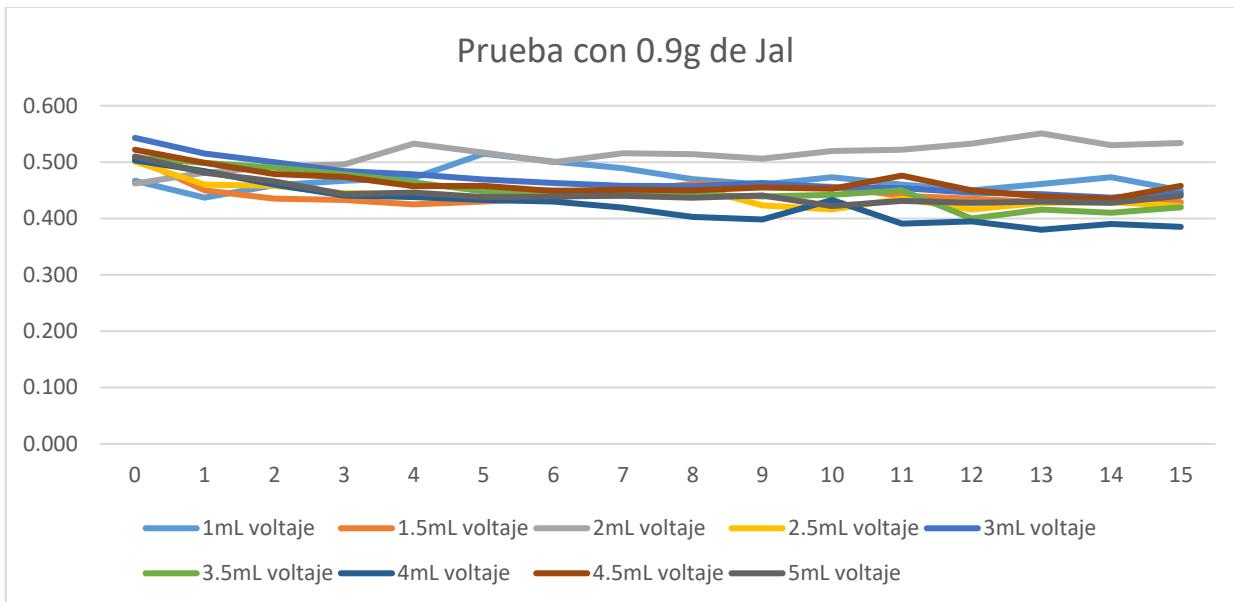
**Gráfico 17** Prueba con 0.7g de Jal

Se observa que entre mayor sea la cantidad de jal la variación del voltaje será mayor esto lo podemos comprobar en el Grafico 19, ya que en esta se utiliza 0.8 gramos de jal, se observa que al agregar 1ml de agua el voltaje empieza con un voltaje menor y va subiendo hasta estabilizarse, el voltaje mayor que obtuvo fue de 0.525V con una concentración de 4ml.



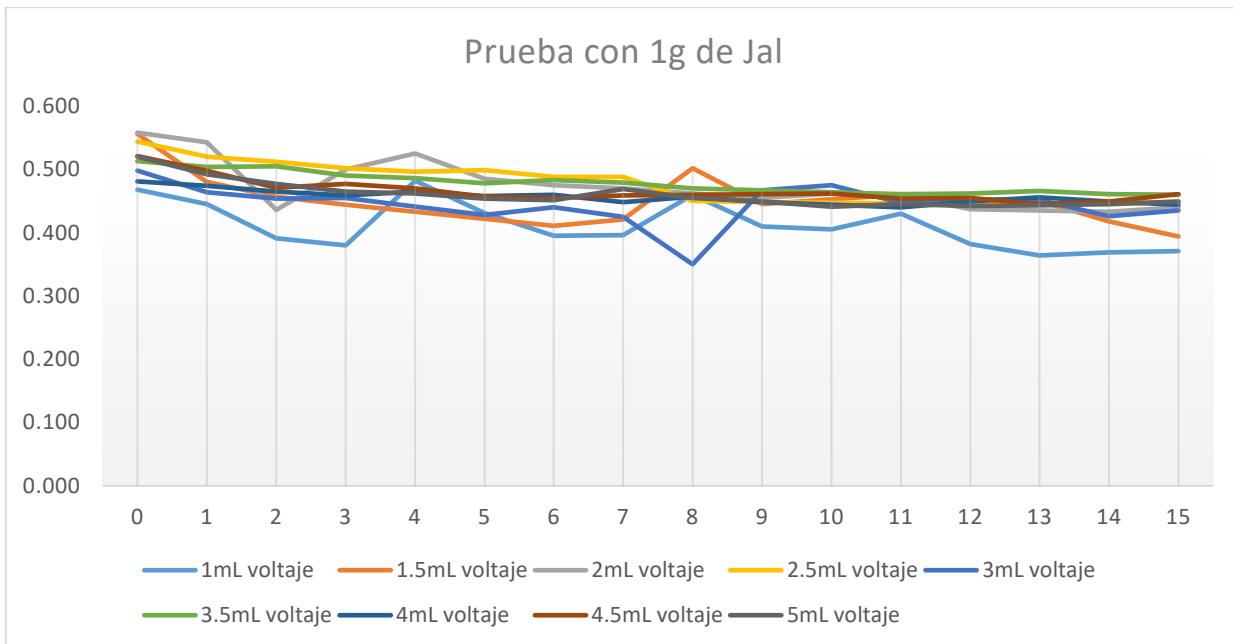
**Gráfico 18** Prueba con 0.8g de Jal

Utilizando 0.9 gramos de jal se y una concentración de 4.5ml de agua desionizada se muestra un comportamiento estable como se puede observar en el grafico 20, este nos da un voltaje mayor de 0.551V con una concentración de 2ml.



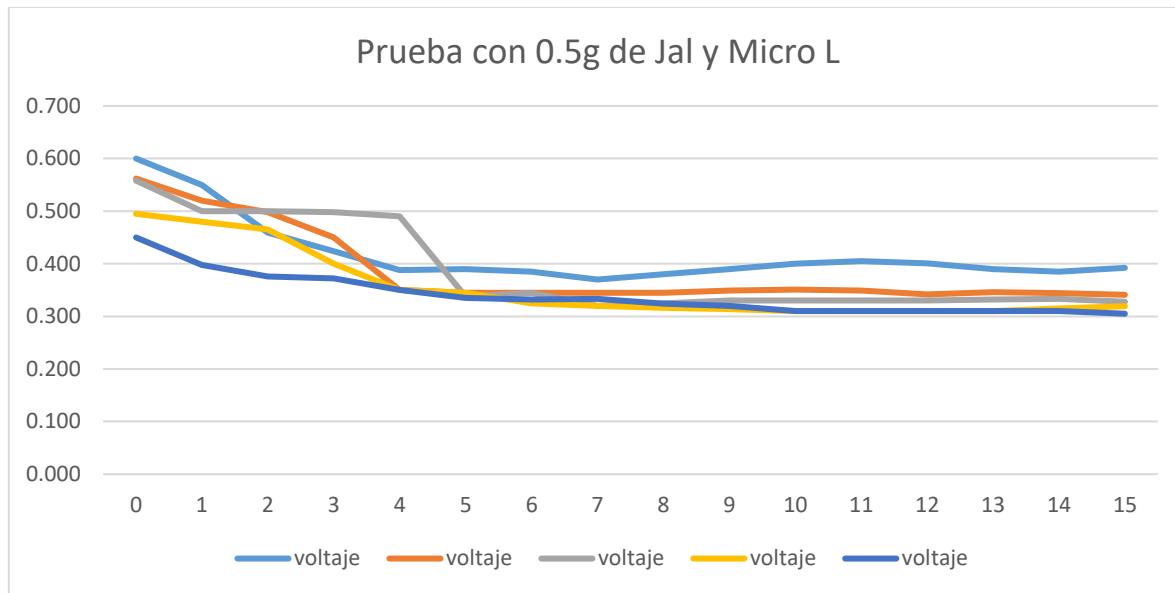
**Gráfico 19** Prueba con 0.9g de Jal

En la gráfica 21 se puede observar que al utilizar un gramo de jal el voltaje que se obtiene es menor en comparación con los experimentos anteriores ya que este es de 0.550 V y la variación de voltaje se incrementa.



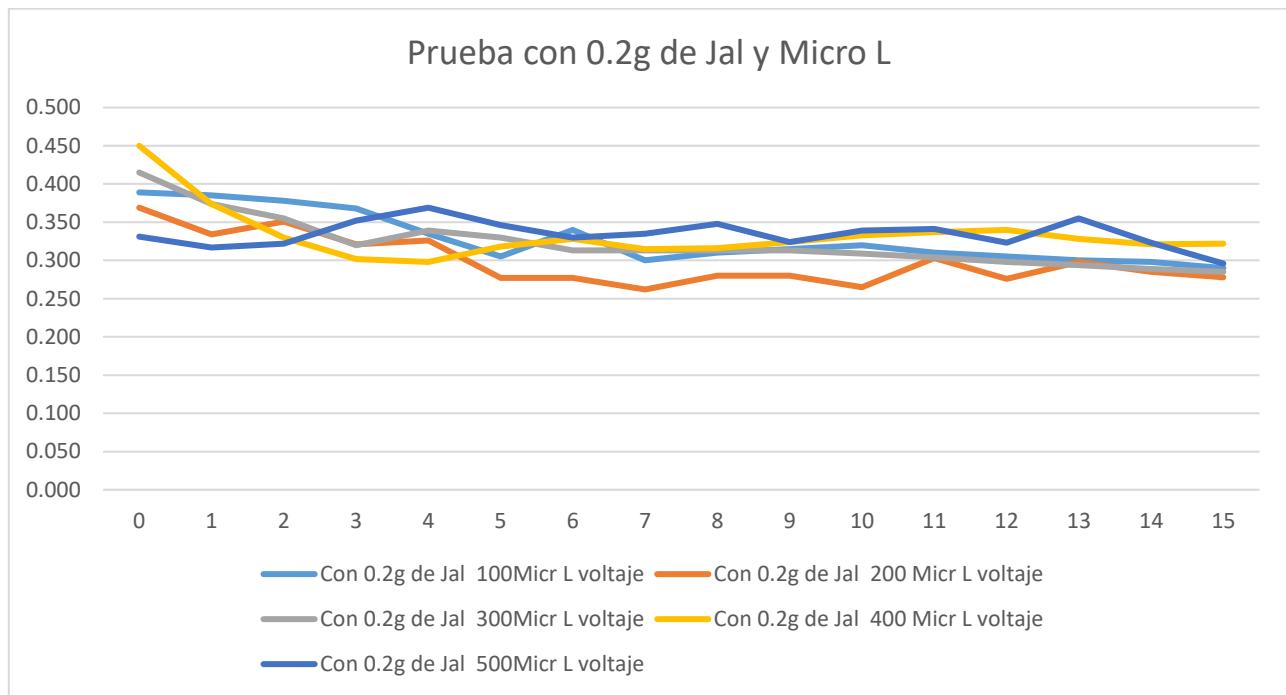
**Gráfico 20** Prueba con 1g de Jal

Al encontrarse mejor rendimiento entre mayor sea la cantidad del jal y menor la del agua desionizada, se opto por utilizar microlitros con la prueba en la grafica 22 se muestra que al utilizar 0.5 gramos de jal se obtiene un comportamiento similar en cada punto el máximo voltaje obtenido es de 600V.



**Gráfico 21** Prueba con 0.5g de Jal y Microlitros

Como tercera prueba se realizó con 0.2 gramos de jal, pero está a diferencia de las anteriores presenta variación en el voltaje como se puede observar en el Grafico 23 por lo cual se descarto como resultado se obtuvo un voltaje máximo de 0.389 siendo el más bajo en comparación con las pruebas anteriores.



**Gráfico 22** Prueba con 0.2g de Jal y Microlitros

