



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“USO DE DIFERENTES TIPOS DE ROCAS PARA EL CONTROL DE DRENAJE ÁCIDO EN UN DEPÓSITO DE JALES DE UNA MINA DE HIERRO, EN EL SUR DE MÉXICO.”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA:**

Luis Fernando Martínez Moreno





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**           **Profesor: Antonio Huerta Cerdán**

**VOCAL:**               **Profesor: José Agustín García Reynoso**

**SECRETARIO:**       **Profesor: Francisco Martín Romero**

**1er. SUPLENTE:**     **Profesor: Blanca Paz Díaz**

**2o. SUPLENTE:**     **Profesor: Luis Gerardo Martínez Jardines**

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**Instituto de Geología, Laboratorio de Geoquímica Ambiental**

**Asesor del Tema: Dr. Francisco Martín Romero**

**Supervisor Técnico: Dr. Luis Gerardo Martínez Jardines**

**Sustentante: Luis Fernando Martínez Moreno**

<b>Índice General</b>	
<b>Índice de Figuras.....</b>	<b>8</b>
<b>Índice de Tablas .....</b>	<b>12</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>14</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>15</b>
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>16</b>
1.1 Justificación .....	18
1.2 Hipótesis .....	18
1.3 Objetivos .....	19
1.3.1 Objetivo General .....	19
1.3.2 Objetivos Particulares .....	19
<b>Capítulo 2. Sitio de Estudio.....</b>	<b>20</b>
2.1 Localización.....	20
2.2 Generalidades de “Peña Colorada” .....	21
2.3 Clima .....	21
2.4 Hidrología.....	23
2.4.1 Hidrología Superficial .....	23
2.4.2 Hidrología Subterránea.....	23
2.4.3 Hidrogeoquímica.....	24
2.4 Geología y Minería.....	25
2.4.1 Yacimiento.....	25
2.4.2 Sistema de Minado y Beneficio de Minerales.....	27

## **Capítulo 3. Marco Teórico ..... 28**

<b>3.1 Depósitos de Jales .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.1 Definición de Depósitos de Jales.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.2 Características de los Depósitos de Jales .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 Drenajes de Mina.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.1 Definición de Drenaje de Mina .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.2 Tipos de Drenaje de Mina .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.3 Drenaje Ácido de Mina.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.4 Características del Drenaje Ácido de Mina .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.5 Procesos de Drenaje Ácido de Mina.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3 Control del Drenaje Ácido de Mina.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.1 Definición de Control de DAM.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.2 Tipos de Control de DAM .....</b>	<b>36</b>

## **Capítulo 4. Antecedentes ..... 41**

<b>4.1 Nacionales .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1.1 Grupo de Biogeoquímica Ambiental, 2008, “PLAN DE CIERRE DE LA PRESA DE JALES DEL CMBJPC, DE ACUERDO A LAS NORMAS OFICIALES MEXICANAS.” .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1.2 Goslinga Arenas Juan Antonio, 2015, “Evaluación de la capacidad de tres tipos de rocas para neutralizar el drenaje ácido generado en una mina.” .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1.3 Laurel Alarid Alejandro, 2015, “Evaluación de la neutralización de drenaje acido de mina con rocas carbonatadas en celdas de tratamiento.” .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1.4 Facultad de Química e Instituto de Geología, UNAM, 2016, “ETAPA I: ACTUALIZACIÓN DE LA PELIGROSIDAD DE LA PRESA DE JALES GUÁSIMAS DE PEÑA COLORADA.” .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2 Internacionales .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.1 William H.J Strosnider, Sergio Carvajal, Freddy Llanos-López, Robert W. Nairn, Rebecca A.M. Peer, Brandon K. Winfrey, 2015, “ANALISIS DEL CO-TRATAMIENTO</b>	

<b>PASIVO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES Y DRENAJE ACIDO DE MINAS EN CERRO RICO DE POTOSÍ, BOLIVIA.”</b> .....	<b>43</b>
<b>4.2.2 Erin J.Clyde, Pascale Champagne, Heather E. Jamieson, CaitlinGorman, John Sourial, 2016, “The use of a passive treatment system for the mitigation of acid mine drainage at the Williams Brothers Mine (California): pilot-scale study”</b> .....	<b>43</b>
<b>4.2.3 Ester Torresa Alba Lozano, Francisco Macías, Alba Gomez Arias, Julio Castillo, Carlos Ayora, 2018, “Passive elimination of sulfate and metals from acid mine drainage using combined limestone and barium carbonate systems.”</b> .....	<b>44</b>
<b>4.2.4 Joaquín Delgado Rodríguez, Diana Ayala, Hugo Simón Páez, 2018, “Sistema de tratamiento para mejorar la calidad de aguas de drenaje de pasivos ambientales mineros en la cuenca del rio Puyango.”</b> .....	<b>44</b>
<b>4.2.5 K. Florence, D.J. Sapsford, D.B. Johnson, C.M. Kay, C. Wolkersdorfer, 2015, “Iron mineral accretion from acid mine drainage and its application in passive treatment, Environmental Technology.”</b> .....	<b>44</b>

## **Capítulo 5. Metodología..... 45**

<b>5.1 Identificación del Sitio de Estudio.....</b>	<b>47</b>
<b>5.2 Muestreo .....</b>	<b>48</b>
<b>5.2.1 Muestreo de Materiales Geológicos .....</b>	<b>48</b>
<b>5.2.2 Muestreo de Jales .....</b>	<b>49</b>
<b>5.3 Caracterización de Jales.....</b>	<b>51</b>
<b>5.3.1 Preparación y Preservación de Muestras.....</b>	<b>51</b>
<b>5.3.2 Caracterización de Parámetros Fisicoquímicos .....</b>	<b>52</b>
<b>5.3.3 Caracterización Química .....</b>	<b>52</b>
<b>5.3.4 Caracterización de Especies Mineralógicas .....</b>	<b>52</b>
<b>5.3.5 Caracterización de Potencial de Generación de DA.....</b>	<b>53</b>
<b>5.4 Caracterización de Materiales Geológicos .....</b>	<b>55</b>
<b>5.5 Experimentos para Evaluar el Generación de DA y Migración de Sales .....</b>	<b>56</b>
<b>5.5.1 Selección de Zonas para la Instalación de Experimentos.....</b>	<b>56</b>
<b>5.5.2 Metodología para Celdas de Observación .....</b>	<b>57</b>

## **Capítulo 6. Resultados y Discusión ..... 67**

6.1 Resultados de Caracterización del Jal.....	67
6.1.1 Resultados de Caracterización de Parámetros Fisicoquímicos .....	67
6.1.2 Resultados de Caracterización Química .....	68
6.1.3 Resultados de Caracterización de Especies Mineralógicas .....	72
6.1.4 Resultados de las Pruebas de Oxidación Acelerada.....	75
6.2 Resultados de Caracterización de Materiales Geológicos .....	78
6.2.1 Tepetate .....	78
6.2.2 Conglomerado Rojo.....	79
6.2.3 Caolín.....	80
6.3 Resultados de Pruebas de Potencial de Generación de DA y Migración de Sales en Jales Grises y Jales Oxidados. ....	82
6.3.1 Resultados de las Pruebas de Potencial de Generación de DA en Jales Grises	83
6.3.2 Resultados de las Pruebas de Control de Migración de Sales en Jales Grises y en Jales Oxidados en Talud Sur .....	97

## **Capítulo 7. Conclusiones ..... 112**

## **Referencias ..... 114**

Bibliografía.....	114
Páginas web.....	120

## **Anexos ..... 122**

Anexo I Parámetros Fisicoquímicos, pH y conductividad eléctrica, de la caracterización del jal.....	122
Anexo II Concentración y Porcentaje De Coeficiente De Variación De La Caracterización Por Fluorescencia De Rayos X En Modo Mina y Suelo Para Las Muestras, Blanco y Materiales De Referencia .....	123
Anexo III Concentración e Incertidumbre De Azufre Total Por Método LECO .....	127

**Anexo IV Difractogramas De Las Especies Mineralógicas En Mayor Proporción Presentes En Las Muestras Analizadas Por Medio De La Técnica de Difracción de Rayos X.....128**

**Anexo V Datos de pH, Conductividad eléctrica y Concentración de Sulfatos De Los Lixiviados y pH y Conductividad eléctrica Superficial Obtenidos Del Seguimiento de las Celdas de Observación .....132**

## Índice de Figuras

Figura 1 Balsa de Aguas Contaminadas Derivadas del Proceso de Extracción de Recursos en una Mina de Cielo Abierto. ....	16
Figura 2 Ubicación del Sitio de Estudio.....	20
Figura 3 Temperaturas normales mínima, media y máxima mensuales correspondientes al periodo: 1951-2010. ....	22
Figura 4 Precipitaciones normales media y máxima mensuales correspondientes al periodo 1951-2010 .....	22
Figura 5 Mapa geológico del yacimiento de "Peña Colorada", Colima.....	26
Figura 6 Diagrama de flujo del procesamiento de magnetita de CMBJPC.....	27
Figura 7 Presa de Jales "El Arrayanal" de la minera Peña Colorada.....	28
Figura 8 Diagrama de la Clasificación de Residuos Mineros .....	29
Figura 9 Fotografía de DAM formado en el Talud Este recubierto, de una presa de jales. ....	34
Figura 10 Ejemplo de un Método de Barrera, Sellado de Materiales .....	37
Figura 11 Sistema de Tratamiento Pasivo de Barreras Reactivas .....	39
Figura 12 Métodos de Control de DAM.....	40
Figura 13 Diseño metodológico.....	46
Figura 14 Sitio de Estudio, mina y presa de jales del Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada. ....	47
Figura 15 Ubicación de los diferentes materiales empleados en las pruebas de potencial de generación de DA y migración de sales. ....	48
Figura 16 Conductividad eléctrica determinada en muestras subsuperficiales por estrato .....	49
Figura 17 Relación potencial de neutralización/potencial de acidez en muestras subsuperficiales .....	50
Figura 18 Esquema de construcción de celdas para evaluar la Generación de DA, se adiciono un espesor de 90 cm de jal gris, seguido de un espesor de material geológico, para la Celda A, B y C de 20, 40 y 60 cm respectivamente. ....	58
Figura 19 Imagen de la ubicación de Celdas de Observación y Zanjas de Observación en el Vaso Noroeste de la Presa de Jales Guásimas. ....	59

Figura 20 Fotografía de las Celdas para evaluar la Generación de DA del jal gris en el Vaso de la presa Guásimas. ....	60
Figura 21 Celdas para Evaluar la Generación de DA del jal gris en el Talud Norte. ....	62
Figura 22 Esquema de las celdas para evaluar control de migración de sales. Estas se encuentran sin tapa, en contacto directo con el jal gris, con un espesor de la Celda A, B y C, de 20, 40 y 60 cm, respectivamente. ....	63
Figura 23 Celdas para evaluar la migración de sales de jal gris en el Vaso de la presa de jales “Guásimas”. ....	64
Figura 24 Celdas para evaluar la migración de sales en el Talud Oxidado.....	66
Figura 25 Resultados de las pruebas de oxidación acelerada con agua oxigenada al 30%. ....	75
Figura 26 Gráfico de pH para la capa de Tepetate en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA.....	83
Figura 27 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Tepetate en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA. ....	84
Figura 28 Gráfico de concentración de sulfatos para la capa de Tepetate en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA. ....	85
Figura 29 Gráfico de pH para la capa de Conglomerado Rojo en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA.....	87
Figura 30 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Conglomerado Rojo en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA. ..	88
Figura 31 Gráfico de concentración de sulfatos para la capa de Conglomerado Rojo en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA. ....	89
Figura 32 Registro fotográfico de la superficie de la capa de Conglomerado Rojo en las celdas empleadas para evaluar oxidación. A) 20 cm de espesor, B) 40 cm de espesor y C) 60 cm de espesor.....	91
Figura 33 Gráfico de pH para la capa de Caolín en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA.....	92
Figura 34 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Caolín en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA. ....	93

Figura 35 Gráfico de concentración de sulfatos para la capa de Caolín en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA. ....	94
Figura 36 Registro fotográfico de la superficie de la capa de Caolín en las celdas empleadas para evaluar oxidación. A) 20 cm de espesor, B) 40 cm de espesor y C) 60 cm de espesor.....	95
Figura 37 Gráfico de pH para la capa de Tepetate en las Celdas del Vaso para las pruebas de control de migración de sales.....	97
Figura 38 Gráfico de pH para la capa de Tepetate en las Celdas del Talud Este. para las pruebas de control de migración de sales.....	99
Figura 39 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Tepetate en las Celdas del Vaso para las pruebas de control de migración de sales.....	100
Figura 40 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Tepetate en las Celdas del Talud Este para las pruebas de control de migración de sales. ....	101
Figura 41 Gráfico de pH para la capa de Conglomerado Rojo en las Celdas del Vaso para las pruebas de control de migración de sales. ....	102
Figura 42 Gráfico de pH para la capa de Conglomerado Rojo en las Celdas del Talud Este para las pruebas de control de migración de sales. ....	103
Figura 43 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Conglomerado Rojo en las Celdas del Vaso para las pruebas de control de migración de sales. ....	104
Figura 44 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Conglomerado Rojo en las Celdas del Talud Este para las pruebas de control de migración de sales. ....	105
Figura 45 Gráfico de pH para la capa de Caolín en las Celdas del Vaso para las pruebas de control de migración de sales.....	107
Figura 46 Gráfico de pH para la capa de Caolín en las Celdas del Talud Este para las pruebas de control de migración de sales.....	108
Figura 47 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Caolín en las Celdas del Vaso para las pruebas de control de migración de sales.....	109
Figura 48 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Caolín en las Celdas del Talud Este. para las pruebas de control de migración de sales. ....	110
Figura 49 Difractograma para la muestra A. cuentas por segundo en función de 2 veces el ángulo de difracción. ....	128

Figura 50 Difractograma para la muestra B, cuentas por segundo en función de 2 veces el ángulo de difracción .....	129
Figura 51 Difractograma para la muestra C, cuentas por segundo en función de 2 veces el ángulo de difracción. ....	130
Figura 52 Difractograma para la muestra D, cuentas por segundo en función de 2 veces el ángulo de difracción. ....	131

## Índice de Tablas

Tabla 1 Temperaturas medias anuales del municipio de Minatitlán correspondientes al periodo: 1951-2010. ....	22
Tabla 2 Resumen de resultados de parámetros hidrogeoquímicos y de calidad de agua subterránea del acuífero Minatitlán. ....	24
Tabla 3 Resumen de los antecedentes nacionales relacionados al trabajo presente. ...	41
Tabla 4 Resumen de los antecedentes internacionales relacionados al trabajo presente. ....	43
Tabla 5 Matriz de muestras de jal gris y oxidado por prueba y zona. ....	51
Tabla 6 Matriz de muestras de jal y sus respectivos blancos para las pruebas oxidación acelerada con agua oxigenada al 30%. ....	54
Tabla 7 Matriz de formación de celdas para Evaluar la Generación de DA de jales en el Vaso y Talud. ....	61
Tabla 8 Matriz de elaboración de celdas para evaluar control de migración de sales. .	65
Tabla 9 Resumen de parámetros fisicoquímicos para las muestras de jal correspondientes. ....	67
Tabla 10 Resumen de elementos presentes en las muestras de jal obtenidos por Fluorescencia de Rayos X en modo Mina. ....	68
Tabla 11 Resumen de elementos presentes en las muestras de jal obtenidos por Fluorescencia de Rayos X en modo Suelo y Azufre total. ....	68
Tabla 12 Límites de detección para la técnica de Fluorescencia de Rayos X. ....	69
Tabla 13 Límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en base seca. .	69
Tabla 14 Concentración promedio de Fe y Ca en muestras del Vaso y Talud. ....	70
Tabla 15 Resumen de especies mineralógicas presentes en las muestras de jal gris y jal oxidado obtenidas por medio de la técnica de DRX. ....	72
Tabla 16 Resultados obtenidos de las pruebas de oxidación acelerada. ....	76
Tabla 17 Propiedades físicas y fertilidad de muestras de Tepetate. ....	78
Tabla 18 Propiedades Físicas y Fertilidad del Conglomerado Rojo. ....	79
Tabla 19 Propiedades Físicas y Fertilidad del Caolín. ....	80
Tabla 20 Parámetros fisicoquímicos de las muestras de jal caracterizadas. ....	122

Tabla 21 Elementos presentes en las muestras de jal analizadas por la Técnica de Fluorescencia de Rayos x en modo mina con sus respectivos controles de calidad. .	123
Tabla 22 Elementos presentes en las muestras de jal analizadas por la técnica de fluorescencia de rayos x en modo suelo con sus respectivos controles de calidad. ...	124
Tabla 23 Error porcentual calculado a partir de los valores de los certificados para cada material de referencia.....	126
Tabla 24 Concentración de Azufre total presente en las muestras de jal obtenido por el método LECO. ....	127
Tabla 25 Datos De pH, Conductividad eléctrica y Concentración de Sulfatos de los Lixiviados Obtenidos del Seguimiento De Las Celdas De Observación Para Las Pruebas De Oxidación.....	132
Tabla 26 Datos De pH y Conductividad eléctrica Obtenidos Del Seguimiento De Las Celdas De Observación Para Las Pruebas De Salinidad.....	136

## Resumen

El presente trabajo, permitió determinar el material geológico y el espesor que podría ser usado como cubierta, para un depósito de jales de una mina de hierro ubicada en Colima, con la finalidad de evitar la generación de drenaje ácido y controlar la migración de sales a la superficie, por efecto de la capilaridad, tanto de jales grises como de jales oxidados, permitiendo así el desarrollo de una capa vegetal.

Se seleccionaron tres materiales geológicos: Tepetate, Conglomerado Rojo y Caolín. Los criterios de selección de estos materiales fueron: 1) localización y 2) características físicas y químicas. Se realizaron dos pruebas para estos tres materiales geológicos las cuales fueron: a) Generación de drenaje ácido; donde se utilizaron celdas con jal gris con un elevado potencial de generación de drenaje ácido, ubicadas en el Vaso y Talud Norte; se analizó el pH, conductividad eléctrica y concentración de sulfatos de los lixiviados obtenidos de estas celdas; y b) Migración de Sales; donde se utilizaron celdas en contacto directo con jal gris del Vaso y celdas con jal oxidado del Talud Sur, analizando el pH y la conductividad eléctrica de la superficie de las celdas; para ambas pruebas se utilizaron espesores de 20, 40 y 60cm. Después de 330 días de monitoreo en campo, el Tepetate, con un espesor de 20 cm, fue capaz de evitar la generación de drenaje ácido en el jal gris y controlar la migración de sales, tanto en los jales grises como los jales oxidados, en tanto que el Conglomerado Rojo y el Caolín no evitaron la generación de drenaje ácido en jales grises y la migración de sales hacia la superficie en los jales grises y los jales oxidados.

## **Abstract**

The present essay, allowed to determine the geological material and the thickness that could be used as a cover, for the iron mine tailing located in Colima, avoiding the acid drainage generation and controlling the salts migration to the surface as a result of the capillarity from both the gray tailings and the oxidized tailings allowing the development of a plant layer.

Were selected three geological materials: Tepetate, Red Conglomerate and Kaolin. The selection criteria for these materials were their 1) location and 2) physical and chemical characteristics. Two tests were carried out for these three geological materials which were: a) Acid drainage generation; where cells with gray tailings with a high potential to acid drainage generation were used, located in the Vessel and North Slope; The pH, electrical conductivity and sulfate concentration of the leachates obtained from these cells were analyzed; b) Salts migration; where cells in direct contact with gray tailings from the Vessel and cells with oxidized tailings from the South Slope were used, analyzing the pH and electrical conductivity of the cells surface, for both tests, thicknesses of 20, 40 and 60cm were used. After 330 days of field monitoring, Tepetate, with a thickness of 20 cm, was able to avoid the generation of acid drainage in the gray tailings and to control the salts migration, both in the gray tailings and the oxidized tailings, in so much so that Red Conglomerate and Kaolin did not avoid the acid drainage generation in gray tailings and the salts migration to the surface in gray tailings and oxidized tailings.

## Capítulo 1. Introducción

«México es uno de los países más importantes a escala mundial en cuanto a riqueza minera se refiere, tanto por cantidad y calidad de especies minerales como por su abundancia minera y por la diversidad de tipologías de depósitos minerales descritas a lo largo de su territorio.» [1]

Por lo que el sector minero-metalúrgico es de gran importancia, pues representó en 2018 el 8.2% del PIB Industrial y 2.4% del PIB Nacional, de acuerdo con datos del INEGI. [2]

Armienta (et al., 2009) y Bain (et al., 2000; Jung, 2001),[3] declaran que, desgraciadamente estas actividades producen una gran cantidad de residuos, los cuales constituyen una fuente de contaminación de suelos, sedimentos y cuerpos de agua subterráneas y superficiales (p.2015), en la Figura 1 se pueden observar los efectos sobre un cuerpo de agua superficial, característicos de drenaje ácido de mina.



Figura 1 Balsa de Aguas Contaminadas Derivadas del Proceso de Extracción de Recursos en una Mina de Cielo Abierto.

Fuente: Recuperado el 24 de septiembre de <https://geoinnova.org/blog-territorio/mineria-cielo-abierto-impactos/>

Como resultado de la actividad minera, hay cientos de millones de toneladas de residuos de minas o jales, dispersos en los sitios aledaños al lugar de extracción del metal de importancia. En la mayoría de los casos, no se conoce cuáles son las condiciones o propiedades que presentan estos sitios y tampoco el potencial de afectación que generan a los recursos naturales y el ambiente [4].

Es necesario conocer el grado de peligrosidad de estos residuos, los cuales dependen de los siguientes factores:

- Naturaleza tóxica, determinada por la geología del yacimiento.
- Concentraciones de metales y metaloides (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Se, Zn, etc.).
- Acción de los factores biológicos y geoquímicos sobre los residuos.

Esta peligrosidad se evalúa en función de la capacidad de generación del llamado “Drenaje Ácido de Mina (DAM)”); conocido, de igual manera, como DA o AMD (*Acid Mine Drainage*), por sus siglas en inglés.

Debido a los problemas ambientales que puede provocar el DA, se han utilizado diversos métodos de estabilización química, entre estos los “métodos de tratamiento pasivos”, basados en los mismos procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los humedales naturales, en donde se modifican favorablemente ciertas características de las aguas contaminadas, consiguiendo la eliminación de metales y la neutralización del pH [6] al agregar material ajeno al jal o cualquier otro generador de DA.

En la presa de jales llamada “Guásimas”, ubicada en Peña Colorada, al llegar al final de su vida útil, como se establece en la NOM-141-SEMARNAT-2003, se debe de implementar un plan de cierre, el cual, implica cubrir con un material mineral los jales, con el objetivo de evitar:

- La generación de DA, pues en trabajos previos se ha documentado la capacidad de estos jales para generarlo.
- La emisión de partículas sólidas a la atmósfera.
- La fijación de especies vegetales y
- La erosión hídrica

## 1.1 Justificación

El presente trabajo pretende contribuir a afrontar las problemáticas observadas en la presa de jales “Guásimas” de Peña Colorada, ya que se observó la muerte de especies vegetales, después de aproximadamente 20 años de colocada una cubierta de Conglomerado Rojo, como parte del plan de cierre de la presa de jales. Por otra parte, en ciertas zonas se observó acumulación de sales en la superficie. En dichas zonas, la vegetación era escasa o nula.

La propuesta de estabilización de los jales implica la evaluación de materiales geológicos de la zona y de su espesor óptimos, para ser usado como cubierta, la cual evite la dispersión de partículas a la atmosfera, generación de drenaje ácido, evite los procesos de migración de sales y funcione como sustrato, que permita la fijación de especies vegetales nativas.

## 1.2 Hipótesis

Al realizar pruebas de generación de drenaje ácido y migración de sales, en los jales grises y jales oxidados en campo, es posible determinar el tipo de material geológico y su espesor óptimos para ser usado como cubierta, la cual controle la generación de drenaje ácido de mina, dispersión de polvos a la atmósfera y el proceso de migración de sales a la superficie, tanto en jales grises como en jales oxidados de las zonas del Vaso y el Talud, permitiendo a su vez el desarrollo de una capa vegetal.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo General

Determinar el tipo de material geológico y el espesor óptimo, con base en las pruebas de generación de drenaje ácido y migración de sales, para ser usado como cubierta, evitando la generación de drenaje ácido de mina, dispersión de polvos a la atmósfera y el proceso de migración de sales a la superficie por capilaridad, tanto en jales grises como en jales oxidados de las zonas del Vaso y Talud de la presa de jales “Guásimas”.

### 1.3.2 Objetivos Particulares

- Caracterizar, por medio de parámetros fisicoquímicos, (pH, conductividad eléctrica y FRX) las muestras de jal de la presa de jales.
- Caracterizar mineralógicamente, por medio de DRX las muestras de jal de la presa de jales.
- Caracterizar, por medio de pruebas de oxidación acelerada, las muestras de jal de la presa de jales.
- Caracterizar, por medio de pruebas de fertilidad, los materiales tres tipos de geológicos locales: Tepetate, Conglomerado Rojo y Caolín.
- Identificar el potencial de generación de drenaje ácido del jal, por medio de parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica y concentración de sulfatos).
- Identificar la migración de sales desde el jal hasta la superficie de los materiales geológicos utilizados como cubierta, por medio de parámetros fisicoquímicos (pH y conductividad eléctrica).

## Capítulo 2. Sitio de Estudio

### 2.1 Localización

El sitio de estudio se ubica en la presa de jales “Guásimas” del Consorcio Minero Benito Juárez–Peña Colorada S.A. de C.V. (CMBJPC), Figura 2, ocupa una superficie de aproximadamente 55 hectáreas. Geográficamente se encuentra en el centro occidente del país, en el municipio de Minatitlán, extremo noroeste del estado de Colima [7].

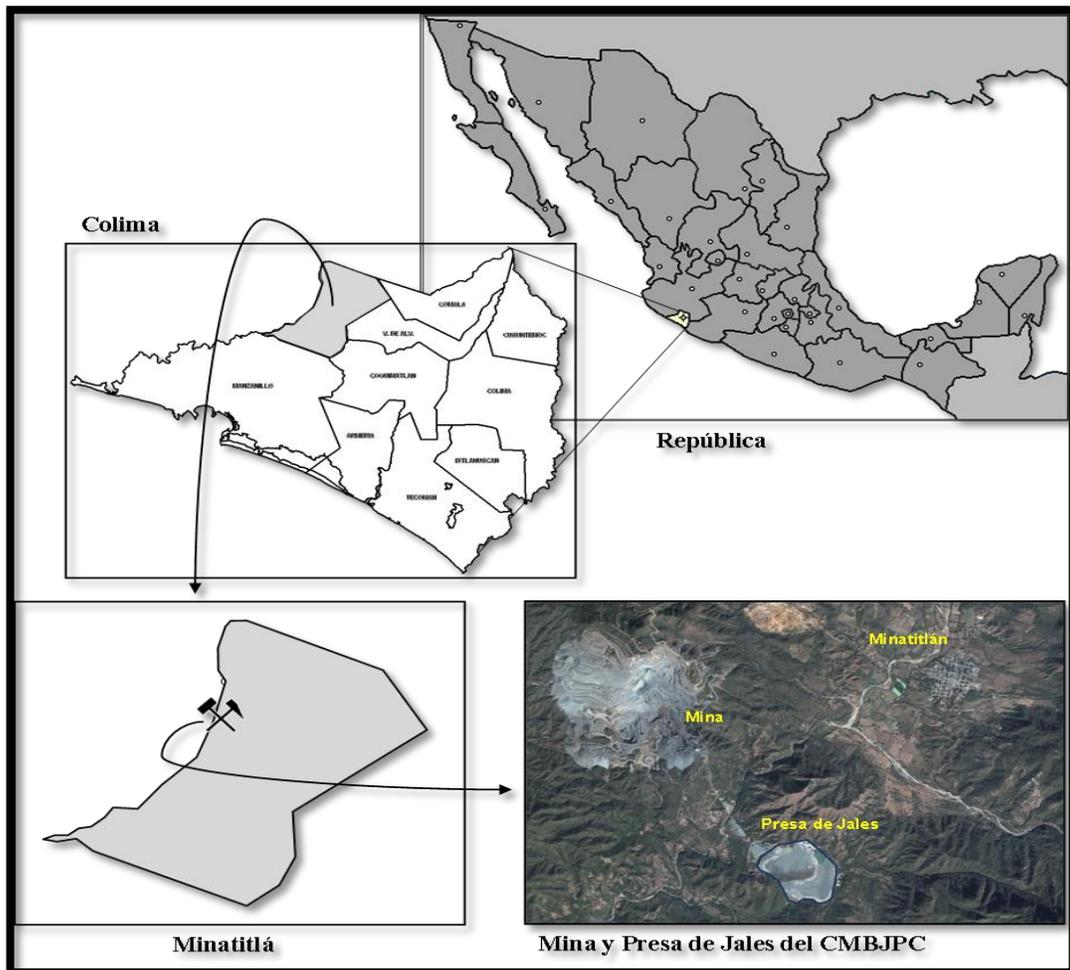


Figura 2 Ubicación del Sitio de Estudio.

Fuente: Recuperado de (Grupo de Biogeoquímica Ambiental, Instituto de Geografía-UNAM, 2008) 29 de septiembre de 2018

## 2.2 Generalidades de “Peña Colorada”

Desde que el presidente Benito Juárez, en 1867, comisionó a expertos alemanes para realizar estudios sobre el yacimiento de “Peña Colorada” este ha sido objeto de muchos más. En 1967 se constituyó como empresa por iniciativa federal y con participación de las cuatro importantes compañías siderúrgicas del país: Altos Hornos de México S.A, Fierro esponja S.A, Siderúrgica TAMSA S.A y Compañía Fundidora de Fierro y Acero de Monterrey S.A, en 1972 se aprobó la explotación de yacimiento y en julio del mismo año se inició la construcción de las instalaciones, convirtiéndose en un nuevo centro del desarrollo siderúrgico de Colima y México [8].

«Por su naturaleza de industria básica, ubicación próxima al puerto de Manzanillo, avanzada tecnología, estructura financiera, así como por el volumen de mineral y calidad, es sin duda el más importante de México» [9].

El CMBJPC S.A. de C.V. se encuentra actualmente explotando el yacimiento de Peña Colorada, por el método de “cielo abierto”, para beneficio exclusivo de hierro [10].

Desde 2005, pertenece a sus dos actuales inversionistas y únicos clientes; Ternium México y ArcelorMittal México. El 100% de su producción es embarcada en partes iguales a cada uno de sus accionistas a Monterrey, Puebla y Lázaro Cárdenas, para formar parte de la cadena siderúrgica e industrial más grande del país, se estima que aporta el 30% del mineral consumido en México usado para la industria siderúrgica [11].

## 2.3 Clima

En el municipio predomina el clima cálido subhúmedo [12], con precipitaciones principalmente en verano (junio a septiembre), como se observa en la Figura 4 y una precipitación anual de 1452.4 mm, según datos obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional (2018).

Como se observa en la Figura 3 en verano se presentaron las temperaturas más altas registradas mínima, media y máxima al igual que las precipitaciones como se observa en la Figura 4. La Tabla 1 muestra una temperatura media de 23.2 °C.

Tabla 1 Temperaturas medias anuales del municipio de Minatitlán correspondientes al periodo: 1951-2010.

Temperatura Normal Media	°C
Mínima	15.0
Media	23.2
Máxima	31.4

**Nota.** Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (2018), recuperado el 03 de octubre de 2018 de <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=col>

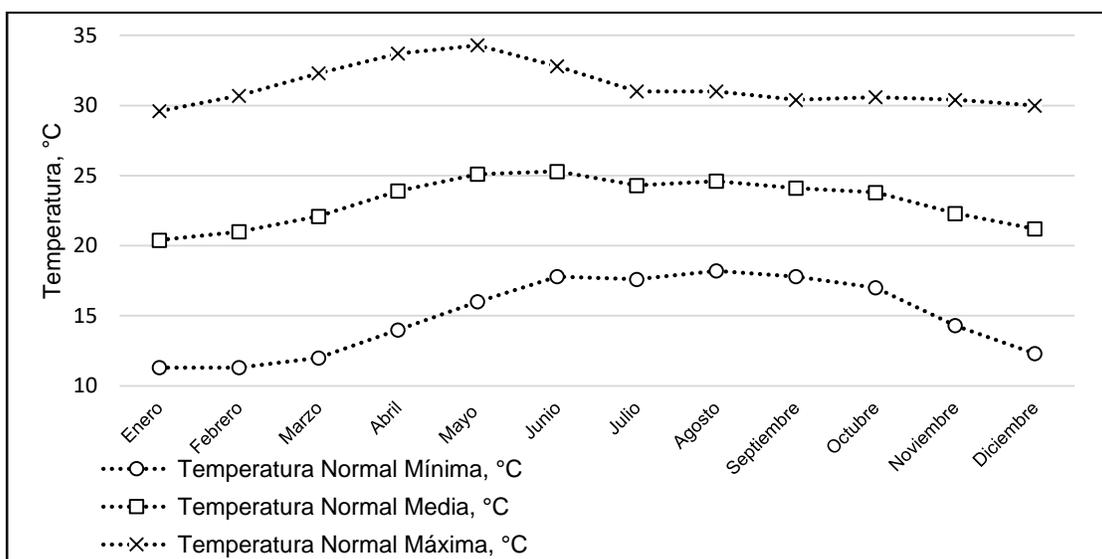


Figura 3 Temperaturas normales mínima, media y máxima mensuales correspondientes al periodo: 1951-2010. Fuente: Modificado de Servicio Meteorológico Nacional (2018), recuperado el 03 de octubre de 2018 de <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=col>

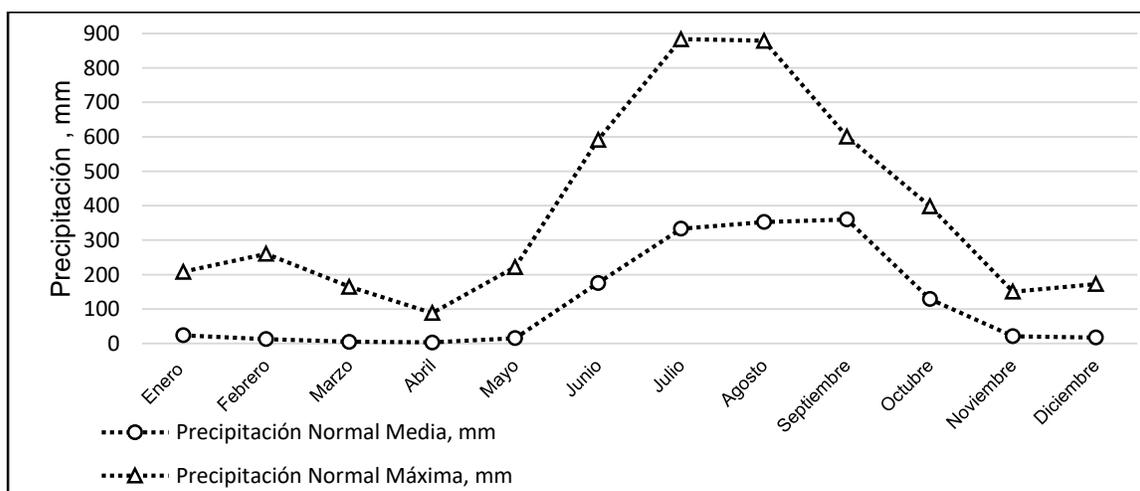


Figura 4 Precipitaciones normales media y máxima mensuales correspondientes al periodo 1951-2010. Fuente: Modificado de Servicio Meteorológico Nacional (2018), recuperado el 03 de octubre de 2018 de <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=col>

## 2.4 Hidrología

### 2.4.1 Hidrología Superficial

El estado de Colima se engloba dentro de las regiones hidrológicas 15 y 16, denominadas “Costa de Jalisco” y “Armería-Coahuayana” [13].

La infraestructura hidráulica comprende más de 130 obras, donde destacan presas derivadoras y el lago Amela, este último almacena aproximadamente 26.5 mm<sup>3</sup> destinados fundamentalmente al riego [13]. Sin embargo, no se cuenta con infraestructura hidráulica que aproveche los escurrimientos superficiales, únicamente acueductos para conducir agua de manantiales y de ríos, destinada principalmente a la agricultura [14].

### 2.4.2 Hidrología Subterránea

El Acuífero<sup>1</sup> Minatitlán es de tipo libre<sup>2</sup> constituido por depósitos aluviales formados por mezclas de gravas y arenas en espesores que varían de 10 a 50m. Este se constituye a partir de que en la estribación Sur de la Sierra de Manantlán nace el Río Minatitlán-Marabasco el cual 8 km aguas abajo cruza el Valle denominado Minatitlán, en el que toda el agua que llueve escurre hacia el centro incrementando el volumen de este; que, a su vez, forma una serie de meandros con la erosión en las interdigitaciones de los depósitos aluviales y fluviales (de gran permeabilidad) poco consolidados [15].

Las principales recargas provienen del Río Minatitlán y de sus afluentes, los arroyos: La Loma, El Rincón, La Mesa; El Tío Nacho, Bonete y El Peón; también recibe recarga de la precipitación pluvial directa. Su descarga se efectúa por salida de flujo de agua subterránea y extracción por bombeo de agua subterránea. [15]

---

<sup>1</sup> Formación geológica, formada por una o más capas de rocas (gravas, arenas, caliza...), situada en la zona saturada, capaz de almacenar y transmitir al agua libre en cantidades importantes. Se caracteriza, por poseer una permeabilidad significativa y una extensión y espesor considerables. Constituyen almacenes de enormes reservas que pueden ser utilizadas, mediante obras de captación. (Hispagua. (s.f.). Hidrogeología, recuperado el 3 de octubre de 2018, de <http://hispagua.cedex.es/>)

<sup>2</sup> Aquellos que entre ellos existe una superficie libre y real del agua almacenada, que está en contacto con el aire y a la presión atmosférica. Entre la superficie del terreno y el nivel freático se encuentra la zona no saturada. La superficie hasta dónde llega el agua, se denomina superficie freática; cuando esta superficie es cortada por un pozo se habla de nivel freático en ese punto. (ídem)

### 2.4.3 Hidrogeoquímica

De trabajos realizados en 2013 por CONAGUA se obtuvieron los resultados de análisis fisicoquímicos mostrados en la Tabla 2 del acuífero de Colima [14].

Tabla 2 Resumen de resultados de parámetros hidrogeoquímicos y de calidad de agua subterránea del acuífero Minatitlán.

<b>Parámetro</b>	<b>LMP<sup>a</sup></b>	<b>Resultado</b>
STD <sup>b</sup>	1000 mg/L	68-639 mg/L
C. E <sup>c</sup>	50-1500	106-999 $\mu$ S/cm
Temperatura	-	23.4-28.2°C
pH		6.6-8.2
Arsénico	0.025 mg/L y 0.100 mg/L	5.5 $\mu$ g/L *
Flúor	1.5 mg/L	0.33 mg/L **
Boro	1 mg/L <sup>e</sup>	0.38 mg/L ***

**Nota:** Fuente: CONAGUA, Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero de Colima (0601), Estado de Colima, 2018,p. 21.

a Límite máximo permisible

b Sólidos Totales Disueltos

c Conductividad Eléctrica

\*,\*\* y \*\*\* son promedios estadísticos de las mediciones.

En la última actualización del acuífero Minatitlán por CONAGUA, la concentración de sales es menor a 500 ppm de Sólidos Totales Disueltos (STD), debido a la rápida circulación a través de acuíferos bastante permeables y de dimensiones reducidas. Los iones disueltos predominantes en estas aguas son:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$  procediendo los dos primeros de la disolución de los feldespato cálcicos y sódicos constituyentes de las rocas ígneas. Actualmente las concentraciones de STD se encuentran entre 530 y 810 ppm.

## 2.4 Geología y Minería

### 2.4.1 Yacimiento

El yacimiento de “Peña Colorada” forma parte de la Sierra del Mamey, ubicada en la subprovincia de las cordilleras de la Sierra Madre del Sur (Figura 5). Las formas orográficas están representadas por topografía muy abrupta, sobresaliendo los cerros de Copales, La Piedra Colorada, El Peón, El Chino, El Zapote y parte de la Sierra de Manantlán [9] «Las reservas totales de este yacimiento se cifraban entre los 250 y los 300 millones de toneladas, antes del inicio de su explotación, con una ley media comprendida entre el 50 y el 60% de Fe magnético» [10].

«El área de Minatitlán-Peña Colorada, está conformada por remanentes de las secuencias plegadas que fueron levantadas y basculadas por los intrusivos del Terciario.». [10]

Las rocas en donde se encuentran los cuerpos de mineral de “Peña Colorada” consisten en una secuencia volcanosedimentaria descrita como Formación Tepalcatepec [10].

Se pueden diferenciar cuatro cuerpos mineralizados principales:

- Cuerpo central de mena: Tiene un espesor de 30m y longitud mayor a un km y 300m en su parte ancha. Se encuentra conformado por magnetita (>85%), martita, hematita, pirita, piroxeno, clorita, apatita y carbonatos.
- Cuerpo de mineral diseminado: Se encuentra a 100 m abajo del masivo principal; tiene un espesor mayor a los 20 m con una anchura superior a los 400 m y 2,000 m de longitud. Lo conforman una alternancia de capas delgadas de cristales de magnetita y capas delgadas de tobas andesíticas.
- Cuerpos masivos tubulares: Se encuentra en el área de “La Chula”, tiene un espesor promedio de 30m, longitud de 400m y profundidad de 50m. Conformado por magnetita con un 55 a 60% de hierro y tamaño de grano submilimétrico.
- Cuerpo de Brecha: Constituida por fragmentos de andesita, granodiorita, aplitas, acumulado de feldespato potásico y magnetita maciza en una matriz de magnetita con pirita [10].

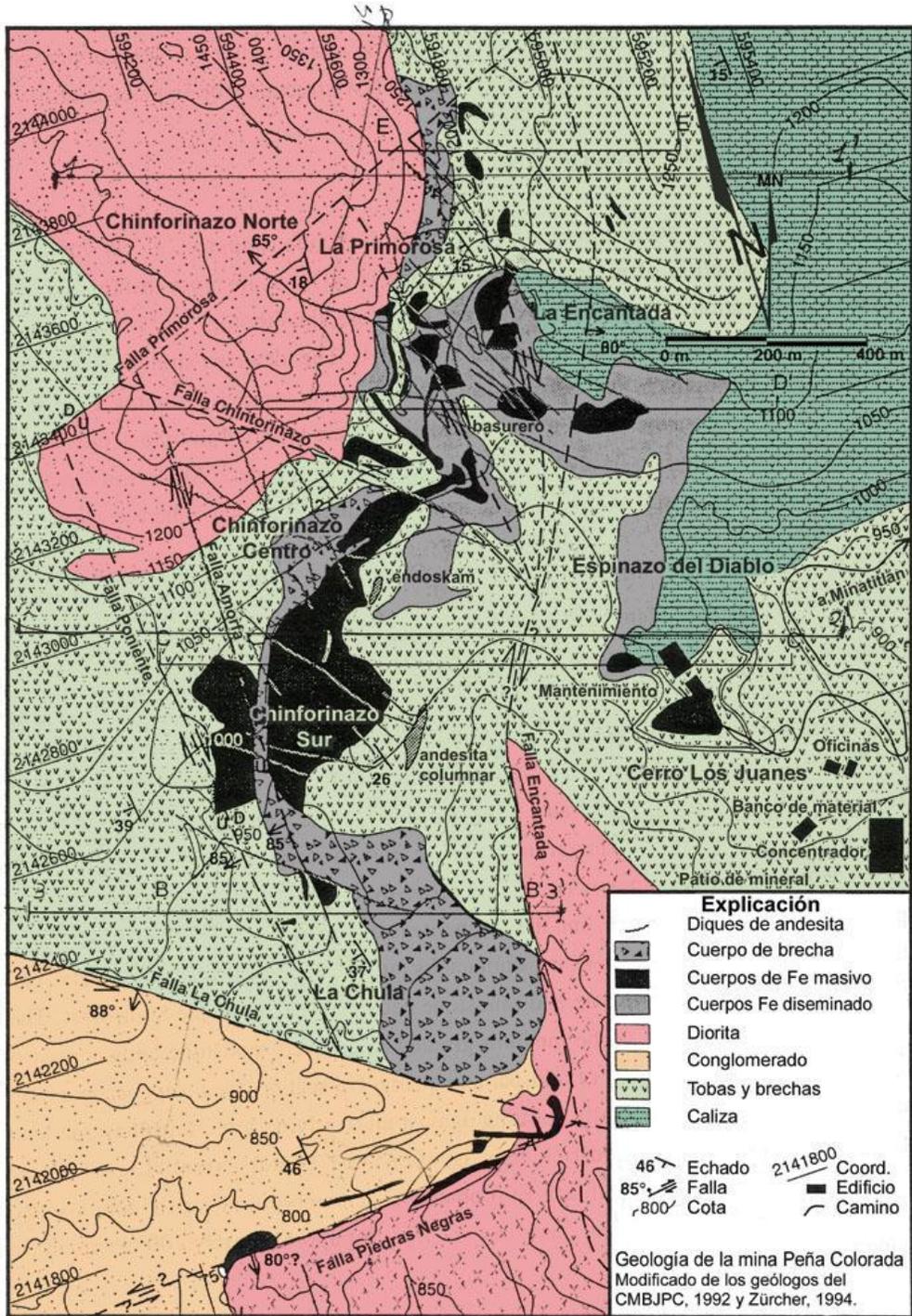


Figura 5 Mapa geológico del yacimiento de "Peña Colorada", Colima.

Fuente: (Corona Esquivel, *et.al.*, 2009), recuperado el 05 de octubre de 2018 de

[https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Mapa-geologico-del-yacimiento-de-Pena-Colorada-Colima-Despues-de\\_fig8\\_273439003](https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Mapa-geologico-del-yacimiento-de-Pena-Colorada-Colima-Despues-de_fig8_273439003)

## 2.4.2 Sistema de Minado y Beneficio de Minerales

Como se mencionó anteriormente, la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) es el mineral comercialmente valioso explotado por el CMBJPC.

En la Figura 6 se describe el proceso que se sigue, desde la obtención del mineral, los procesos de trituración y conminución primaria y secundaria, hasta la obtención del producto final (pellet). De las operaciones de separación y concentración, los residuos sólidos generados se denominan jales<sup>3</sup> y son acumulados en las llamadas presas de jales<sup>4</sup> para su disposición y posterior contención y/o tratamiento, si estos residuos contienen EPT o son posibles generadores de DA.

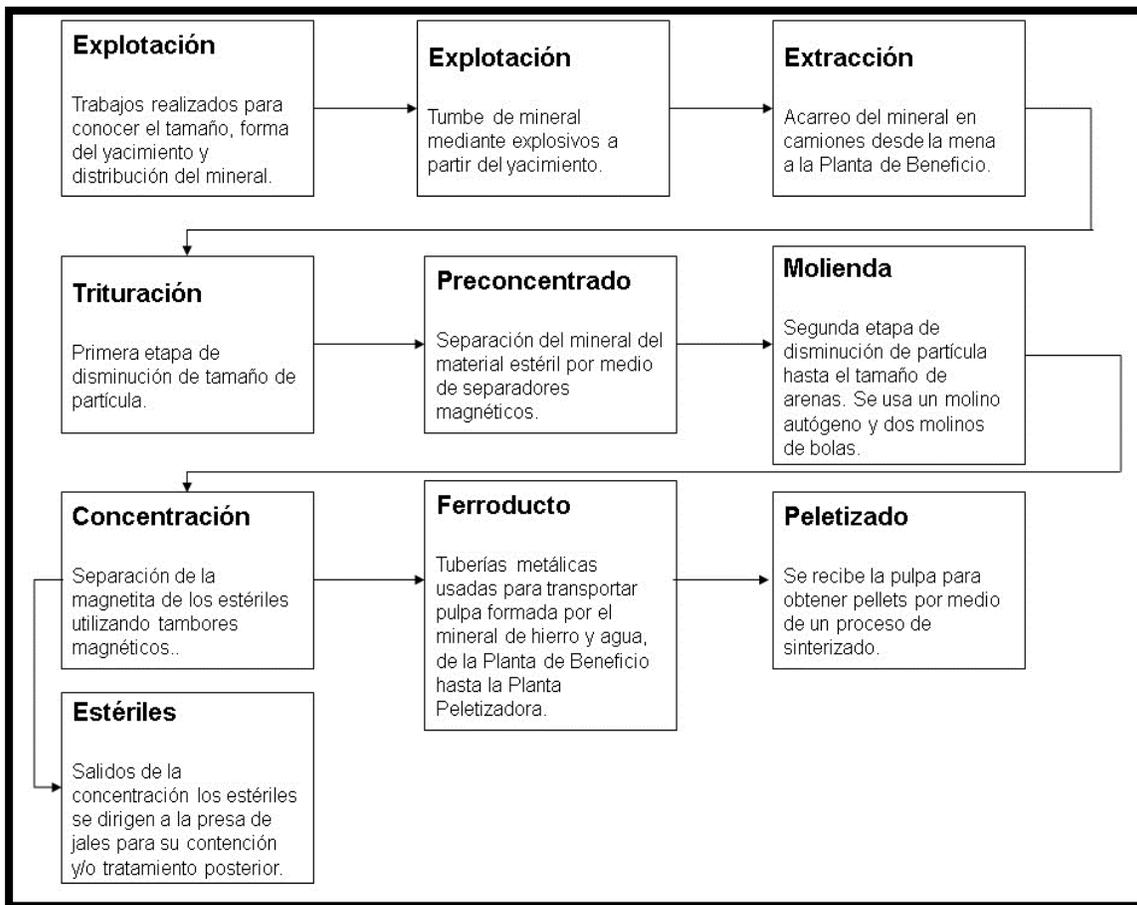


Figura 6 Diagrama de flujo del procesamiento de magnetita de CMBJPC.

Fuente: Modificado de Mota Sánchez, K. (2013). Análisis Multitemporal para la Evaluación de Impacto Ambiental de una Mina de Hierro a Cielo Abierto. Tesis de Maestría, UNAM, DF, p.28.

<sup>3</sup> Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, NORMA Oficial Mexicana, NOM-141-SEMARNAT-2003.

<sup>4</sup> Obra de ingeniería para el almacenamiento o disposición final de los jales, cuya construcción y operación ocurren simultáneamente.

## Capítulo 3. Marco Teórico

### 3.1 Depósitos de Jales

#### 3.1.1 Definición de Depósitos de Jales

Para definir correctamente qué es un Depósito de Jales, primero se deben precisar los siguientes términos:

Residuos Mineros: «Todos aquellos residuos provenientes de las actividades de la explotación y beneficio de minerales o sustancias» [16]. La norma NOM-157-SEMARNAT-2009 da una clara clasificación de estos residuos, como se muestra en la Figura 8.

Jales Mineros: «Todos aquellos residuos mineros sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales» [16].

Por lo tanto, un Depósito o Presa de Jales es: Cualquier obra de ingeniería diseñada para el almacenamiento o disposición final de los jales mineros, cuya construcción y operación ocurren simultáneamente, en la Figura 7 se puede observar un ejemplo de una presa de jales.



Figura 7 Presa de Jales "El Arrayanal" de la minera Peña Colorada. Fuente: Recuperada el 31 de octubre del 2018 de: <http://www.jornada.com.mx/2013/07/11/estados/036n1est>

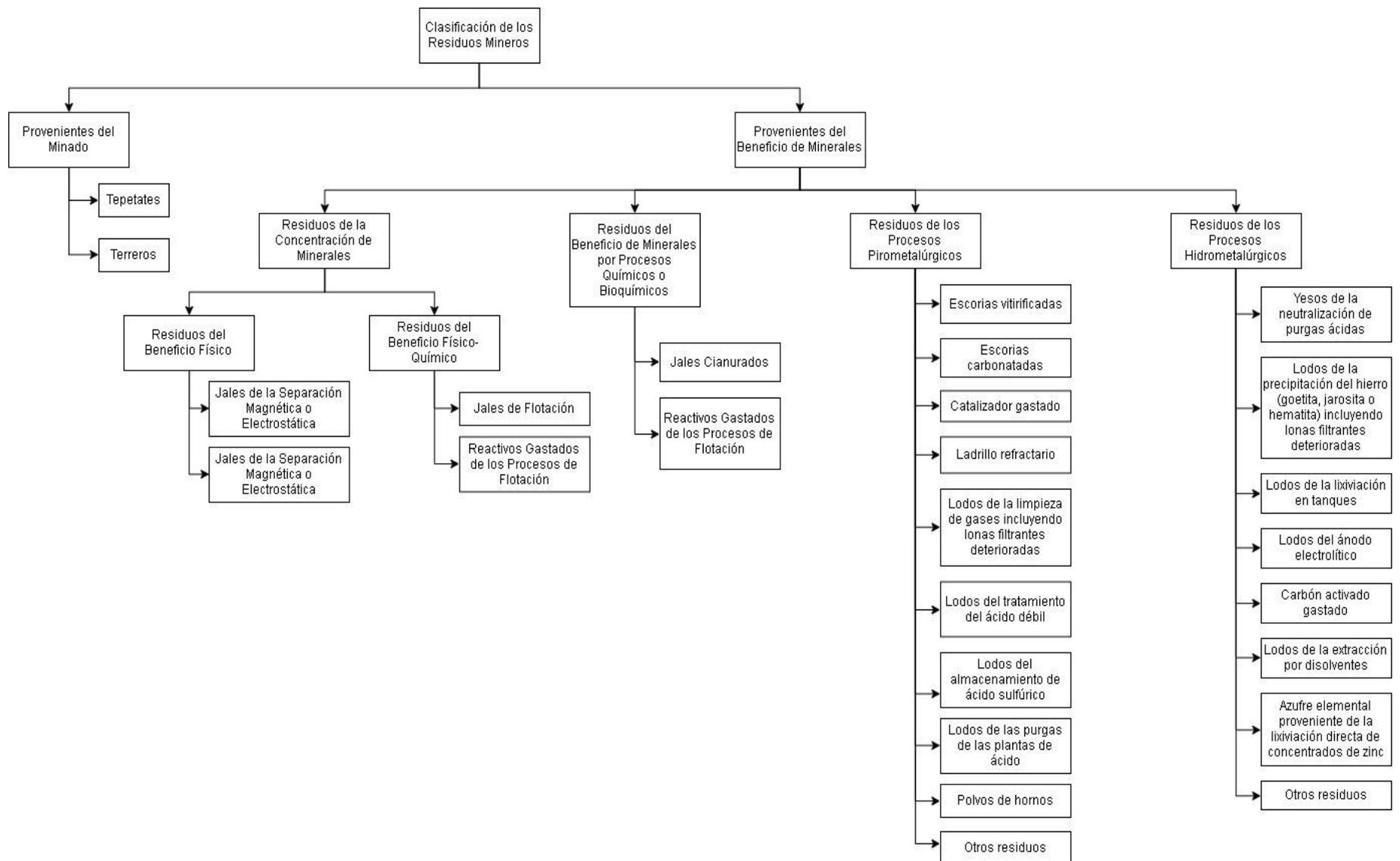


Figura 8 Diagrama de la Clasificación de Residuos Mineros

Fuente: Modificado de NOM-157-SEMARNAT-2009

### 3.1.2 Características de los Depósitos de Jales

En la Norma Oficial Mexicana, NOM-141-SEMARNAT-2003, se señalan especificaciones y criterios ambientales para las etapas de preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de depósitos de jales. Estas son las siguientes:

- Estudios Previos: Presentación los resultados, análisis y conclusiones de los estudios generados previos a la preparación del sitio.  
Preparación del Sitio: Preparaciones para evitar o mitigar el daño sobre elementos identificados presentando elementos de prevención o control de contaminación, a menos que el jal no sea peligroso.
- Proyecto: Considerar los siguientes factores: Volumen de Almacenamiento Estimado, Análisis de Estabilidad, Manejo de Esguimientos Superficiales, Sistema de Recuperación, Cortina Contenedora formada por suelos y materiales definidos según el S.U.C. S<sup>5</sup> o fragmentos de rocas, Sistemas de Retención en caso de fallas por inundación y Sistemas de Recuperación de aguas.
- Construcción-operación: Para la construcción del depósito de jales este debe evitar la degradación de la calidad del agua subterránea y sus fuentes de abastecimiento, asegurando que no habrá derrames e infiltraciones en los ductos de envío de jales y evitar que la Cortina Contenedora se convierta en una fuente de emisión de partículas.

---

<sup>5</sup> Sistema Unificado de Clasificación de Suelos encontrado en el Anexo Normativo 4 de la NOM-141-SEMARNAT-2003

- Postoperación: Una vez finalizada la vida útil de un depósito de jales se deben implementar las siguientes medidas que aseguren que:
  - No emitir partículas sólidas a la atmosfera debido a la perdida de humedad en la superficie de la Cortina Contenedora.
  - No formar escurrimientos que afecten a cuerpos de agua superficiales y subterráneos.
  - No falle en su estabilidad mecánica.

Si los jales son potenciales generadores de drenaje ácido se deberá:

- Cubrir con material mineral o agua u otro material que impida la acidificación del jal.
- No utilizar especies vegetales que promuevan la acidificación del sustrato.
- La superficie del depósito debe ser cubierta con suelo que permita la fijación de especies vegetales originarias de la región.
- Si no se pueden establecer medidas para evitar la formación de drenaje ácido, se debe establecer su tratamiento.
- Cuando sea necesario, los Taludes deberán ser ajustados para garantizar su estabilidad.

## 3.2 Drenajes de Mina

### 3.2.1 Definición de Drenaje de Mina

Se puede definir “Drenaje de Mina” como:

Efluentes provenientes de trabajos mineros, los cuales debido a su contenido de metales y metaloides (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Se, Zn, etc.) y/o pH (ácido o alcalino) resultan tóxicos para el hombre y el medio ambiente.

### 3.2.2 Tipos de Drenaje de Mina

Los Drenajes de mina se pueden clasificar en dos grandes tipos:

- Drenajes alcalinos  
Son aquellos generados por la disolución de minerales básicos (óxidos, hidróxidos y silicatos), usualmente asociados a la minería de diamantes, molienda de bauxita y cenizas de combustión de carbón [17], los cuales alcanzan valores de pH mayores a 9 unidades, siendo más comunes en minas subterráneas.
- Drenajes ácidos  
Son aquellos generados por la oxidación de minerales sulfurados (pirita, pirrotita, marcasita, etc.) los cuales alcanzan valores de pH menores a 6 unidades, siendo más comunes en minas a cielo abierto.

### 3.2.3 Drenaje Ácido de Mina

Se puede definir al “Drenaje Ácido de Mina” o por sus siglas “DAM”, como:

Aquellos efluentes provenientes de trabajos mineros, generados por la oxidación de minerales sulfurados, los cuales alcanzan valores de pH menores a 6 unidades. Siendo más comunes en minas a cielo abierto.

### 3.2.4 Características del Drenaje Ácido de Mina

El DAM presenta valores bajos de pH, entre 1.5 y 6 unidades, debido a la formación de ácido sulfúrico (contenido de sulfato superior a los 2 500 mg/l) [18] y elevadas concentraciones de metales pesados como el cobre, plomo, arsénico, entre otros; que son solubles a valores de pH bajos [22].

Genera sedimentos de color rojo – naranja debido a precipitados de hierro y de sulfatos impactando en la fauna acuática y a la vegetación terrestre impidiendo su crecimiento normal [18].

Una vez generado el DAM el proceso de formación es cíclico e irreversible y perdura por años o décadas hasta tanto no sea eliminado uno de los principales agentes que lo causan.

En la presa de jales “Guásimas” el Talud Este fue recubierto con un material que comenzó a presentar la generación de DAM, como se observa en la Figura 9, se puede reconocer el DAM claramente pues presenta todas las características anteriormente mencionadas.



Figura 9 Fotografía de DAM formado en el Talud Este recubierto, de una presa de jales.

Fuente: Propia

### 3.2.5 Procesos de Drenaje Ácido de Mina

#### 3.2.5.1 Proceso Generador de DAM

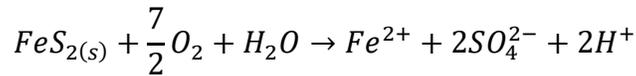
Nordstrom y Alpers (1999) describen el proceso de oxidación de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), como el principal responsable de la formación de aguas ácidas; esta oxidación se ve favorecida en áreas mineras debido a la facilidad con la que el aire entra en contacto con los sulfuros a través de las labores mineras de acceso y por los poros existentes en las pilas de estériles y residuos, así como al incremento de la superficie de contacto de las partículas.

Los factores de la generación de DAM son: volumen, concentración de sulfuros, granulometría, distribución espacial de la pirita, temperatura, presencia de agua o aire y bacterias (*Thiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus ferrooxidans*).

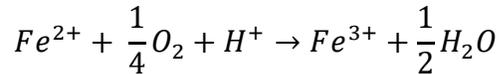
Mucha de la literatura concerniente a este tema considera los jales como la principal causa de la generación de DAM; sin embargo, cualquier mineral sulfurado el cual cuente con las condiciones oxidantes adecuadas es capaz de generarlo. (*ibidem*)

Pérez, Schwarz, & Urrutia(2017), describen el proceso de generador de DAM como se muestra a continuación en las Ecuaciones de la 1 a la 4 [19]:

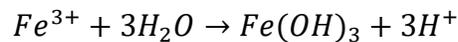
Ecuación 1 Liberación de hierro de la pirita (FeS<sub>2</sub>)



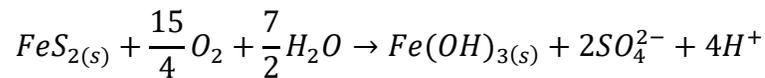
Ecuación 2 Oxidación de Fe<sup>2+</sup> a Fe<sup>3+</sup>



Ecuación 3 Precipitación de hidróxido de hierro y liberación de H<sup>+</sup>



Ecuación 4 Reacción completa de oxidación de la pirita



### 3.2.5.2 Procesos de DAM en los Depósitos de Jales

A continuación, se describen los procesos de generación de drenaje ácido en los depósitos de jales:

1. Oxidación de sulfuros: Liberación de protones, altas concentraciones de sulfatos y EPT (Elementos Potencialmente Tóxicos) a la fase acuosa.
2. Sulfato reducción: Controla la solubilidad de los EPT al precipitarlos como sulfuros secundarios; además, consume protones incrementando el pH.
3. Neutralización de acidez por calcita: El equilibrio entre protones, y los carbonatos y bicarbonatos es el más importante, ya que regula el pH y tiene influencia directa sobre la precipitación y la adsorción de EPT.
4. Precipitación de EPT como sulfatos o carbonatos a pH alcalino: Esta reacción puede ser reversible bajo condiciones ácidas.
5. Adsorción de EPT en la superficie de ferrihidrita y otros oxihidróxidos: Esta reacción puede ser reversible bajo condiciones reductoras [20].

### 3.3 Control del Drenaje Ácido de Mina

#### 3.3.1 Definición de Control de DAM

El Control del Drenaje Ácido involucra a todas aquellas acciones encaminadas a prevenir o mitigar la generación de DAM, satisfaciendo los criterios de calidad medioambiental, en donde se desarrolla la actividad minera.

#### 3.3.2 Tipos de Control de DAM

El Control del Drenaje Ácido comprende dos tipos:

- Preventivo: Se adoptan las medidas necesarias previas al inicio de la actividad minera, conociendo de antemano el potencial de generación de DAM del contaminante.
- Correctivo: Se adoptan las medidas necesarias en el momento en que las medidas preventivas no tuvieron el efecto esperado y es posible la generación o se está llevando a cabo la generación de DAM [17].

Dentro de estas clasificaciones se encuentran los métodos de Barrera y Químicos, los cuales se busca la posibilidad de implementar, tanto preventiva como correctivamente.

En la Figura 12 se da una clara clasificación de estos métodos y sus variantes.

##### *3.3.2.1 Métodos de Barrera*

Los métodos de barrera emplean, como dice su nombre, barreras físicas, las cuales impiden la mezcla y dilución de efluentes generados por los residuos o reduciendo el potencial de generación de DAM, manteniendo excluidos los residuos del oxígeno que se encuentra en la atmosfera o el agua.

En general todo método de barrera debe de utilizar el o los materiales adecuados, en función de la capacidad de generación de DAM de los residuos, que impidan la difusión de oxígeno a través de esta, como se ejemplifica en la Figura 10.

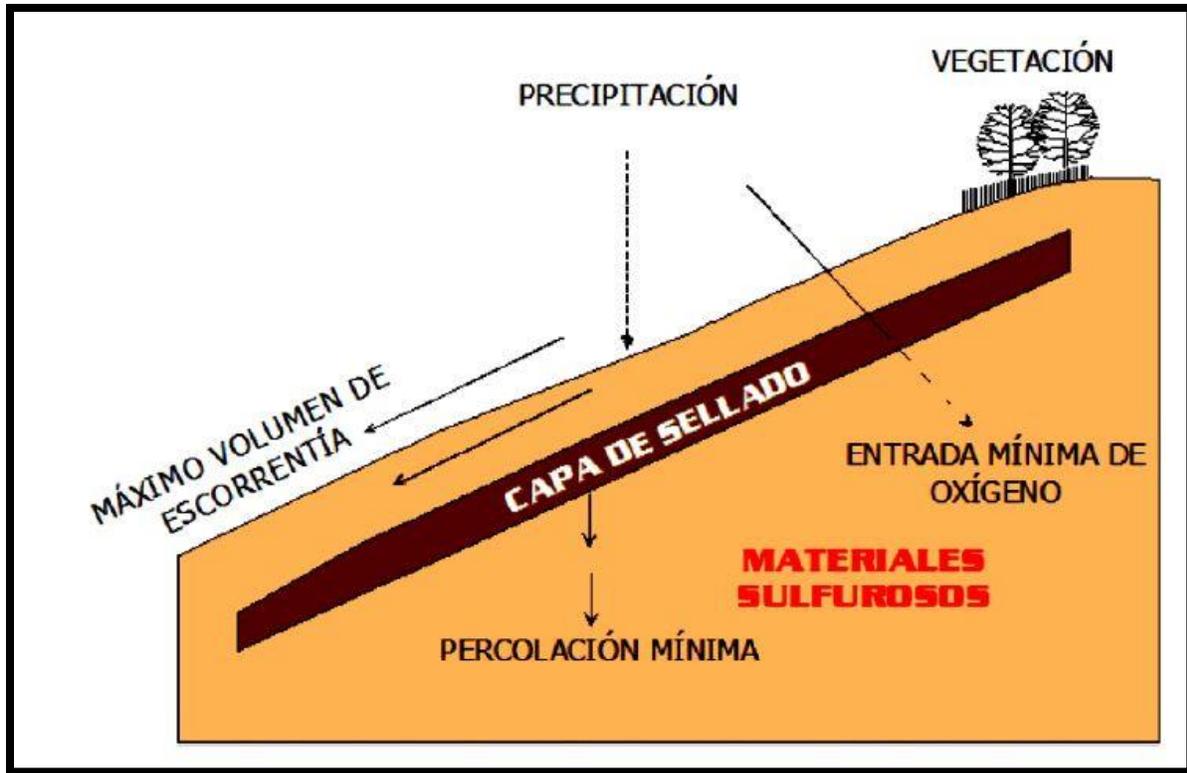


Figura 10 Ejemplo de un Método de Barrera, Sellado de Materiales. Fuente: Recuperado de Aduvire, O. (2006). Drenaje Acido de Mina Generación y Tratamiento p.40.

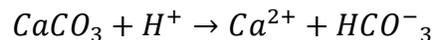
### 3.3.2.2 Métodos Químicos

Los métodos químicos buscan inhibir el DAM, manteniendo el pH de los efluentes de mina en condiciones alcalinas, al adicionar materiales alcalinos como pueden ser: roca caliza, cal, fosfatos entre otros, limitando así la oxidación de los sulfuros y la actividad bacteriana [17].

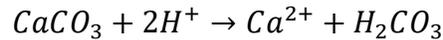
Al tener minerales alcalinos (NaOH, CaCO<sub>3</sub>, CaO, Ca (OH)<sub>2</sub>, Al (OH)<sub>3</sub> y Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) y minerales potencialmente generadores de DAM, se llevarán a cabo reacciones de neutralización.

Un ejemplo de las reacciones que se llevan a cabo es la reacción de la calcita (CaCO<sub>3</sub>) con minerales ácidos, como la pirita, formando iones bicarbonato(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) o ácido carbónico H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>:

Ecuación 5 Reacción entre el carbonato de calcio y protones, formando iones calcio 2+ y bicarbonato 1-.



Ecuación 6 Reacción entre el carbonato de calcio y dos protones, formando iones calcio 2+ y ácido carbónico.



La eficiencia de estos métodos, depende principalmente de:

- La homogeneidad del mineral alcalino.
- El movimiento del agua a través del sistema.
- El contacto entre la roca o eluyentes ácidos y el mineral alcalino o agua.
- La proporción de material neutro en exceso.
- El tipo y pureza del mineral alcalino.

### 3.3.3.3 Tratamiento de Aguas Ácidas

De igual manera podemos encontrar otra clasificación para el control del DAM, estos son los tratamientos activos y pasivos.

#### 3.3.3.3.1 Tratamientos Activos de DAM

Los tratamientos activos de DAM se encargan de la remoción de los metales pesados y del aumento del pH de los efluentes ácidos.

Estos requieren, generalmente, del monitoreo constante del sistema, electricidad, insumos, remoción de subproductos generados, equipo (tanques, mezcladores, bombas, etc.) y mantenimiento continuo [21]. En muchos casos se adicionan agentes químicos neutralizantes, como son el carbonato de calcio, cal hidratada o sosa caustica, ajustando el pH y precipitando metales, en forma de hidroxidos de los efluentes [22].

Younger(2002) menciona dos de los más predominantes métodos de tratamientos activos de DAM, estos son:

- ODAS: **O**xidación, **D**osificar con un **A**lcali y **S**edimentación
- DAOS: **D**osificar con un **A**lcali, **O**xidación y **S**edimentación

Un gran desventaja de estos tratamientos es mantenerlos por un periodos largos, una vez terminadas las labores en la mina.

### 3.3.3.3.2 Tratamientos Pasivos de DAM

Los tratamientos pasivos de DAM se encargan, de igual manera que los activos, de la remoción de los metales pesados y del aumento del pH de los efluentes ácidos, sin embargo, a diferencia de los activos requieren poco mantenimiento y un coste bajo, que se puede asumir por periodos de entre 20 y 40 años [23].

Estos tratamientos son especialmente atractivos para la industria ya que requieren un mínimo de intervención humana, rara vez requieren manejo de subproductos y no se necesita el uso de electricidad e insumos adicionales [22].

Entre los sistemas pasivos más comunes se encuentran:

- Los humedales
- Los canales de caliza: Abiertos y cerrados
- Las barreras reactivas permeables

En la Figura 11 se parecía un ejemplo claro del Tratamiento por Barreras Reactivas.

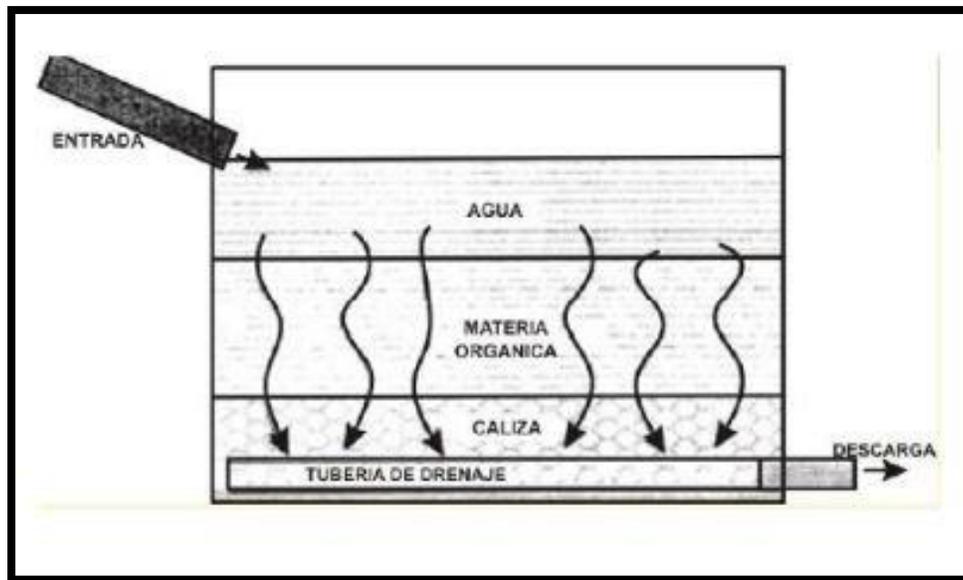


Figura 11 Sistema de Tratamiento Pasivo de Barreras Reactivas. Fuente: Recuperado de Chaparro Leal, L. T. (junio de 2015). Drenajes Ácidos de Mina Formación y Manejo. ESAICA, 1(1), 56.

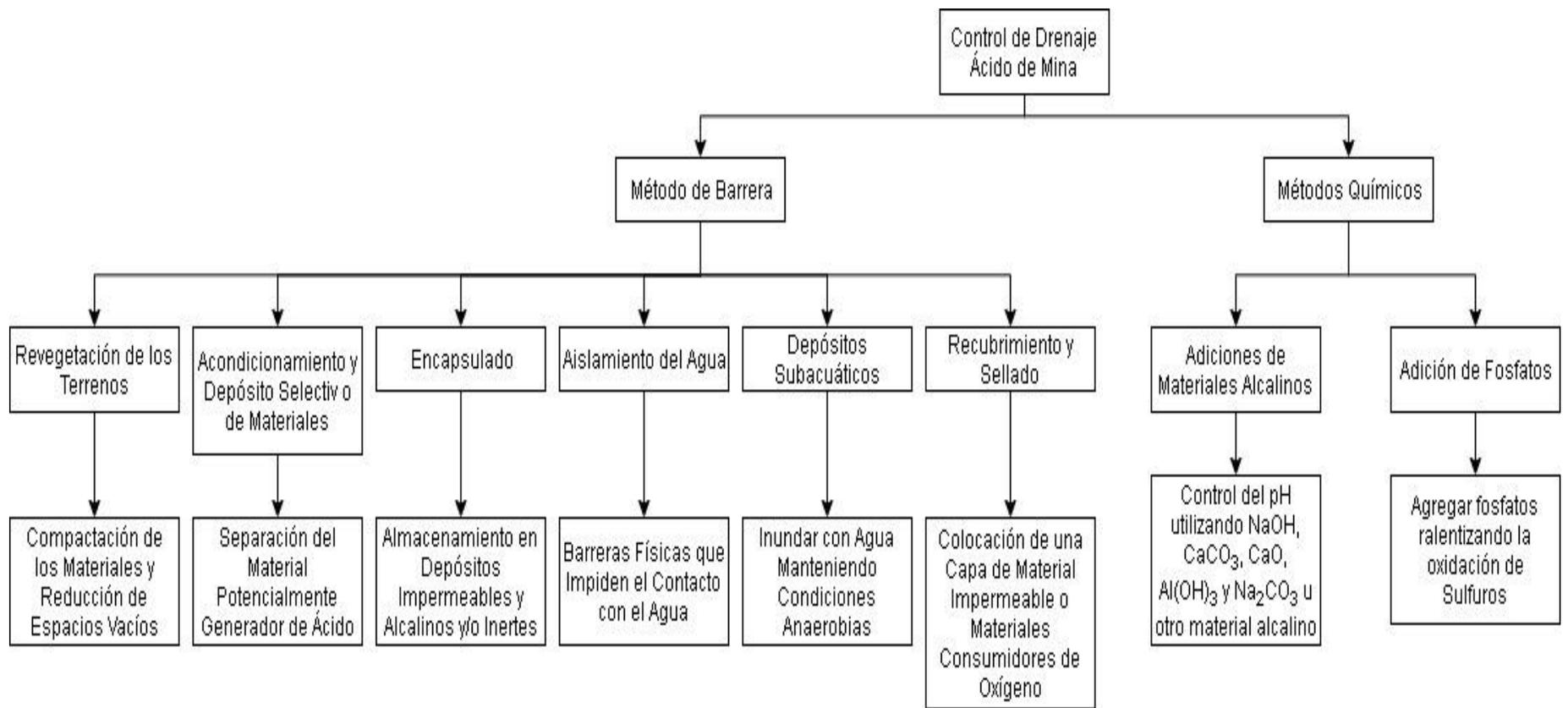


Figura 12 Métodos de Control de DAM Fuente: Modificado de Aduvire, O. (2006). Drenaje Acido de Mina Generación y Tratamiento. p. 31-433.4.3 Procesos de Métodos de Control de DAM

## Capítulo 4. Antecedentes

Tabla 3 Resumen de los antecedentes nacionales relacionados al trabajo presente.

### 4.1 Nacionales

<p>4.1.1 Grupo de Biogeoquímica Ambiental, 2008, "PLAN DE CIERRE DE LA PRESA DE JALES DEL CMBJPC, DE ACUERDO A LAS NORMAS OFICIALES MEXICANAS."</p>	<p>De acuerdo con los criterios señalados en la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, los jales de estudio se clasifican como NO PELIGROSOS por su toxicidad debido a que no contienen elementos potencialmente tóxicos solubles en concentraciones superiores a las señaladas en dicha norma. Sin embargo, se clasifican como PELIGROSOS por su capacidad para la generación de drenaje ácido.</p> <p>De los elementos regulados en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, solamente en algunos sitios las concentraciones totales de bario (Ba), cadmio (Cd) y níquel (Ni) -en los suelos- y de bario (Ba), plata (Ag) y Ni (Ni) -en los sedimentos- son superiores a las concentraciones naturales de fondo. Sin embargo, en ninguno de los casos se superan los límites de referencia señalados en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, lo que indica que no hay un riesgo potencial al ambiente.</p> <p>En cuanto a los otros elementos regulados en NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (As, Be, Cr (VI), Hg, Ni, Pb, Se, Tl y V) sus concentraciones totales no rebasan las concentraciones naturales de fondo, lo que permite concluir que no ha habido afectación de suelos y sedimentos con estos elementos.</p> <p>Las concentraciones solubles de los elementos potencialmente tóxicos regulados en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (As, Ba, Be, Cd, Cr (VI), Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl y V) son inferiores al límite de detección de la técnica analítica, que a su vez son menores que las concentraciones de referencia de contaminantes solubles (CRS) señalados en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Estos resultados indican que en los suelos y sedimentos los elementos potencialmente tóxicos no están geodisponibles y por lo tanto su movilidad es muy limitada; lo que permite comprobar que no existe riesgo ambiental.</p>
<p>4.1.2 Goslinga Arenas Juan Antonio, 2015, "Evaluación de la capacidad de tres tipos de rocas para neutralizar el drenaje ácido generado en una mina."</p>	<p>Se analizó la capacidad de tres tipos de rocas (filitas gráficas, esquistos de sericita/clorita y metacaliza) asociadas al yacimiento de la mina estudiada, para neutralizar el DAM generado en la misma, determinando su viabilidad para usarse en un sistema de tratamiento pasivo.</p> <p>Se realizaron tres etapas de prueba agitación de lotes variando los parámetros como: Relación sólido-líquido(roca-DAM), granulometrías de las muestras de roca y diferentes tiempos de agitación; así como la agitación de una misma muestra de DAM con un solo tipo de roca o varios tipos de rocas. Posterior a la agitación se analizó la calidad de las soluciones, determinando el pH, conductividad eléctrica y la eliminación de metales pesados y metaloides en el DAM</p> <p>Se determinó que las filitas y metacaliza son capaces de neutralizar el DAM, eliminando el 100% de Fe, Cu y Al precipitándolos a valores de pH entre 4.4 y 4.97. La metacaliza en especial fue capaz de eliminar el Zn, Cd y Mn, pues está alcanza valores superiores a 8 de pH, eliminando hasta un 97% de Mn con un pH de 8.39</p>
<p>4.1.3 Laurel Alarid Alejandro, 2015, "Evaluación de la neutralización de drenaje ácido de mina con rocas carbonatadas en celdas de tratamiento."</p>	<p>Se diseñó un tratamiento pasivo para el DAM de la mina Tizapa, se realizaron varios estudios, identificación y uso de rocas asociadas al yacimiento con capacidad de neutralización y evaluación del caudal del DAM, el objetivo del trabajo fue evaluar la eficiencia de neutralización de las rocas calcáreas asociadas al yacimiento de la mina en pruebas realizadas con celdas de acrílico empacadas con la roca caracterizada, a través de las cuales se hizo circular el DAM.</p> <p>Se trabajó con un DAM con pH de 2.2, y concentraciones iniciales de Al, Fe, Cu, Cd, Mn y Zn de 164mg/L, 18mg/L, 3mg/L, 27 mg/L y 438 mg/L respectivamente. Tras aumentar el pH a 4 con filita se eliminó más del 50% del Al, Fe y Cu y cantidades ínfimas de Cd, Mn y Zn. Con caliza se incrementó el pH arriba de 6 eliminando el 50% de Cd t 14% de Zn, el Mn no pudo ser eliminado.</p>

<p>4.1.4 Facultad de Química e Instituto de Geología, UNAM, 2016, "ETAPA I: ACTUALIZACIÓN DE LA PELIGROSIDAD DE LA PRESA DE JALES GUÁSIMAS DE PEÑA COLORADA."</p>	<p>El análisis de peligrosidad en muestras de jales superficiales del Vaso indica que en un 89 % se presentarán problemas de drenaje ácido.</p>
	<p>A pesar de que la concentración de sulfuros ha disminuido (en 2008 un estudio realizado mostró que en promedio se tenía una concentración de sulfuros de 3.35 %, que generó un potencial de acidez(PA) de 104.57 kg CaCO<sub>3</sub>/Ton; mientras que en este estudio se tiene en promedio un contenido de sulfuros de 2.2 %, con un PA de 69.4757 kg CaCO<sub>3</sub>/Ton), la cantidad de materiales alcalinos también ha disminuido provocando que los jales sigan siendo potencialmente generadores de drenaje ácido ( en el estudio de 2008 el potencial de neutralización fue de 67.56 kg CaCO<sub>3</sub>/Ton. Dando una relación PN/PA de 0.7, mientras que en el presente estudio el PN fue de 45.85 kg CaCO<sub>3</sub>/Ton, generando una relación PN/PA de 0.81.</p>
	<p>Esta situación se repite para los perfiles evaluados a un metro de profundidad, donde en el 95.5 % de las muestras evaluadas se presentarán problemas de drenaje ácido.</p>
	<p>Las observaciones hechas por el equipo de Peña Colorada referentes a la capa de Conglomerado Rojo colocada en el Talud Este de la presa de jales Guásimas para cubrir el jal oxidado. Ésta cubierta fue colocada para controlar la dispersión de los jales oxidados y promover la forestación de la zona. En promedio, el espesor utilizado fue de 40 cm; sin embargo, en zonas llega a ser solo de 10 cm. Las especies utilizadas para forestar fueron Rosa morada, Parota, Guamuchil, Coral y Huizache. Actualmente, la vegetación en la zona se compone principalmente de huizaches sembrados en la etapa de colocación de la cubierta, matorrales, pastos y diferentes especies arbustivas de la zona.</p>

Tabla 4 Resumen de los antecedentes internacionales relacionados al trabajo presente.

#### 4.2 Internacionales

<p>4.2.1 William H.J Strosnider, Sergio Carvajal, Freddy Llanos-López, Robert W. Nairn, Rebecca A.M. Peer, Brandon K. Winfrey, 2015, "ANALISIS DEL CO-TRATAMIENTO PASIVO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES Y DRENAJE ACIDO DE MINAS EN CERRO RICO DE POTOSÍ, BOLIVIA."</p>	<p>Se determinaron las velocidades de reacción de Al, Fe, Mn, Zn, y otros metales en DAM provenientes de un flujo de agua en Cerro Rico usando un sistema reactor de tres etapas.</p> <p>El DAM tenía un pH de 3.58, acidez de 1080 mg/L equivalente a CaCO<sub>3</sub> conteniendo concentraciones de 12, 68, 17, y 550 mg/L de Al, Fe, Mn y Zn respectivamente. Las velocidades de reacción de Al, Fe, Mn y Zn fueron de 1.43, 2.09, 0.01 y 0.10 d<sup>-1</sup>, respectivamente.</p>
<p>4.2.2 Erin J.Clyde, Pascale Champagne, Heather E. Jamieson, Caitlin Gorman, John Sourial, 2016, "The use of a passive treatment system for the mitigation of acid mine drainage at the Williams Brothers Mine (California): pilot-scale study".</p>	<p>Se diseñó e implementó un sistema a escala piloto en el sitio, que consistía en: (1) un canal de roca de aireación para facilitar la oxidación del hierro ferroso al hierro férrico; (2) un tanque de sedimentación para recolectar precipitados de hidróxido de hierro que podrían conducir a la obstrucción del sistema; (3) un biofiltro de turba para la eliminación de hierro y cobre disueltos; (4) un reactor de bacterias reductoras de sulfato para la generación de alcalinidad y el aumento del pH, y la eliminación de níquel, zinc, hierro y cobre; y, (5) un canal de piedra caliza de re-aireación para agregar alcalinidad antes de la descarga del efluente en el ambiente natural de recepción.</p> <p>Se monitorizó durante un período de 17 meses (500 días desde julio de 2007 hasta noviembre de 2008) y el rendimiento se determinó mediante el monitoreo del pH, sulfato y concentraciones de metales disueltos del drenaje de la mina de ácido influyente y los efluentes del biofiltro de turba y reactor reductor de bacterias sulfatadas.</p> <p>Se observó una disminución en la concentración de sulfato en el reactor de bacterias reductoras de sulfato, lo que sugiere la actividad de las bacterias reductoras de sulfato y la generación de alcalinidad. El pH del efluente del sistema aumentó de 4.5 a 6.0, pero se mantuvo por debajo de los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río San Joaquín. También se observó en el reactor de bacterias reductoras de sulfato la eliminación de hierro disuelto y manganeso.</p> <p>La viabilidad de emplear este sistema como una alternativa de tratamiento sostenible de bajo costo y bajo mantenimiento en la mina abandonada de Williams Brothers para garantizar que los efluentes de drenaje cumplan con los objetivos de calidad del agua es prometedora.</p>

<p>4.2.3 Ester Torresa Alba Lozano, Francisco Macías, Alba Gomez Arias, Julio Castillo, Carlos Ayora, 2018, "Passive elimination of sulfate and metals from acid mine drainage using combined limestone and barium carbonate systems."</p>	<p>Se propuso un sistema de dos tratamientos sucesivos utilizando piedra caliza y carbonato de bario dispersados en una matriz porosa inerte de virutas de madera. El sistema fue probado a escala de banco utilizando dos columnas en serie.</p> <p>Con un tiempo de residencia de 30 h, la primera columna de piedra caliza eliminó la acidez, los metales trivalentes (aluminio y hierro), el arsénico, el plomo y el0 cobre, y redujo el sulfato de 7500 a 1800 mg / L, precipitándolos en forma de oxihidróxidos y el sulfato en forma de yeso. La segunda columna (carbonato de bario) agotó las concentraciones de sulfato y metales divalentes (zinc, manganeso, níquel, cobalto, cadmio y talio) por debajo de los límites de detección. El sulfato se precipitó como barita y los metales quedaron atrapados dentro de la calcita, los cuales se mantuvieron estables en condiciones de intemperie. La dureza también se agotó en un 70%.</p> <p>Los parámetros de calidad del agua de salida estaban dentro de los valores requeridos para los estándares de agua potable. La excepción fue la concentración de bario (hasta 50 mg / L) medida en las etapas iniciales del tratamiento, que disminuyó con el tiempo a 3 mg / L. En un sistema de remediación pasiva, se encontró que la concentración de bario dependía de la proporción de iones libres de calcio y sulfato del agua que entra. Esto fue difícil de estimar porque se basaba en la concentración inicial de sulfato, la disolución de calcita, la precipitación de yeso y la especiación química acuosa.</p>
<p>4.2.4 Joaquín Delgado Rodríguez, Diana Ayala, Hugo Simón Páez, 2018, "Sistema de tratamiento para mejorar la calidad de aguas de drenaje de pasivos ambientales mineros en la cuenca del rio Puyango."</p>	<p>Se caracterizó hidroquímicamente las fuentes de contaminación en la cuenca y probar un tratamiento de aguas ácidas con el fin de mitigar los efectos de la oxidación de sulfuros para su futura implementación. Se trataron dos drenajes, originados en pasivos ambientales y efluentes de plantas mineras, a escala laboratorio para probar la eficiencia de los tratamientos pasivos tipo DAS.</p> <p>Se usaron dos columnas, una compuesta con reactivo cálcico (DAS-Ca; 25% de arena caliza tamaño &lt;2mm con pureza del 94%) y otra con reactivo magnesio (DAS-Mg; MgO tamaño 0.15m y virutas de madera) tras 7 meses se obtuvieron valores por debajo de los estándares de calidad internacionales, excepto para Zn y Mn.</p>
<p>4.2.5 K. Florence, D.J. Sapsford, D.B. Johnson, C.M. Kay, C. Wolkersdorfer, 2015, "Iron mineral accretion from acid mine drainage and its application in passive treatment, Environmental Technology."</p>	<p>El estudio demostró la eliminación sustancial de hierro (Fe) del DAM (pH ≈3) en un reactor pasivo de flujo vertical (VFR) con una huella equivalente de 154 m<sup>2</sup> por L / s de agua de la mina y tiempos de residencia de &gt; 23 h. La tasa promedio de eliminación de Fe fue del 67% con un máximo del 85% durante los 10 meses de prueba.</p> <p>Se observó que la fracción de Fe que pasa por un filtro de 0,22 μm (referido aquí como Fe-filt) se eliminó en la VFR incluso cuando el Fe (II) estaba ausente, lo que indica la contribución de la oxidación y precipitación microbiana del Fe (II) Las tasas de eliminación de Fe-filt en la VFR fueron de hasta 70% con tiempos de residencia tan bajos como 8 h en comparación con los experimentos de laboratorio donde se observaron cambios mucho más pequeños en Fe-filt durante 60 h.</p> <p>La precipitación heterogénea partículas de Fe (III) se consideran mecanismos de eliminación predominantes. Los análisis microbianos del agua de la mina revelaron la abundancia de la bacteria "Ferrovum myxofaciens.</p>

## Capítulo 5. Metodología

La metodología empleada se basó en pruebas tanto en campo como en laboratorio. En primera instancia se realizó la identificación del sitio de estudio, ubicando el jal gris, el jal oxidado y los materiales geológicos, estos se muestrearon y caracterizaron.

En laboratorio se realizó lo siguiente; para las muestras de jal (gris y oxidado) se determinó: el pH, la conductividad eléctrica, la concentración de elementos químicos, las especies mineralógicas y el potencial de generación de drenaje ácido y para las muestras de materiales geológicos se determinó: la textura, la conductividad hidráulica, el pH, los carbonatos totales, la salinidad y la fertilidad.

Las pruebas en campo constaron de celdas, cuyo propósito fue observar, bajo condiciones reales, la capacidad de los materiales geológicos seleccionados para controlar la generación de drenaje ácido y la migración de sales. Para la construcción de las celdas se utilizaron muestras de jal<sup>6</sup> y los tres materiales geológicos (Tepetate, Conglomerado Rojo y Caolín) a diferentes espesores. Las zonas en la presa de jales seleccionadas para la colocación de estas celdas fueron: el Vaso y el Talud, por su fácil acceso a los materiales geológicos y monitoreo. De estas celdas se tomaron muestras periódicamente y se determinó el pH, la conductividad eléctrica y la concentración de sulfatos<sup>7</sup>.

Con los resultados obtenidos se elaboraron gráficos de pH, conductividad eléctrica y sulfatos, identificando el material y espesor mínimo, el cual evite la dispersión de polvos a la atmósfera, generación de drenaje ácido y migración de sales, además de la fertilidad la cual permita desarrollar una capa vegetal con especies nativas. En la Figura 13 se puede observar el diagrama de flujo para la metodología seguida.

A continuación, se explica la metodología seguida en el presente trabajo.

---

<sup>6</sup> Los jales fueron seleccionados por su elevado potencial de generación de drenaje ácido y conductividad eléctrica.

<sup>7</sup> Solo para las muestras de jal de las pruebas de generación de drenaje ácido.

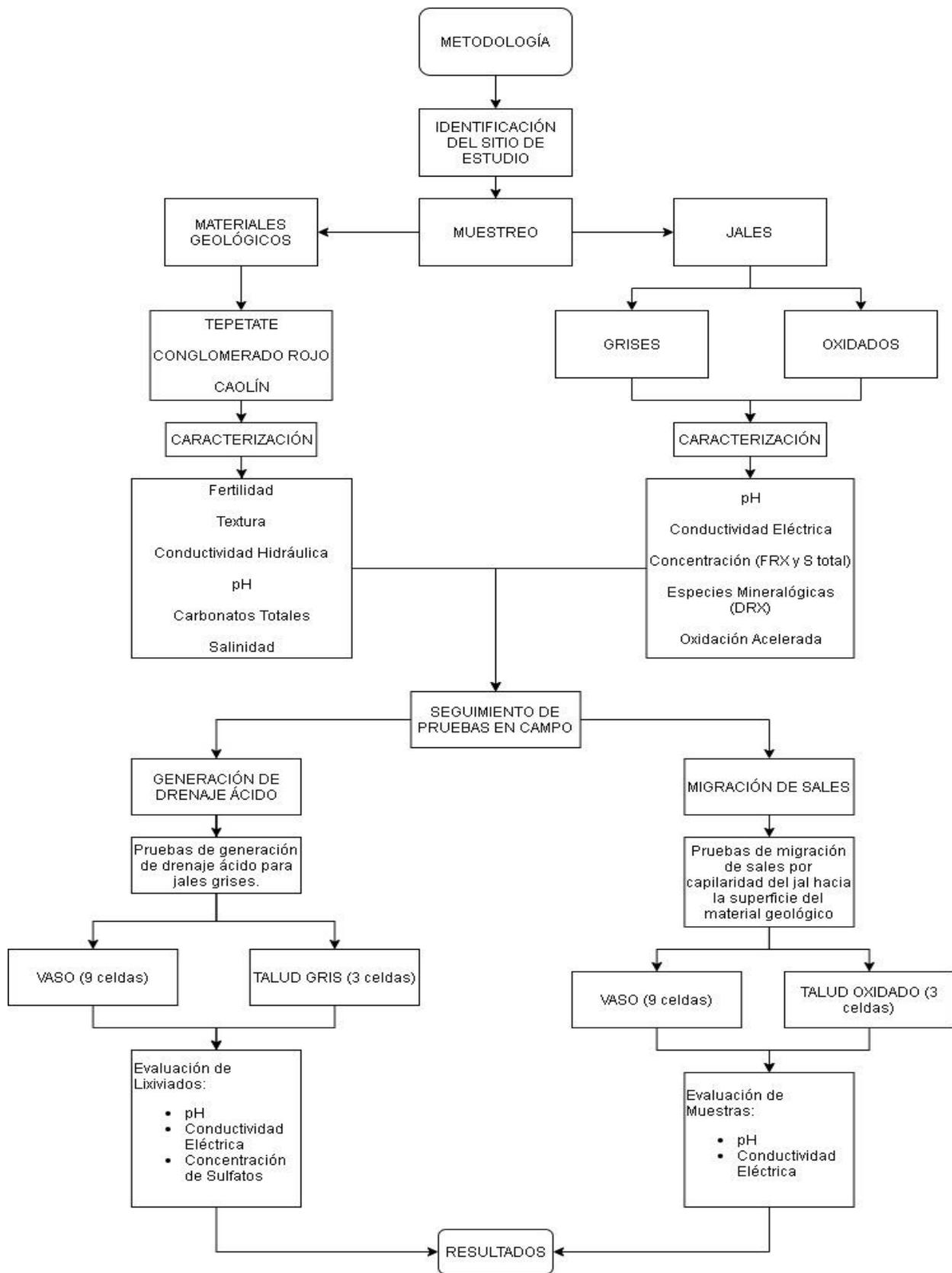


Figura 13 Diseño metodológico.

## 5.1 Identificación del Sitio de Estudio

El sitio de estudio fue la presa de Jales “Guásimas”, perteneciente a la mina “Peña Colorada”, ubicada geográficamente en el centro occidente del país, en el municipio de Minatitlán, extremo noroeste del estado de Colima (Figura 14).



Figura 14 Sitio de Estudio, mina y presa de jales del Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada.

## 5.2 Muestreo

### 5.2.1 Muestreo de Materiales Geológicos

Se llevó a cabo una campaña de muestreo de los tres materiales geológicos (Tepetate, Conglomerado Rojo y Caolín) propuestos para ser usados cubierta de la presa de jales “Guásimas”, en la Figura 15 se observa la ubicación de los bancos de materiales geológicos.

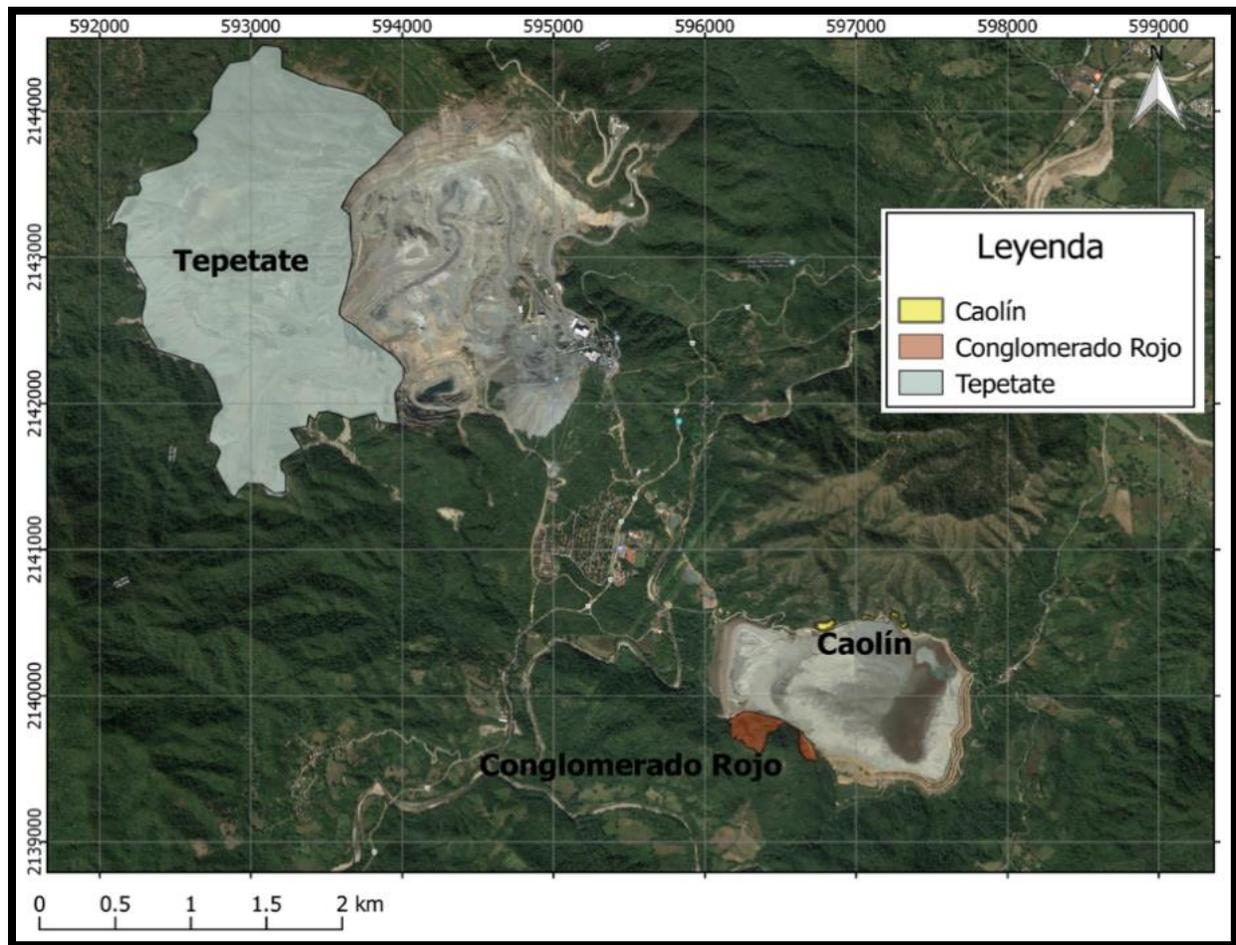


Figura 15 Ubicación de los diferentes materiales empleados en las pruebas de potencial de generación de DA y migración de sales.

## 5.2.2 Muestreo de Jales

De los mapas de conductividad eléctrica y relación potencial de neutralización/potencial de acidez, realizados a partir de los datos obtenidos en el estudio “Facultad de Química e Instituto de Geología, UNAM, 2016, “ETAPA I: ACTUALIZACIÓN DE LA PELIGROSIDAD DE LA PRESA DE JALES GUÁSIMAS DE PEÑA COLORADA.” se establecieron zonas en el Vaso y Talud, en donde el jal presentaba el mayor potencial de generación de DA<sup>8</sup> (conductividad eléctrica alta y una relación PN/PA baja).

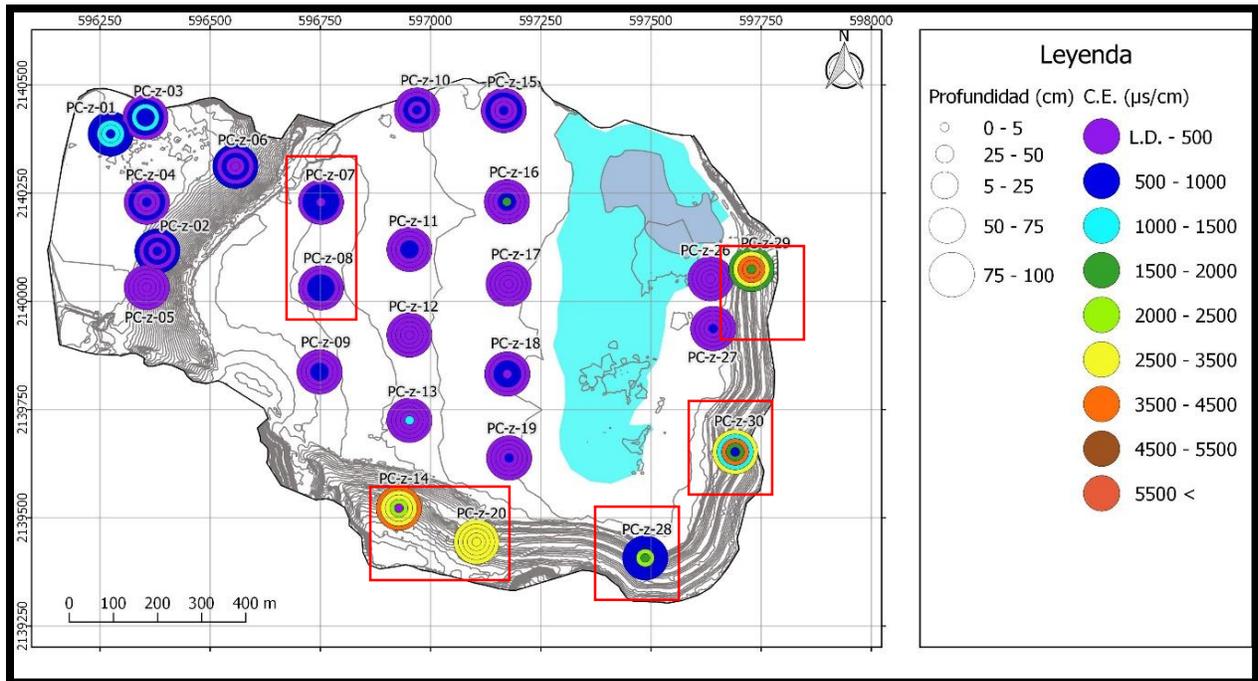


Figura 16 Conductividad eléctrica determinada en muestras subsuperficiales por estrato. Fuente: Grupo de Biogeoquímica Ambiental del Instituto de Geografía-UNAM, 2016.

<sup>8</sup> Se denominará a las siglas DA, como Drenaje ácido.



### 5.3 Caracterización de Jales

Se determinaron los parámetros fisicoquímicos (el pH y la conductividad eléctrica), elementos químicos y especies mineralógicas, en las muestras del jal gris y el jal oxidado, el objetivo fue determinar el potencial de generación de DA, en las muestras de jal gris y los parámetros que presentará un jal con un elevado potencial de generación de DA, al analizar las muestras de jal oxidado.

#### 5.3.1 Preparación y Preservación de Muestras

Las muestras de jal gris y jal oxidado recolectadas fueron homogeneizadas, en bandejas de plástico, y se seleccionó una muestra representativa, mediante la técnica de cuarteo, de aproximadamente 200g. Posteriormente se cribó la muestra por malla 100 y 200 MONT INOX.1, se les dio un tiempo de 20 min en el RO-TAP WS-TYLER, Mod: RX-29 y por último se recolecto y preservo en bolsas de plástico el contenido cribado a malla 100 y 200. En la Tabla 5 se muestra la Matriz de Muestras formadas para su caracterización.

Tabla 5 Matriz de muestras de jal gris y oxidado por prueba y zona.

<b>Jal<sup>a</sup></b>	<b>Prueba<sup>b</sup></b>	<b>Zona</b>	<b>Muestra<sup>d</sup></b>
Gris	Generación de DA	Vaso	A
	Salinidad	Vaso	B
	Generación de DA	Talud	C
Oxidado	Salinidad	Talud	D

**Nota:**

a Se denomino como Jal al tipo de jal tomado de la presa, el jal gris es el que no presenta generación de DA y el jal oxidado es el aquel que presenta claramente generación de DA.

b Se denomino como Prueba a los ensayos que se llevaron a cabo. La prueba de generación de DA determinará si el jal ha sufrido algún proceso de oxidación y la prueba de salinidad determinará si hay migración de sales del jal a la superficie.

c Se denomino como Zona al lugar que conforma la presa de jales en donde se tomaron las muestras.

d Se denomino como Muestra a la nomenclatura formada para identificar a las distintas muestras de jal para su caracterización.

### 5.3.2 Caracterización de Parámetros Fisicoquímicos

Se formaron soluciones, con una relación de 1 a 5 de muestra: agua, para las muestras presentadas en la Tabla 5, por triplicado, determinando el pH y la conductividad eléctrica con los siguientes equipos: UltraBASIC UB-10 pH/mV Meter, DENVER INSTRUMENT y CON 700 Conductivity/°C/°F meter, OAKTON previamente calibrados.

### 5.3.3 Caracterización Química

#### 5.3.3.1 Fluorescencia de Rayos X

Se determinó la concentración de los siguientes elementos: Fe, Mn, Cr, Ca, Sr, Ba, Sb, Cd, Ag, As, Se, Pb, Zn, Cu, K, Hg y S.

Se utilizó el equipo: NITON XL3t XRF Analyzer Thermo SCIENTIFIC, en modo suelo y mina, para las muestras de jal gris y jal oxidado (Tabla 5) cribadas a malla 100, un blanco de SiO<sub>2</sub> y dos materiales de referencia MONTANA 2711 y MONTANA 2710<sup>a</sup>( usados para calcular la exactitud de la técnica), por triplicado, reportando únicamente el porcentaje promedio y el porciento del coeficiente de variación para cada elemento.

#### 5.3.3.2 Determinación de Azufre Total

Se determinó el azufre total ( $S_{Total}$ ) tomando 10g para las muestras de jal gris y jal oxidado cribadas a malla 200, siguiendo el método: LECO 203-821-496 Sulfur and Carbon in Cement, Fly Ash, Limestone, Soil, and Ore, obteniendo el porcentaje de azufre total y la incertidumbre expandida.

### 5.3.4 Caracterización de Especies Mineralógicas

Se determinaron las especies mineralógicas presentes en las muestras del jal gris y el jal oxidado (Tabla 5), por medio de la técnica de Difracción de Rayos X, se utilizó el equipo TERRA OLYMPUS, tomando 15mg de muestra criba a malla 200 para cada una de las muestras. Para la interpretación de los resultados obtenidos se utilizó el software X Powder.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> La base de datos utilizada fue “pdf2”.

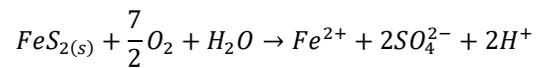
### 5.3.5 Caracterización de Potencial de Generación de DA

Se realizaron pruebas de oxidación acelerada, para las muestras de jal gris (Tabla 5), estas pruebas determinaron cualitativamente el potencial de generación de DA para los jales grises.

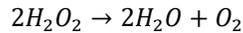
Estos resultados ayudan a vislumbrar posibles escenarios, que podrían presentarse en la presa de jales “Guásimas”, si los jales no son cubiertos por una capa de material geológico que impida la generación de DA y la migración de sales a la superficie.

El procedimiento de las Pruebas de Oxidación Acelerada con Agua Oxigenada ( $H_2O_2$ ) al 30% se describe a continuación:

- Una vez determinado el  $S_{Total}$  se calculó estequiométricamente, suponiendo que el azufre se encuentra en forma de pirita y se lleva a cabo la reacción descrita en la Ecuación 7, el volumen de  $H_2O_2$  al 30% necesario para reaccionar estequiométricamente el azufre contenido en 0.1g de cada muestra.



Ecuación 7 Reacción de oxidación de la pirítica.



Ecuación 8 Reacción de descomposición del agua oxigenada.

- Se colocó 0.1g de cada muestra junto con sus respectivos blancos de muestra (jal y agua destilada) y blancos de agua oxigenada y se agregó el volumen en exceso de  $H_2O_2$  al 30%, seguido se colocaron en agitación orbital durante 24 horas. Posteriormente se midió el pH, Conductividad eléctrica y se describió visualmente los cambios que sufrió la muestra (paso de color gris a color amarillo-café), al inicio y al final de las pruebas. Las muestras se corrieron por triplicado y los blancos de muestra (Muestra de Jal Gris + 25mL de agua destilada y desionizada) y blancos de agua oxigenada (25mL de  $H_2O_2$  al 30%) se realizaron por duplicado.

- Se determinó el pH con el equipo UltraBASIC UB-10 pH/mV Meter, DENVER INSTRUMENT y la conductividad eléctrica con el equipo CON 700 Conductivity/°C/°F meter, OAKTON En la Tabla 6 se muestra la matriz de muestras con sus respectivos blancos.

Tabla 6 Matriz de muestras de jal y sus respectivos blancos para las pruebas oxidación acelerada con agua oxigenada al 30%.

<b>Prueba</b>	<b>Muestra</b>	<b>Blancos<sup>a</sup></b>
Oxidación Acelerada	A	Bl. A
	B	Bl. B
	C	Bl. C
		Bl. P

**Nota:**

a Serie de blancos usados para cada muestra de jal y un blanco “Bl. P” el cual solo consta de peróxido al 30%.

## 5.4 Caracterización de Materiales Geológicos

Se llevaron a cabo pruebas de fertilidad para los tres materiales geológicos: Tepetate, Conglomerado Rojo y Caolín

El motivo de las pruebas fue, visualizar la capacidad de los materiales geológicos para sustentar especies vegetales, evaluando la necesidad de adicionar o no nutrientes.

Las pruebas proporcionaron los siguientes datos:

- Elementos: K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Mn, Cu, B, S
- Textura
- Conductividad Hidráulica
- pH
- Carbonatos Totales
- Salinidad

## 5.5 Experimentos para Evaluar el Generación de DA y Migración de Sales

El motivo de realizar las pruebas de Generación de DA y de Migración de Sales en campo fue: 1) observar los efectos del medio ambiente sobre los diferentes tipos de jal (gris y oxidado) al evaluar la Generación de DA y 2) la migración de sales a la superficie, utilizando como cubierta los tres materiales geológicos propuestos a diferentes espesores.

### 5.5.1 Selección de Zonas para la Instalación de Experimentos

De trabajos realizados en conjunto con el LABQA-Instituto de Geología en 2016, perteneciente a la Facultad de Química, encargados de actualizar la peligrosidad de los jales depositados en la presa de jales "Guásimas" de Peña Colorada, se analizaron los datos de la conductividad eléctrica y la relación de potencial de neutralización/potencial de acidez, estableciendo las zonas del Vaso y del Talud en donde; se tuviera un mayor potencial de generación de DA, una elevada conductividad eléctrica y una relación PN/PA baja.

## 5.5.2 Metodología para Celdas de Observación

### 5.5.2.1 Metodología para Celdas de Observación para la Evaluación de Generación de DA

La Generación de DA se evaluó en dos zonas: a) Vaso y b) Talud Norte, con jal gris. La metodología seguida se describe a continuación.

5.5.2.1.1 Selección del Jal ha adicionar en las Celdas de Observación para Evaluación de Generación de DA

Se tomaron los siguientes criterios de selección:

- Tamaño de partícula. Se seleccionó el jal con menor tamaño de partícula, con base en los resultados obtenidos del muestreo llevado a cabo anteriormente.
- Potencial de Generación de DA. Se seleccionó el jal con una elevada conductividad eléctrica y una relación PN/PA baja.
- Accesibilidad. Se Instalaron las celdas en zonas accesibles y bajo los lineamientos de seguridad establecidos por la empresa “Peña Colorada”.

### 5.5.2.1.2 Construcción de Celdas de Observación para la Evaluación de Generación de DA

El proceso de construcción consistió en las siguientes etapas:

1. Las celdas se construyeron a partir de dos contenedores de 200L, unidos entre sí, como se muestra en la Figura 18. A cada contenedor se le instaló una válvula en la parte inferior, con el fin de captar los lixiviados generados.
2. Se adicionó, en cada celda, jal gris sobresaturado con agua en el fondo hasta un espesor de 40cm, en seguida jal saturado con un espesor de 25cm y una capa final de jal seco de 25cm. En total para cada celda se ocuparon 90cm de jal gris, después se recubrió con el material geológico, a espesores de 20cm, 40cm y 60cm. Este proceso se repitió para los tres materiales evaluados, a los tres espesores correspondientes y con los dos tipos de jal del Vaso y Talud.

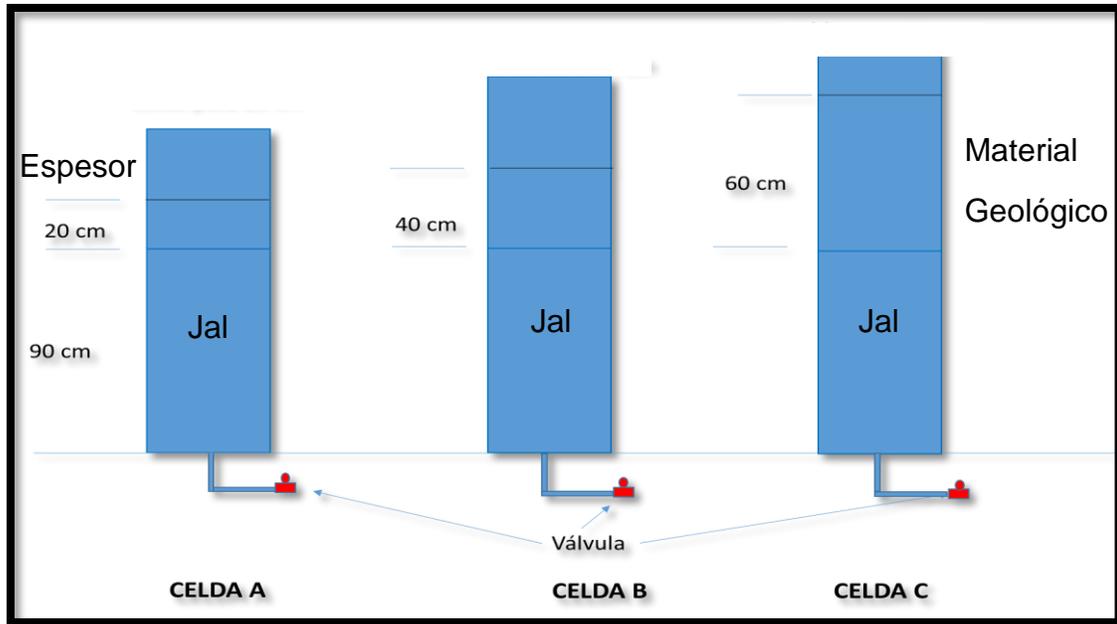


Figura 18 Esquema de construcción de celdas para evaluar la Generación de DA, se adiciono un espesor de 90 cm de jal gris, seguido de un espesor de material geológico, para la Celda A, B y C de 20, 40 y 60 cm respectivamente.

#### 5.5.2.1.3 Instalación de Celdas de Observación para Potencial de generación de DA

##### A. Instalación de Celdas de Observación para Potencial de generación de DA en Vaso

- En total se instalaron 9 Celdas en la zona norte del Vaso de la presa de jales Guásimas, en la siguiente ubicación: 13 Q 596647.04 m E, y 2140432.22 m N (Figura 19).

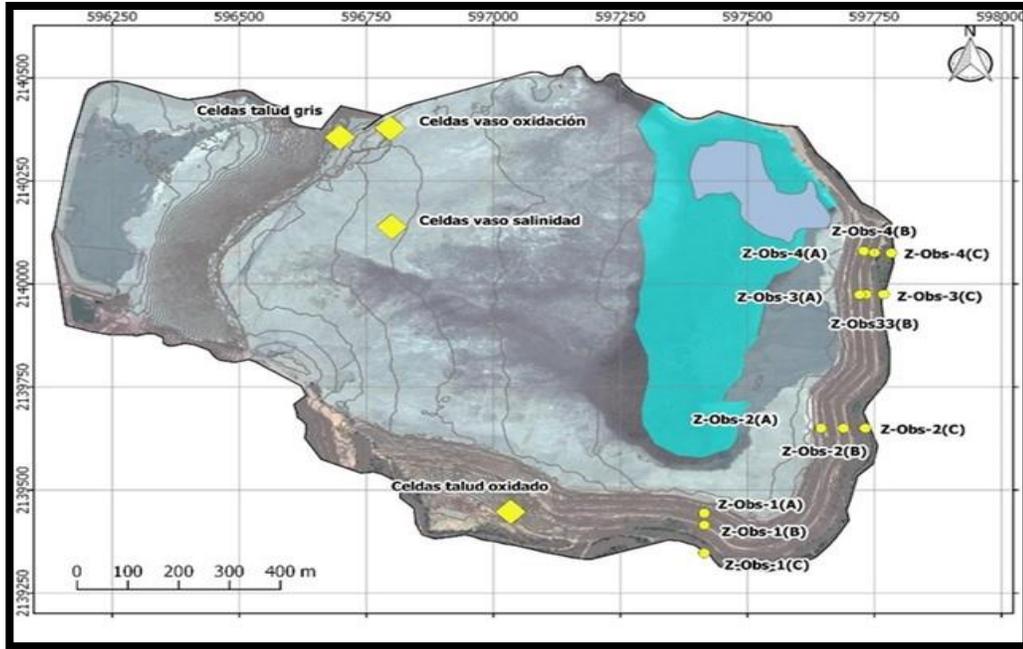


Figura 19 Imagen de la ubicación de Celdas de Observación y Zanjas de Observación en el Vaso Noroeste de la Presa de Jales Guásimas.

- El material que se utilizó para el llenado de las celdas fue Jal gris con un elevado potencial de generación de DA y los diferentes tres materiales geológicos propuestos como cubierta fueron: Tepetate, Conglomerado Rojo y Caolín, en la Tabla 7 se muestra la matriz de experimentos de las diferentes celdas empleadas para evaluar la Generación de DA.

La Figura 20 muestra una fotografía de las celdas instaladas en el Vaso noroeste de la presa de jales “Guásimas”.

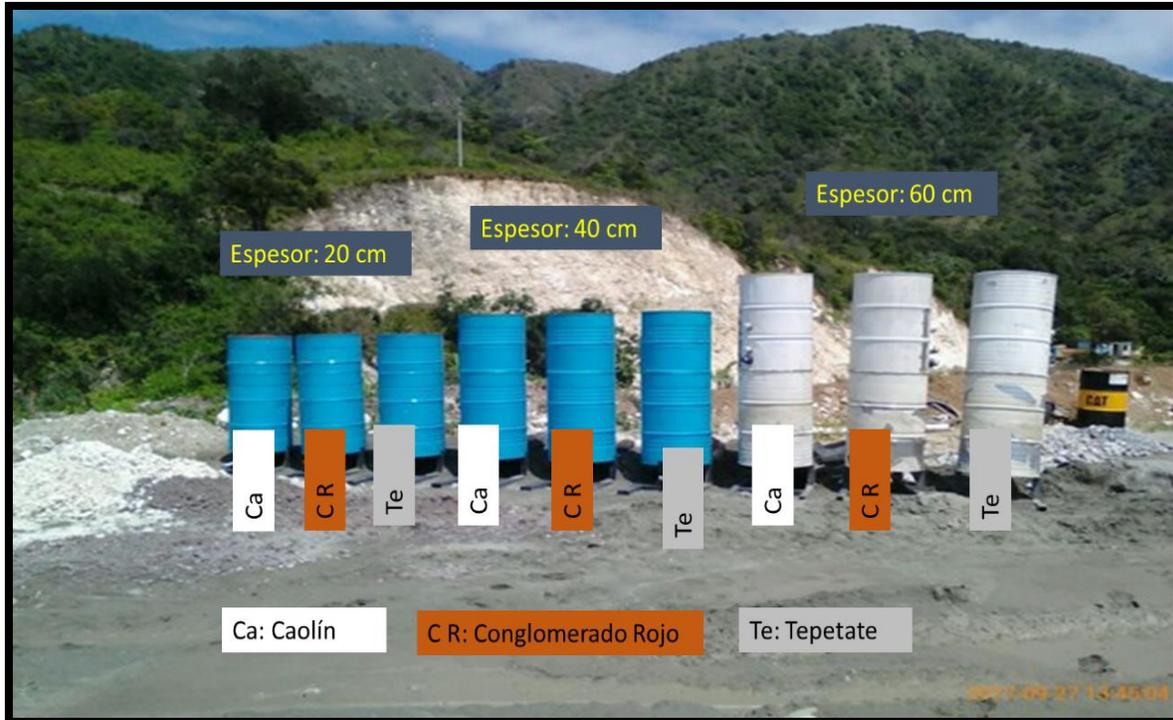


Figura 20 Fotografía de las Celdas para evaluar la Generación de DA del jal gris en el Vaso de la presa Guásimas.

#### B. Instalación de Celdas de Observación para Evaluar la Generación de DA en Talud Norte.

Siguiendo un procedimiento similar, al de las celdas en Vaso, se instalaron tres celdas en el Talud Norte, con las siguientes características:

- Jal: Se utilizó el jal depositado en el Talud Norte.
- Ubicación: Las celdas fueron colocadas conservando la inclinación natural del Talud Noroeste. La Figura 20 muestra la colocación de las celdas cuyas coordenadas de localización son: 13 Q 596704.38 m E, 2140403.91 m N.
- Materiales Geológicos: En la Tabla 7 se muestra la matriz de experimentos de las celdas para Evaluar la Generación de DA del jal del Talud Norte. Se evaluaron los tres materiales geológicos propuestos, todos con un espesor de 60cm.

Tabla 7 Matriz de formación de celdas para Evaluar la Generación de DA de jales en el Vaso y Talud.

Zona	Celda	Jal	Cubierta	Espesor (cm)
Vaso	OXI-V-Te-20		Tepetate Fase 4.	20
	OXI-V-Te-40		Tamaño de partícula < 3in	40
	OXI-V-Te-60			60
	OXI-V-CR-20	40 cm jal sobresaturado, 25 cm		20
	OXI-V-CR-40	jal saturado, 25 cm jal seco. El jal se obtuvo del Vaso de la presa Guásimas	Conglomerado Rojo. Tamaño de partícula < 3in	40
	OXI-V-CR-60			60
	OXI-V-Ca-20			20
	OXI-V-Ca-40		Caolín. Tamaño de partícula < 3in	40
	OXI-V-Ca-60			60
Talud	OXI-T-Te-60	40 cm jal sobresaturado, 25 cm	Tepetate Fase 4. Tamaño de partícula < 3in	60
	OXI-T-CR-60	jal saturado, 25 cm jal seco. El jal se obtuvo del Talud noroeste de la presa Guásimas	Conglomerado Rojo. Tamaño de partícula < 3in	60
	OXI-T-Ca-60		Caolín. Tamaño de partícula < 3in	60

5.5.2.1.4 Seguimiento de la Evaluación de Generación de DA en los jales grises en el Vaso y el Talud  
Se obtuvieron periódicamente lixiviados, a través de las válvulas situadas en la parte inferior de los contenedores (Figura 21). A los lixiviados obtenidos se les determinaron los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH<sup>10</sup>, conductividad eléctrica<sup>11</sup> y concentración de sulfatos<sup>12</sup>.

Para obtener dichos lixiviados se adicionaban 50L de agua, del manantial denominado “El Nacimiento”, después de 24h se tomaban los lixiviados de las válvulas situadas en la parte inferior de cada celda (Figura 21).

En época de lluvias no se adicionó agua del manantial, simplemente se tomaba la muestra de las válvulas con el agua de lluvia que pudiera recolectarse.

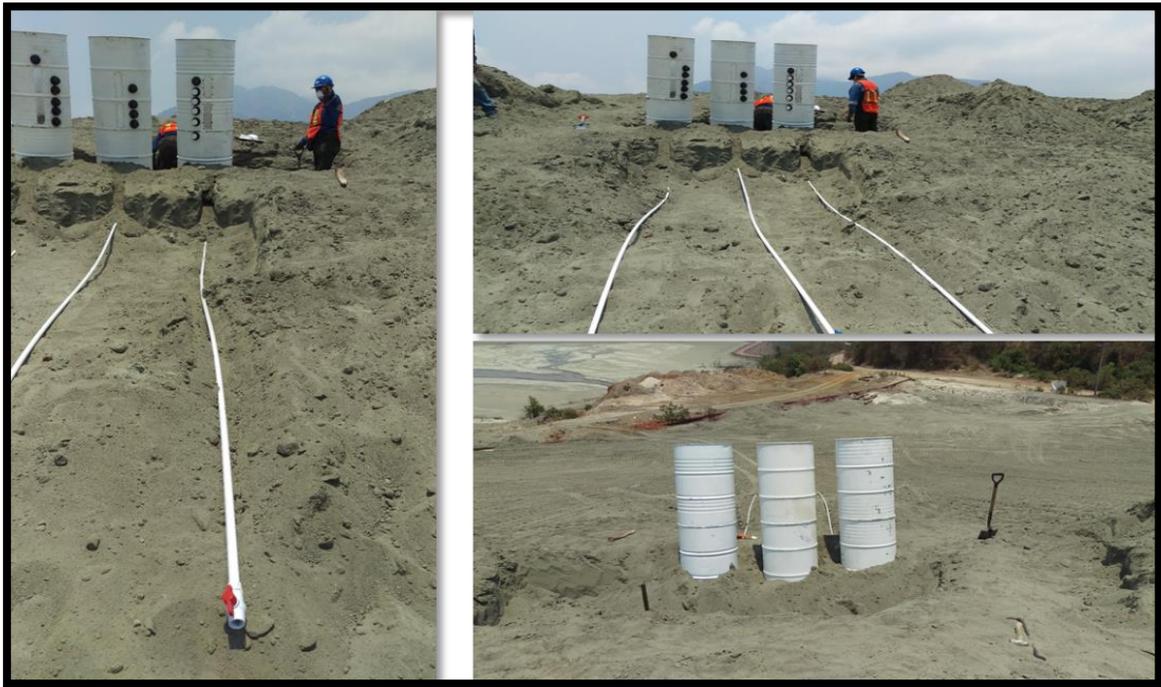


Figura 21 Celdas para Evaluar la Generación de DA del jal gris en el Talud Norte.

<sup>10</sup> Se utilizó el equipo UltraBASIC UB-10 pH/mV Meter, DENVER INSTRUMENT calibrado a tres puntos pH= 4.0, 7.0 y 10.0 a 25°C

<sup>11</sup> Se utilizó el equipo CON 700 Conductivity/°C/°F meter, OAKTON calibrado con un material de referencia de 1413µS/cm

<sup>12</sup> Se utilizó un cromatógrafo de iones Metrohm 883 Basic IC Plus con un detector de conductividad con una columna de polivinilalcohol con grupos de amonio cuaternario modelo Metrosep A Sup 4 250/4.0 con una fase móvil de NaHCO<sub>3</sub> /Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> con supresión química.

### 5.5.2.2 Metodología para Celdas de Observación para Control de Migración de Sales

El control de la migración de sales se evaluó en dos zonas: a) Vaso con jal gris y b) Talud Sur con jal oxidado. La metodología seguida se describe a continuación.

#### 5.5.2.2.1 Selección del Jal ha adicionar en las para Control de Migración de Sales

Las celdas se encuentran en contacto directo con el jal, ya que se retiró el fondo de los contenedores, así que se seleccionó la zona en donde se presentaban valores de conductividad eléctrica de alrededor de  $2000\mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### 5.5.2.2.2 Construcción de Celdas de para Control de Migración de Sales

Se utilizaron contenedores de 200L, a los cuales se les quitaron las tapas y el fondo, en la Figura 22 se puede observar un esquema de las celdas y espesores utilizados.

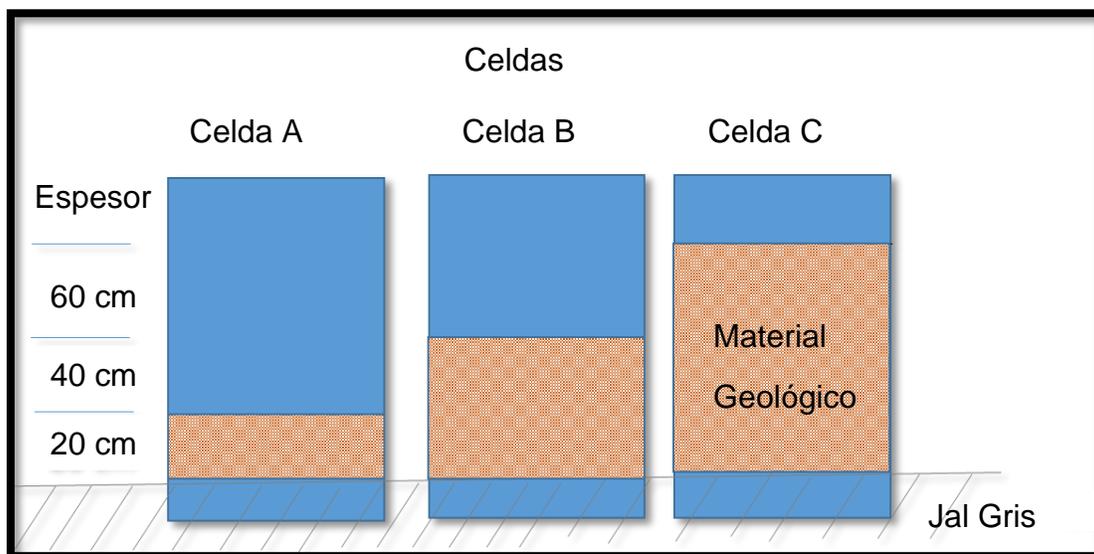


Figura 22 Esquema de las celdas para evaluar control de migración de sales. Estas se encuentran sin tapa, en contacto directo con el jal gris, con un espesor de la Celda A, B y C, de 20, 40 y 60 cm, respectivamente.

### 5.5.2.2.3 Instalación de Celdas para Control de Migración de Sales

#### A Instalación de Celdas para Control de Migración de Sales en Vaso

En la zona seleccionada de la presa de jales, directamente sobre el jal, se colocaron los contenedores de 200L a 10cm de profundidad, posteriormente se adicionaron los diferentes materiales geológicos (Tepetate, Conglomerado Rojo y Caolín), con espesores de: 20,40 y 60cm, como se muestra en la Figura 23.

En la Tabla 8, se muestra la matriz de experimentos utilizada para realizar las celdas para las pruebas de control de migración de sales.



Figura 23 Celdas para evaluar la migración de sales de jal gris en el Vaso de la presa de jales “Guásimas”.

Tabla 8 Matriz de elaboración de celdas para evaluar control de migración de sales.

Zona	Celda	Jal	Cubierta	Espesor, cm
	SAL-V-Te-20		Tepetate Fase 4.	20
	SAL-V-Te-40		Tamaño de partícula < 3in	40
	SAL-V-Te-60			60
Vaso Gris	SAL-V-CR-20	Jal gris. Celda	Conglomerado Rojo.	20
	SAL-V-CR-40	enterrada 10 cm	Tamaño de partícula < 3in	40
	SAL-V-CR-60	directamente en el jal		60
	SAL-V-Ca-20			20
	SAL-V-Ca-40		Caolín. Tamaño de partícula < 3in	40
	SAL-V-Ca-60			60
Talud Oxidado (Lado sur de la presa Guásimas)	SAL-T-Te-60	Jal oxidado. Celda	Tepetate Fase 4. Tamaño de partícula < 3in	60
	SAL-T-CR-60	enterrada 10 cm	Conglomerado Rojo. Tamaño de partícula < 3in	60
	SAL-T-Ca-60	directamente en el jal	Caolín. Tamaño de partícula < 3in	60

## B Instalación de Celdas para Control de Migración de Sales en Talud Sur

Se instalaron tres celdas en el Talud Sur de la presa de jales, el jal presenta un elevado grado de oxidación.

En la Figura 24 se pueden observar las celdas instaladas, en estas se evaluaron los tres materiales propuestos, Tepetate, Conglomerado Rojo y Caolín, con un espesor de 60cm, para tener acceso a los espesores de 40 y 20cm se colocaron bridas plásticas donde se tomaba una muestra del material geológico.



Figura 24 Celdas para evaluar la migración de sales en el Talud Oxidado.

5.5.2.2.4 Seguimiento del Control de la Migración de Sales de los Jales Grises del Vaso y Jales Oxidados del Talud Sur.

Se realizó la medición en campo del pH y la conductividad eléctrica con una sonda multiparamétrica PCSTestr Ph\Conductividad\Tds\Salinidad\Temperatura OAKTON, previamente calibrada.

El procedimiento consistió en tomar una muestra de la superficie de cada celda y formar una suspensión con agua destilada, en una proporción de 1:5 (muestra: agua destilada), seguida de agitación manual durante 30 segundos.

## Capítulo 6. Resultados y Discusión

### 6.1 Resultados de Caracterización del Jal

#### 6.1.1 Resultados de Caracterización de Parámetros Fisicoquímicos

Tabla 9 Resumen de parámetros fisicoquímicos para las muestras de jal correspondientes.

Muestra	pH	Conductividad eléctrica
A	7.84	2230
B	8.33	1549
C	8.08	1550
D	3.10	3530

En el Anexo I se presentan los resultados completos de las muestras.

Como se observa en la Tabla 9, las muestras de jal gris (A<sup>13</sup>, B<sup>14</sup> y C<sup>15</sup>) presentan un pH alcalino, un mínimo de 7.84 unidades y un máximo de 8.33 unidades, característico de un jal con un bajo potencial de generación de DA. Para la conductividad eléctrica las muestras A, B y C presentan valores elevados, entre 2230 y 1549 $\mu$ S/cm, debido a las concentraciones de sales presentes en las muestras.

Por otra parte, la muestra de jal oxidado D<sup>16</sup>, presentan un pH de 3.10 unidades y conductividad eléctrica de 3530 $\mu$ S/cm, característico de un jal con un elevado potencial de generación de DA. Este valor se tomó como límite en los gráficos de seguimiento, denotando la generación de DA si los jales grises tendían hacia estos valores.

<sup>13</sup> Muestra de jal gris proveniente del Vaso utilizado para las pruebas de generación de DA.

<sup>14</sup> Muestra de jal gris proveniente del Vaso utilizado para las pruebas de migración de sales.

<sup>15</sup> Muestra de jal gris proveniente del Talud Norte utilizado para las pruebas de generación de DA.

<sup>16</sup> Muestra de jal oxidado proveniente del Talud Sur utilizado para las pruebas de migración de sales.

### 6.1.2 Resultados de Caracterización Química

Los resultados completos de los elementos, con sus respectivos controles de calidad por Fluorescencia de Rayos X y Azufre total (LECO) de las muestras de jal se muestran en el Anexo II y III respectivamente.

Tabla 10 Resumen de elementos presentes en las muestras de jal obtenidos por Fluorescencia de Rayos X en modo Mina

Modo	Muestra	Fe, %	Mn, %	Cr, %	Ca, %	Sr, %
Mina	A	11	0.16	0.02	6.59	0.03
	B	12.38	0.14	0.019	6.39	0.04
	C	17.62	0.15	0.02	6.6	0.02
	D	22.66	0.07	0.03	5.1	0.03

Tabla 11 Resumen de elementos presentes en las muestras de jal obtenidos por Fluorescencia de Rayos X en modo Suelo y Azufre total.

Modo	Muestra	Ba, ppm	Sb, ppm	Cd, ppm	Ag, ppm	As, ppm	Se, ppm
	A	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	11.45	< LOD
	B	134.43	< LOD	< LOD	< LOD	11.19	< LOD
	C	244.71	< LOD	< LOD	< LOD	29.94	< LOD
	D	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	20.21	< LOD
Suelo	Muestra	Pb, ppm	Zn, ppm	Cu, ppm	K, ppm	Hg, ppm	S <sup>a</sup> , %
	A	< LOD	177.44	267.06	9319.97	< LOD	3.9
	B	< LOD	115.84	237.44	6310.08	< LOD	2.7
	C	< LOD	203.36	448.65	7456.71	< LOD	6.1
	D	< LOD	128.75	197	3769.31	< LOD	7.1

**Nota:**

a Resultados de S obtenidos por la técnica de LECO para S total.

Tabla 12 Límites de detección para la técnica de Fluorescencia de Rayos X.

<b>Elementos</b>	<b>Límite de Detección (ppm, mg/kg)</b>
Ba	20
Sb	10
Cd	7
Ag	10
As	5
Se	4
Pb	4
Hg	10

**Nota:**

Se colocaron los elementos que se encontraron por debajo del límite de detección(LOD), presentes en la Tabla 11. Recuperado de: Thermo Scientific Niton XL3t 500/900 GOLDD Analyzers Elemental Limits of Detection for a SiO<sub>2</sub> Matrix in Mining Mode & Mining Exploration and Geochemical Analysis of Mining Samples Thermo Scientific Niton XL3t Series Handheld XRF Mining Analyzers

Tabla 13 Límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en base seca.

<b>Contaminante</b>	<b>LMP, ppm</b>
As	100
Ba	2000
Cd	20
Cr	100
Hg	4
Ag	100
Pb	100
Se	20

**Nota:**

Recuperado de: NORMA Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009

Comparando la concentración de los elementos presentes en las muestras del jal gris y el jal oxidado (Tabla 11), con los límites máximos permisibles (Tabla 13) se tienen las siguientes conclusiones:

La concentración de los elementos: Ag, As, Ba, Cd, Cr, Hg, Pb y Se, se encuentran por debajo de los LMP y con base en la NOM-157 no representan una problemática relacionada a la peligrosidad por constituyentes tóxicos.

Para los elementos Fe y Ca (Tabla 10) en la zona del Vaso, se tienen valores de Fe entre 11.0% y 12.32% y el Ca entre 6.39% y 6.59%, menores en 10 puntos porcentuales a los reportados (Tabla 14). Para la zona del Talud se tienen valores de Fe entre 17.62% y 22.66% y el Ca entre 5.10% y 6.60%, siendo mayores en 10 y 2 puntos porcentuales, respectivamente, a los reportados (Tabla 14).

La concentración de Fe se puede deber a la presencia de dos principales especies mineralógicas, pirita y magnetita, descartando al óxido de hierro que puede formarse de las paredes de los contenedores de hierro, ya es estos cuentan con un recubrimiento epóxico, además de que las muestras eran tomadas del centro de las celdas. De igual manera, la presencia de Fe no es un indicativo claro del potencial de generación de DA, esto se confirmará más adelante con los datos de pH y conductividad eléctrica.

El Ca es importante para definir la especie mineralógica, ya que se pueden presentar minerales como calcita(carbonato) o gipsita(sulfato), aminorando o sin tener efecto en la generación de DA, respectivamente.

Como se determinó en estudios anteriores, las concentraciones de Fe encontradas son características de un jal gris, con un elevado potencial de generación de DA (Tabla 14), sin embargo, es necesaria la prueba de oxidación acelerada para determinar de manera cualitativa su potencial.

Tabla 14 Concentración promedio de Fe y Ca en muestras del Vaso y Talud

Zona	Elemento	
	Fe, %	Ca, %
Vaso	26.2	12.2
Talud	12.2	4.83

**Nota:**

Recuperado de: Facultad de Química e Instituto de Geología, UNAM, 2016, “ETAPA I: ACTUALIZACIÓN DE LA PELIGROSIDAD DE LA PRESA DE JALES GUÁSIMAS DE PEÑA COLORADA.”

La concentración de S (Tabla 11) determinada por la técnica de LECO, denota la existencia de sulfatos y de sulfosales (sulfuro de hierro) en el jal gris y el jal oxidado, estas especies mineralógicas se determinaron posteriormente por medio de la técnica de difracción de rayos x.

Concluyendo, el jal gris tanto en el Vaso y el Talud no representa un peligro, debido a su concentración de constituyentes tóxicos.

El jal gris en el Vaso y el Talud presentan un elevado potencial de generación de DA.

Por lo anterior es necesario implementar una capa de material geológico que impida la oxidación del jal gris y la migración de sulfosales hacia la superficie, impidiendo el desarrollo de capas vegetales.

### 6.1.3 Resultados de Caracterización de Especies Mineralógicas

Los Difractogramas de la caracterización por DRX se muestran en el Anexo III.

A continuación, se muestra en la Tabla 15 el resumen de las especies mineralógicas presentes en las muestras del jal gris y el jal oxidado:

Tabla 15 Resumen de especies mineralógicas presentes en las muestras de jal gris y jal oxidado obtenidas por medio de la técnica de DRX.

Descripción Mineral	Muestra			
	A	B	C	D
Augita (Ca <sub>x</sub> Mg <sub>y</sub> Fe <sub>z</sub> ) (Mgy1Fez1) Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	X	X	X <sup>a</sup>	X
Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	X	X	- <sup>b</sup>	X
Chamosita (Fe <sup>2+</sup> , Mg, Al, Fe <sup>3+</sup> ) <sub>6</sub> (Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH, O) <sub>8</sub>	X	X	-	-
Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )	X	X	X	X
Gipsita (CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O)	-	-	X	X
Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	X	X	X	X
Jarosita (KFe <sup>3+</sup> <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-	-	X	X
Labradorita (Ca, Na) [Al (Al, Si) Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ]	X	X	X	X
Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	X	X	X	X
Pirita (FeS <sub>2</sub> )	X	X	X	X

**Nota:**

Información de minerales recuperada de <https://www.mindat.org>

a Denota la presencia de la especie mineral en la muestra

b Denota la ausencia de la especie mineral en la muestra

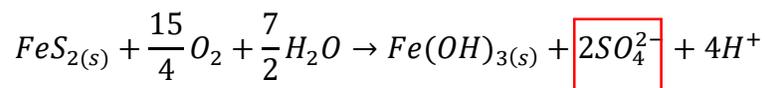
Con base en los resultados presentados en la Tabla 15, se tiene las siguientes conclusiones:

Esta técnica no es capaz de determinar cuantitativamente las especies minerales en las muestras de jal gris y el jal oxidado.

Respecto a las especies mineralógicas que aportan Fe, se identificaron las siguientes: Augita, Chamosita, Hematita, Jarosita, Magnetita y Pirita, de éstas se esperaban dos Pirita y Magnetita, es importante ya las especies mineralógicas Augita, Chamosita, Jarosita y Hematita aportan Fe en la caracterización química, sin embargo, estos no son minerales generadores de DA. De esto la prueba de potencial de generación de DA determinará si la pirita, el mineral generador de acidez, se encuentra en mayor proporción en las muestras de jal.

Respecto a las especies mineralógicas que aportan Ca se determinaron las siguientes: Augita, Calcita, y Labradorita, de éstas la más importante es la calcita pues neutraliza la acidez generada por la oxidación de la pirita. De esto la prueba de potencial de generación de DA determinará si la Calcita presente es capaz de neutralizar la acidez generada.

La especie mineralógica que confiere la peligrosidad al jal gris es la pirita (sulfuro de hierro) pues su oxidación genera aniones sulfato los cuales forman sales, que, junto con los sulfatos minerales presentes, migran por procesos de capilaridad hacia la superficie, impidiendo la generación de una capa vegetal, sin embargo, estos sulfatos también pueden estar presentes en el jal gris al ser adicionados como aditivos durante los procesos de flotación del mineral de magnetita.



La muestra C al no presentar calcita (carbonato) se espera presente el mayor potencial de generación de DA.

Las muestras A y B no presentan gipsita y jarosita (sulfatos), los cuales no tiene efecto en la generación de DA o su neutralización.

La muestra D no presenta chamosita(silicato), el cual no tiene efecto en la generación de DA o su neutralización.

De las caracterizaciones por FRX y DRX se confirma el elevado potencial de generación de DA de los jales grises tanto del Vaso como del Talud, debido a la presencia de pirita, principal mineral generador de DA.

#### 6.1.4 Resultados de las Pruebas de Oxidación Acelerada

La Figura 25 presenta las muestras: A, B y C con sus respectivos blancos Bl. A, Bl. B y Bl. C y el blanco Bl. P.

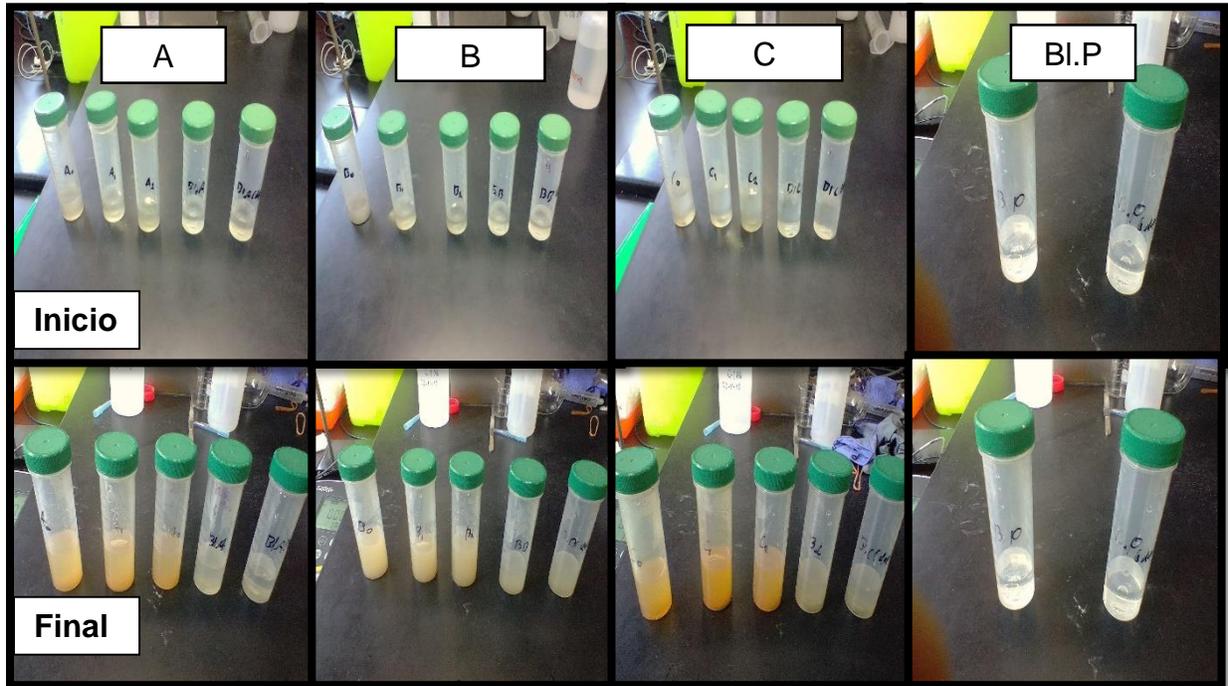


Figura 25 Resultados de las pruebas de oxidación acelerada con agua oxigenada al 30%.

Comparando las muestras (A, B y C), al inicio y al final de la prueba, se observa una clara característica en los jales grises con un elevado potencial de generación de DA, el color café-anaranjado el cual, con base en el proceso de oxidación de la pirita descrito por Pérez, Schwarz, & Urrutia(2017), es proporcionado por el hidróxido de hierro que se precipita, como se muestra en la Ecuación 9, además se espera una disminución notable en el pH por la relación estequiométrica 1  $Fe(OH)_3$  a 3  $H^+$ .

Ecuación 9 Reacción de formación del hidróxido de hierro y generación de protones.

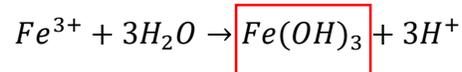


Tabla 16 Resultados obtenidos de las pruebas de oxidación acelerada.

<b>Etapa</b>	<b>Muestras</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>Bl. A</b>	<b>Bl. B</b>	<b>Bl. C</b>	<b>Bl. P</b>
	pH	7.2	7.3	7.2	7.9	7.9	8.2	5.6
Inicio	Conductividad eléctrica( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	546	713	228	125	555	161	89.6
	pH	2.4	2.5	2.6	7.4	6.9	7.4	5.6
Final	Conductividad eléctrica( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1672	1402	392	131	503	170	61

Con base en los resultados mostrados en la Tabla 16, se tienen las siguientes conclusiones:

El blanco Bl. P (peróxido al 30%) tiene un pH y conductividad entre 5.59 - 5.63 y 61.15-89.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente. Por lo tanto, los valores de pH y conductividades eléctricas esperados, por la oxidación del peróxido sobre las sulfosales de los jales grises, deberán presentar un pH menor a 5 unidades y una conductividad eléctrica mayor a 90  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

La muestra B presentó una disminución en 4.78 unidades de pH y un aumento de 689.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$ , para la muestra C se presentó una disminución en 4.59 unidades de pH y un aumento de 163.34 $\mu\text{S}/\text{cm}$ , para la muestra A se presentó una disminución en 4.79 unidades de pH y un aumento de 1126.46 $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Las muestras tanto, del Vaso como del Talud, presentan el mismo potencial de generación de DA, llegando a valores de pH menores a 3 unidades. Respecto a la conductividad eléctrica, las muestras pertenecientes al Vaso (A y B) presentan una mayor generación de sales (sulfatos) como lo indica su aumento entre 600 y 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Retomando los valores obtenidos en la Tabla 9, la muestra D presentó un pH de 3.10 unidades y una conductividad eléctrica de 3530 $\mu\text{S}/\text{cm}$ , siendo un jal con un elevado potencial de generación de DA.

En general, los blancos pertenecientes a las muestras de jal gris no presentaron cambios en el transcurso de la prueba.

Recuperando información respecto a la relación de PN/PA (relación potencial de neutralización/potencial de acidez) documentados por la Facultad de Química e Instituto de Geología, UNAM, 2016, de informe: "ETAPA I: ACTUALIZACIÓN DE LA PELIGROSIDAD DE LA PRESA DE JALES GUÁSIMAS DE PEÑA COLORADA."

El objetivo de esta prueba fue; determinar el balance entre los minerales que son productores de acidez (sulfosales) y aquellos que son potenciales consumidores de acidez(carbonatos). La relación entre los valores de PN y PA (PN/PA), permite evaluar si los jales contienen o no suficientes carbonatos de calcio para neutralizar los sulfuros. Cuando la relación es menor o igual a 1.2, los jales presentaran un elevado potencial de generación de DA.

En el Vaso se obtuvo un valor promedio de PN/PA de 0.81, un valor máximo de 2.50 y un valor mínimo de 0.12. El 87 % de los jales grises resultan peligrosos por su elevado potencial de generación de DA.

El contenido de materiales alcalinos es bajo, promedio de 45.85kg, máximo de 71.82kg  $\text{CaCO}_3/\text{Ton}$ .

En el Talud se obtuvo un valor promedio de PN/PA de 0.50, un valor máximo de 1.06 y un valor mínimo de 0.17 resultando peligrosas todas las muestras de jal gris por su elevado potencial de generación de DA.

Estos hechos, junto con los resultados obtenidos de la caracterización de los jales grises, determinan el elevado potencial de generación de DA de los jales.

De lo anterior se concluye que el jal gris en el Vaso y el Talud presentaran una elevada generación de DA, si no se recubren con una cubierta adecuada que: 1) evite la generación de DA e 2) impida la migración de sales hacia la superficie del jal.

## 6.2 Resultados de Caracterización de Materiales Geológicos

### 6.2.1 Tepetate

El Tepetate proviene de operaciones de descapote del proceso de minado, el cual es almacenado en la parte poniente del yacimiento de Peña Colorada, es un material grueso con altos contenidos en roca caliza, presenta una textura arenosa, el pH es neutro, libre de carbonatos solubles y bajo contenido de sales (Tabla 17). Presenta valores de conductividad hidráulica ideales para romper la migración de sales por efecto de la capilaridad.

Tabla 17 Propiedades físicas y fertilidad de muestras de Tepetate.

<b>Determinación</b>	<b>Tepetate</b>
K	30.1 ppm
Ca	3470 ppm
Mg	1292 ppm
Na	34.9 ppm
Fe	10.2 ppm
Zn	2.01 ppm
Mn	3.21 ppm
Cu	1.42 ppm
B	0.30 ppm
S	88.6 ppm
Textura	Clástica
Conductividad Hidráulica	10.5 cm/h
pH	6.64
Carbonatos totales	0.01 %
Salinidad	1180 $\mu$ S/cm

**Nota:** Fuente: Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología, 2018

### 6.2.2 Conglomerado Rojo

El Conglomerado Rojo proviene de un banco de material del cerro denominado León Dormido, ubicado al sur oeste de la presa Guásimas. Este material varía en función de la profundidad, dentro de los primeros 20 cm del perfil de este material, de cerca de 40 años de antigüedad, se ha alcanzado un nivel de estabilización y desarrollo pedogenético similar al presentado en el perfil natural, siendo el Conglomerado Rojo apto para regenerar un horizonte en al menos 40 años, así como sustentar la vegetación natural de la zona. Estos materiales son de pH ligeramente alcalinos con texturas medias, libres de carbonatos y sales, con relativamente altos niveles de materia orgánica y conductividades hidráulicas moderadamente bajas (Tabla 18).

Tabla 18 Propiedades Físicas y Fertilidad del Conglomerado Rojo.

<b>Determinación</b>	<b>Resultado</b>
K	158 ppm
Ca	3644 ppm
Mg	377 ppm
Na	32.2 ppm
Fe	32.5 ppm
Zn	0.89 ppm
Mn	36.1 ppm
Cu	1.57 ppm
B	0.31 ppm
S	1.45 ppm
Textura	Franco arcilloso
Conductividad Hidráulica	2.30 cm/h
pH	7.05
Carbonatos totales	0.21 %
Salinidad	600 $\mu$ S/cm

**Nota:** Fuente: Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología, 2018

### 6.2.3 Caolín

El Caolín proviene de un banco de material localizado al norte de la presa Guásimas. La muestra utilizada corresponde a un suelo del cerro de Caolín que fue impactado por actividades de desmonte con el posible objetivo de utilizar la zona como pastizal para ganado y posteriormente reforestado. Presenta un pH ligeramente ácido libre de carbonatos y bajas concentraciones de sales. (Tabla 19).

Tabla 19 Propiedades Físicas y Fertilidad del Caolín.

<b>Determinación</b>	<b>Resultado</b>
K	22.9 ppm
Ca	228 ppm
Mg	69.2 ppm
Na	12.7 ppm
Fe	15.5 ppm
Zn	0.13 ppm
Mn	12.0 ppm
Cu	0.12 ppm
B	0.30 ppm
S	7.26 ppm
Textura	Franco Arcilloso
Conductividad Hidráulica	3.50 cm/h
pH	6.46
Carbonatos totales	0.01 %
Salinidad	210 $\mu$ S/cm

**Nota:** Fuente: Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología, 2018

De los resultados presentados en las Tablas 17 a 19, el Tepetate y Conglomerado Rojo presentan pH neutros, entre 6.64 y 7.05 unidades respectivamente, adecuados para sustentar especies vegetales.

Las concentraciones totales de los elementos: Cu Fe, K, Mn, y Zn mayores a: 0.2 4.5, 1.0 y 1.0 ppm respectivamente, resultan ser adecuados para un suelo fértil, con base a la norma NOM-021-RECNAT-2000.

Con base en esta norma y a los resultados presentados en las Tablas 17 a 19, el Conglomerado Rojo y Tepetate, presentan la mejor concentración de elementos, en cambio el Caolín, presenta un déficit. Por lo tanto, el Tepetate y el Conglomerado Rojo, pueden usarse como sustrato para formar un suelo capaz de sustentar especies vegetales, sin la necesidad de agregar nutrientes de manera externa.

### 6.3 Resultados de Pruebas de Potencial de Generación de DA y Migración de Sales en Jales Grises y Jales Oxidados.

En esta sección se muestran los resultados del seguimiento a las celdas de observación; tuvo una duración de 11 meses (330 días), que comprenden el periodo entre septiembre del 2017 hasta octubre del 2018, durante el cual se realizaron mediciones de pH, conductividad eléctrica y concentración de sulfatos de los lixiviados de las celdas para las pruebas de generación de DA, pH y conductividad eléctrica de las muestras superficiales para las pruebas de salinidad.

Estas se dividieron en dos pruebas:

- 1) Potencial de Generación de DA: En jales grises del Vaso y el Talud Norte. Cuyo objetivo principal es determinar el material geológico y espesor que evite la generación de DA.
- 2) Migración de Sales: En jales grises (Vaso y Talud Sur) y en jales oxidados (Talud Este). Cuyo objetivo es determinar el material geológico y espesor que evite los procesos de migración de sulfatos a la superficie desde el jal gris, hasta la superficie de la capa de material geológico.

En el Anexo V se muestran los datos completos de las pruebas con los que se construyeron los gráficos para cumplir con los objetivos planteados.

### 6.3.1 Resultados de las Pruebas de Potencial de Generación de DA en Jales Grises

En estos gráficos se muestran las tendencias seguidas para los espesores estudiados y valores límites para cada parámetro, los cuales pertenecen a los valores de jal oxidado obtenidos en las pruebas de caracterización. Obtener durante las pruebas valores del jal gris cercanos los del jal oxidado denotaría generación de DA y por lo tanto el efecto para disminuir este proceso al comprar las distintas capas de material geológica entre sí y a distintos espesores.

#### 6.3.1.1 Evaluación de la Capa de Tepetate

Las mediciones de los parámetros: pH, conductividad eléctrica y concentración de sulfatos para las celdas de Tepetate se presentan en las Figura 26, Figura 27 y Figura 28.

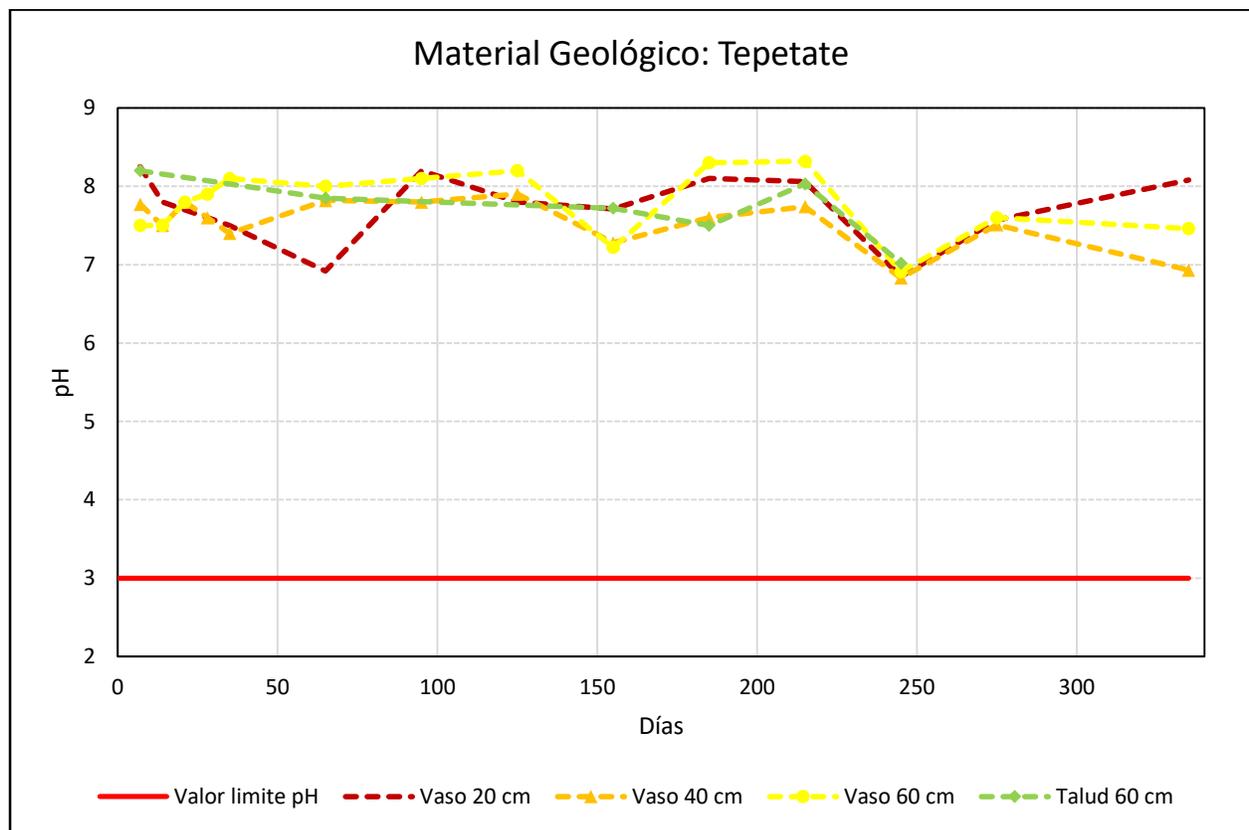


Figura 26 Gráfico de pH para la capa de Tepetate en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA.

Para la Figura 26 se tienen las siguientes observaciones de las mediciones de pH:

El espesor de 20cm presenta una ligera tendencia de disminución, pasando de 8.2 a 7 unidades en los días 7 y 65 respectivamente.

Los espesores de 40 y 60 cm presentan la misma tendencia observada en el espesor a 20 cm.

El espesor de 40cm pasa de 8 a 7 unidades en los días 7 y 245 respectivamente, el espesor de 60cm en el Vaso pasa de 8 a 7.02 unidades en los días 7 y 245 y el espesor de 60cm en el Talud pasa de 8 a 7 unidades en los mismos días.

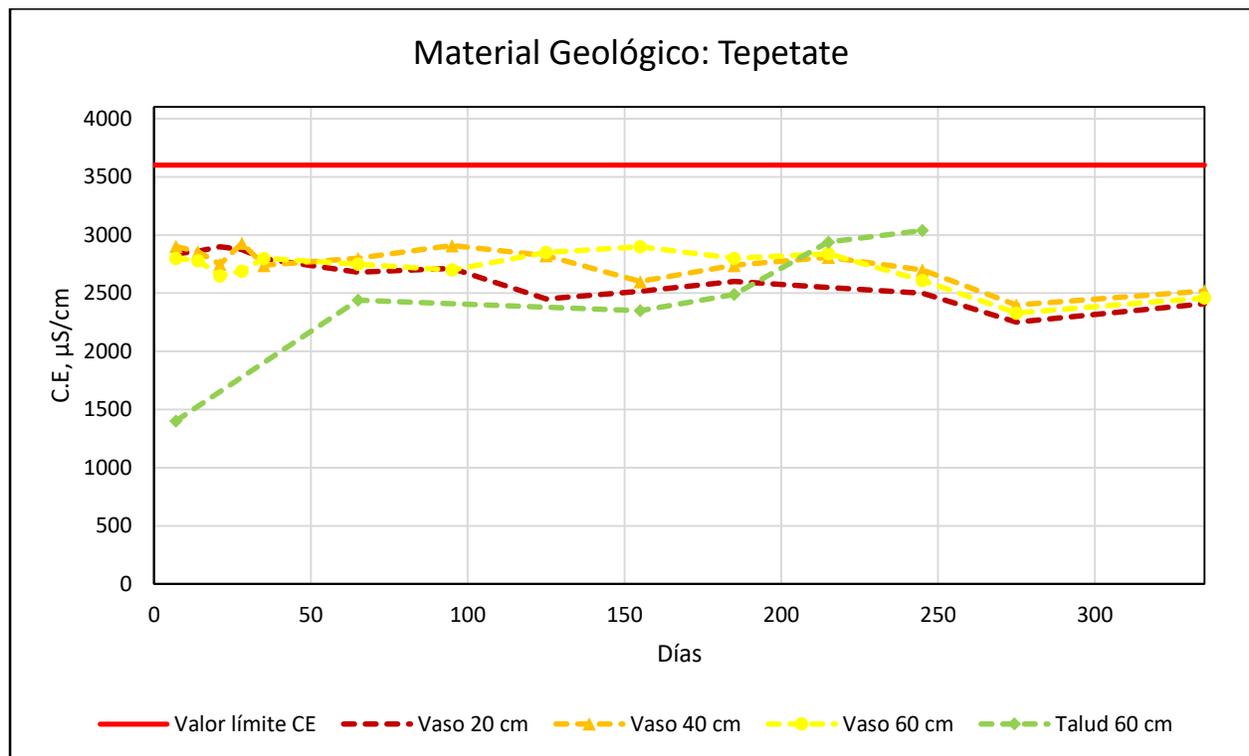


Figura 27 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Tepetate en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA.

Para la Figura 27 se tienen las siguientes observaciones de las mediciones de conductividad eléctrica:

El espesor de 20cm presenta una tendencia de disminución pasando de 2840 a 2330 $\mu$ S/cm en los días 7 y 275 respectivamente.

Los espesores siguientes presentan la misma tendencia observada en el espesor a 20cm. El espesor de 40cm pasa de 2903 a 2400 $\mu$ S/cm en los días 7 y 275 respectivamente y el espesor de 60 cm pasa de 2800 a 2330  $\mu$ S/cm en los mismos días.

El espesor de 60cm en el Talud presenta una tendencia de aumento pasando de 1403 a 3040 $\mu$ S/cm en los días 7 y 245 respectivamente, esto se debe a la generación de sales debido a la generación de DA en el jal gris, sin embargo, el Tepetate es capaz de controlarlos eficientemente pues los valores no alcanzan al valor límite de conductividad para un jal completamente oxidado.

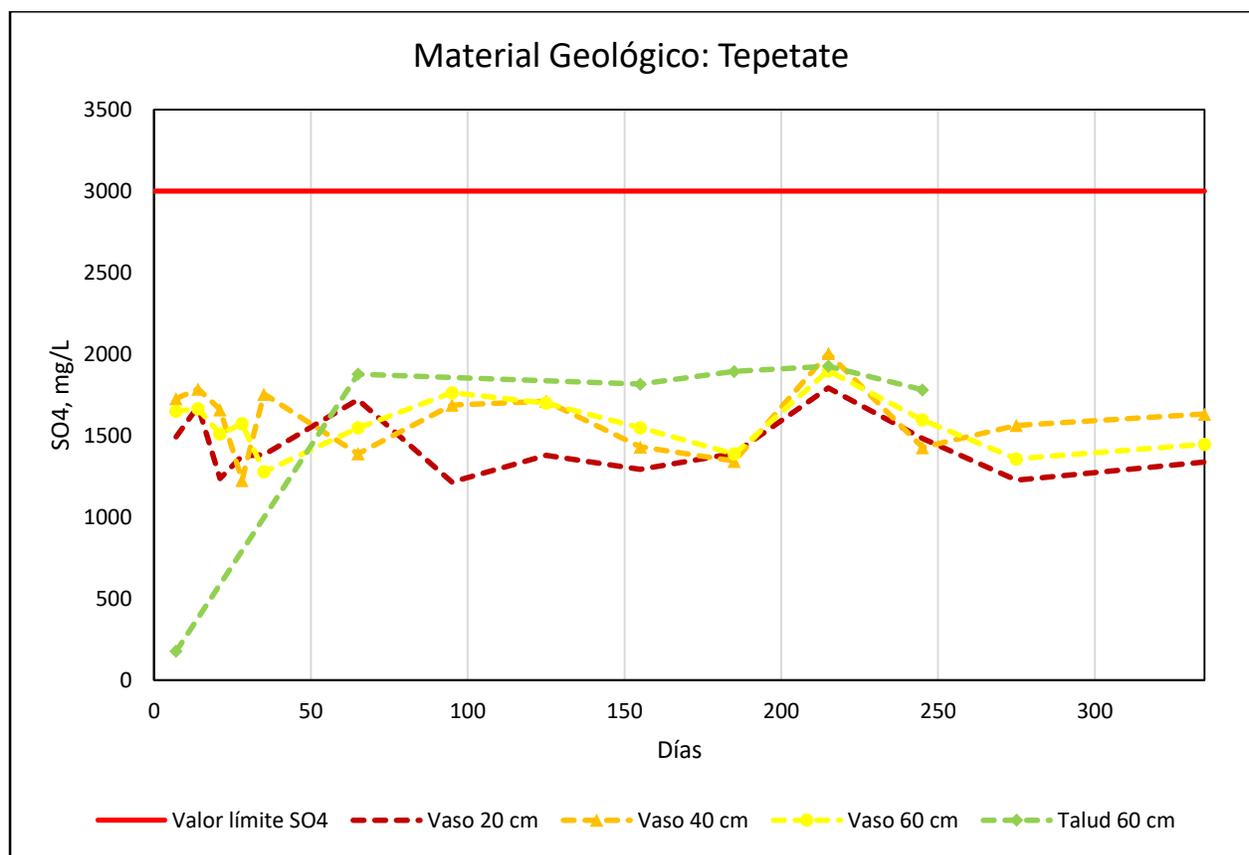


Figura 28 Gráfico de concentración de sulfatos para la capa de Tepetate en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA.

Para la Figura 28 se tienen las siguientes observaciones de las mediciones de concentración de sulfatos:

El espesor de 20cm presenta una tendencia de disminución, pasando de 1493 a 1216 $\mu$ S/cm en los días 7 y 95 respectivamente, esto indica el control del Tepetate sobre los sulfatos generados por la generación de DA.

Los espesores siguientes presentan la misma tendencia observada en el espesor a 20cm. El espesor de 40cm pasa de 1727 a 1388 $\mu$ S/cm en los días 7 y 185 respectivamente y el espesor de 60 cm pasa de 1650 a 1388 $\mu$ S/cm en los mismos días.

El espesor de 60 cm en el Talud presenta una tendencia de aumento pasando de 177 a 1781 $\mu$ S/cm en los días 7 y 245 respectivamente, esto evidencia el elevado potencial de generación de DA en el jal gris del Talud, sin embargo, el Tepetate es capaz de controlarlos eficientemente pues no se llega al valor límite de conductividad de sulfatos y se mantienen los valores de concentración por debajo de 2000mg/L desde el día 65 hasta el final de las pruebas de oxidación.

Esto concuerda con las observaciones para los parámetros de pH y conductividad eléctrica. Se presentan generación de DA en el jal gris, los cuales son controlados eficientemente por el Tepetate desde los 20 cm ya que en ningún espesor se alcanzaron los valores límite de respectivos parámetros.

El jal gris del Talud presenta el mayor potencial de generación de DA, sin embargo, el Tepate fue capaz de controlarlo.

Se observa una mayor generación de DA en el día 215 de la prueba para todos los espesores, ya que el pH disminuye y la conductividad y concentraciones de sulfatos aumentan. Esto indica que el tiempo de secas tiene influencia en la generación de DA.

Con base en el comportamiento observando de los parámetros evaluados para los diversos espesores (pH, conductividad eléctrica y concentración de sulfatos), se puede concluir que el jal gris con la capa de Tepetate en las pruebas de oxidación en Vaso y Talud desde los 20cm de espesor disminuye el potencial de generación de DA en el jal gris.

### 6.3.1.2 Evaluación de la Capa de Conglomerado

Las mediciones de los parámetros: pH, conductividad eléctrica y concentración de sulfatos para las celdas de Conglomerado Rojo se presentan en las Figura 29, Figura 30 y Figura 31.

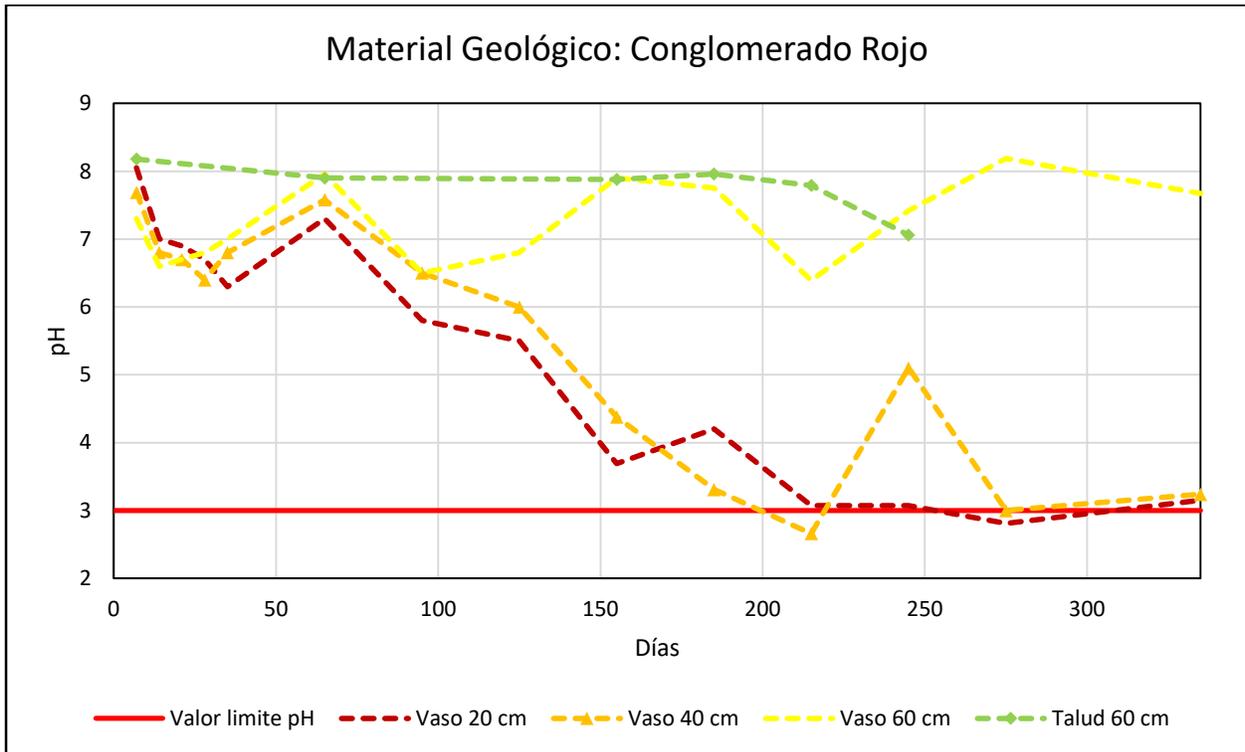


Figura 29 Gráfico de pH para la capa de Conglomerado Rojo en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA.

Para la Figura 29 se tienen las siguientes observaciones de las mediciones de pH:

El espesor de 20cm presenta una marcada tendencia de disminución, pasando de 8 a 3 unidades en los días 7 y 275 respectivamente, llegando por debajo del valor límite de pH el cual indica la oxidación completa del jal gris. El espesor de 4cm presenta esta misma tendencia pasando de 8 a 3 unidades de pH en los mismos días, llegando por debajo del valor límite de pH. A futuro se esperan problemas graves de oxidación para el Conglomerado Rojo desde un espesor de 40cm.

Los espesores de 60 cm en Vaso y Talud se presenta una menor tendencia de disminución, pasando de 7 a 6 unidades en los días 7 y 215 respectivamente en el Vaso y de 8.18 a 6 unidades para los mismos días en el Talud.

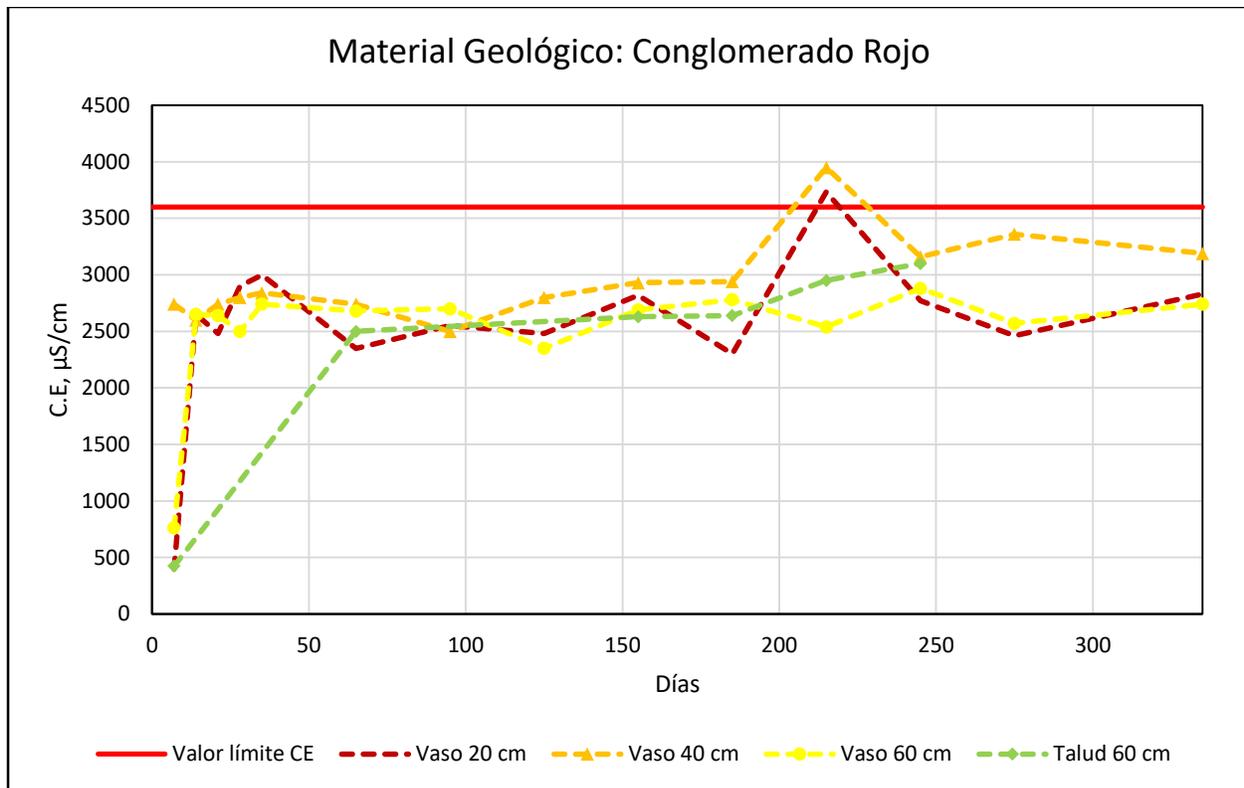


Figura 30 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Conglomerado Rojo en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA.

Para la Figura 30 se tienen las siguientes observaciones de las mediciones de conductividad eléctrica:

El espesor de 20 cm, como se esperaba, presenta una tendencia de aumento, pasando de 399 a 3733 $\mu$ S/cm en los días 7 y 215 respectivamente, el espesor de 40 cm presenta la misma tendencia, pasando de 2740 a 3950 $\mu$ S/cm, superando el valor límite de conductividad de 3600 $\mu$ S/cm, en los mismos días.

El espesor de 60 cm en el Vaso presenta una tendencia de aumento, pasando de 762 a 2640 $\mu$ S/cm en los días 7 y 21 respectivamente, los valores se mantienen menores a 3000 $\mu$ S/cm hasta el final de la prueba de oxidación. El espesor de 60cm en el Talud presenta una mayor tendencia de aumento, pasando de 424 a 3100 $\mu$ S/cm en los días 7 y 245 respectivamente, a futuro se espera una mayor generación de DA en el jal gris del Talud.

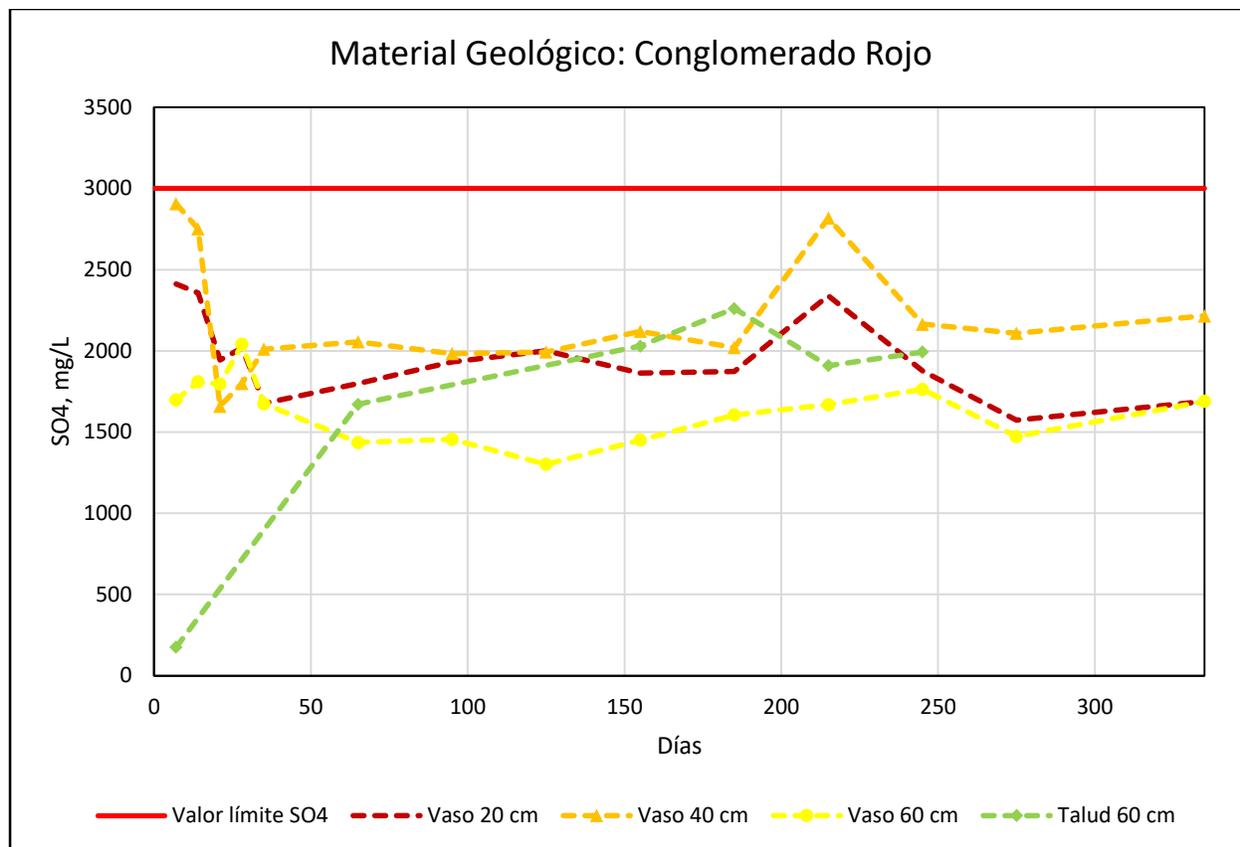


Figura 31 Gráfico de concentración de sulfatos para la capa de Conglomerado Rojo en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA.

Para la Figura 31 se tienen las siguientes observaciones de las mediciones de concentración de sulfatos:

El espesor de 20cm presenta una tendencia de disminución, pasando de 2411 a 1574mg/L en los días 7 y 275 respectivamente, adicionalmente en el día 215 se observa un aumento anormal, llegando a 2339mg/L, esta fecha coincide con la época de secas. Por su parte el espesor de 40 cm presenta la misma tendencia, pasando de 2907 a 2021mg/L en los días 7 y 185 respectivamente, además en el día 215 se observa de igual manera el aumento anormal, llegando a 2818mg/L. En general los valores se encuentran por debajo del valor límite de concentración de sulfatos durante el periodo de las pruebas. Esto difiere con las conclusiones obtenidas para los parámetros de pH y conductividad eléctrica. La diferencia se puede deber a la concentración de minerales básicos, como caliza, en el Conglomerado Rojo los cuales neutralizan el pH y generación

de sales manteniendo una concentración de sulfatos por debajo del valor esperado para un jal con un elevado potencial de generación de DA.

El espesor de 60 cm en el Vaso presenta una tendencia de disminución, pasando de 1697 a 1302mg/L en los días 7 y 125 respectivamente, de igual manera en el día 215 presenta un aumento en la concentración, llegando a 1669mg/L. Como muestra el análisis de los tres parámetros el Conglomerado Rojo controla medianamente la generación de DA en el jal gris.

El espesor de 60 cm en el Talud presenta una tendencia de aumento, pasando de 174 a 2260mg/L en los días 7 y 185 respectivamente, al igual que los espesores de 20 y 40 cm en el Vaso.

Adicionalmente, en la Figura 32 se observa en las celdas del Vaso con los espesores de Conglomerado Rojo de 20 y 40cm la acumulación de sales en la superficie.

Celdas: Evaluación De La Capa de Conglomerado Rojo Para El Potencial de generación de DA

OXI-V-CR-20

OXI-V-CR-40

OXI-V-CR-60



Acumulación de sales

Figura 32 Registro fotográfico de la superficie de la capa de Conglomerado Rojo en las celdas empleadas para evaluar oxidación. A) 20 cm de espesor, B) 40 cm de espesor y C) 60 cm de espesor.

Con base en lo anterior, el jal gris bajo la capa de Conglomerado Rojo presenta generación de DA, como se observa claramente en los espesores de 20cm y 40cm en el Vaso y 60cm en el Talud.

Se presentó la acumulación de sales en la superficie, lo cual no es favorable pues provocaría la muerte de especies vegetales y denota el poco control de este material geológico para evitar la migración de sales de sulfato a la superficie.

El Conglomerado Rojo se ve más afectado por la temporada de secas como muestra los aumentos observados en todos los parámetros a los 215 días de la prueba.

Podría considerarse el uso de este material geológico con una capa de 60 cm de espesor para los jales grises del Vaso, pues en este se observó un control moderado en la generación de DA.

### 6.3.1.3 Evaluación de la Capa de Caolín

Las mediciones de los parámetros: pH, conductividad eléctrica y concentración de sulfatos para las celdas de Caolín se presentan en las Figura 33, Figura 34 y Figura 35.

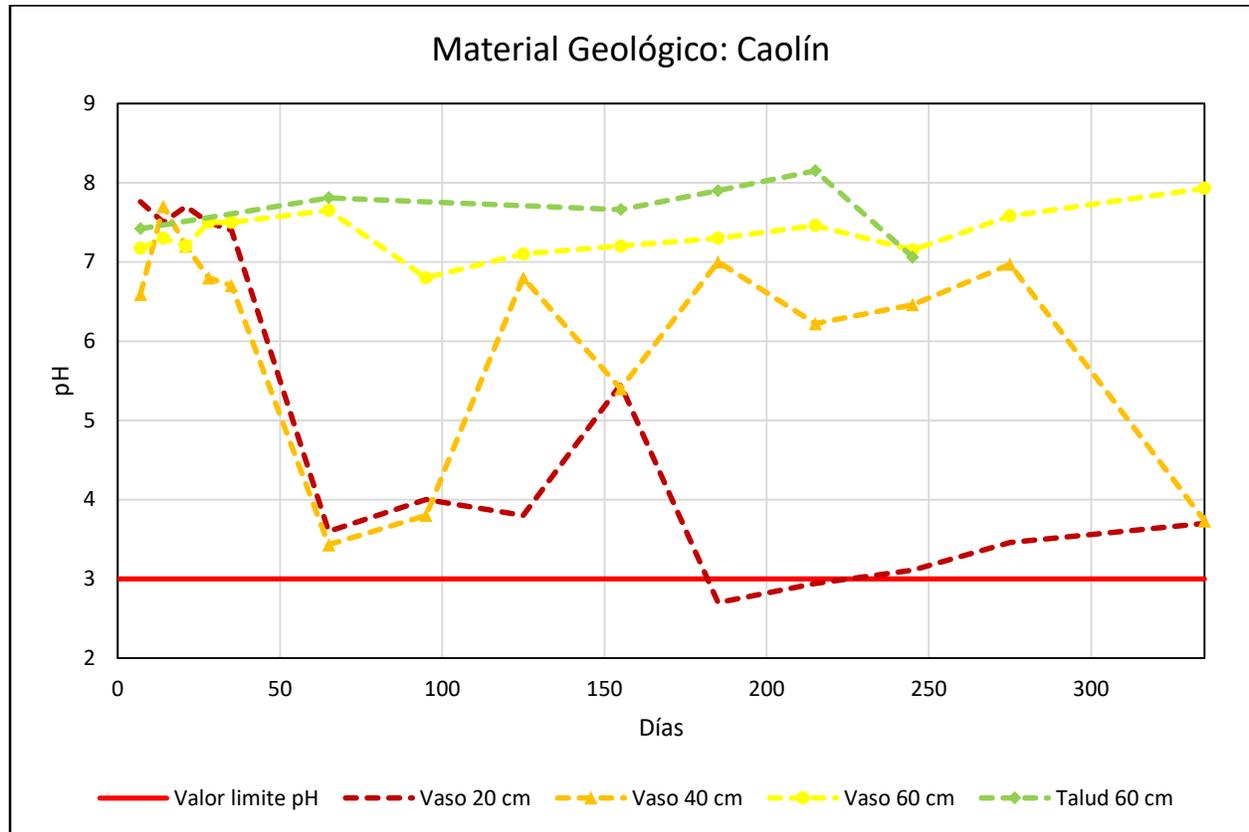


Figura 33 Gráfico de pH para la capa de Caolín en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA.

Para la Figura 33 se tienen las siguientes observaciones de las mediciones de pH:

El espesor de 20cm presenta una marcada tendencia de disminución, pasando de 7.76 a 2.7 unidades de pH en los días 7 y 185 respectivamente, llegando por debajo del valor límite de pH.

El espesor de 40cm presenta una tendencia de disminución, pasando de 6.59 a 3.43 unidades de pH para los días 7 y 65 respectivamente, sin embargo, desde el día 95 se presenta un aumento, se mantiene esta tendencia y finalmente baja nuevamente en el día 275.

El espesor de 60cm en el Vaso presenta una ligera tendencia de aumento, los valores de pH se mantienen entre 6.8 y 7.93 unidades de pH, mostrando una baja capacidad del Caolín para controlar la generación de DA.

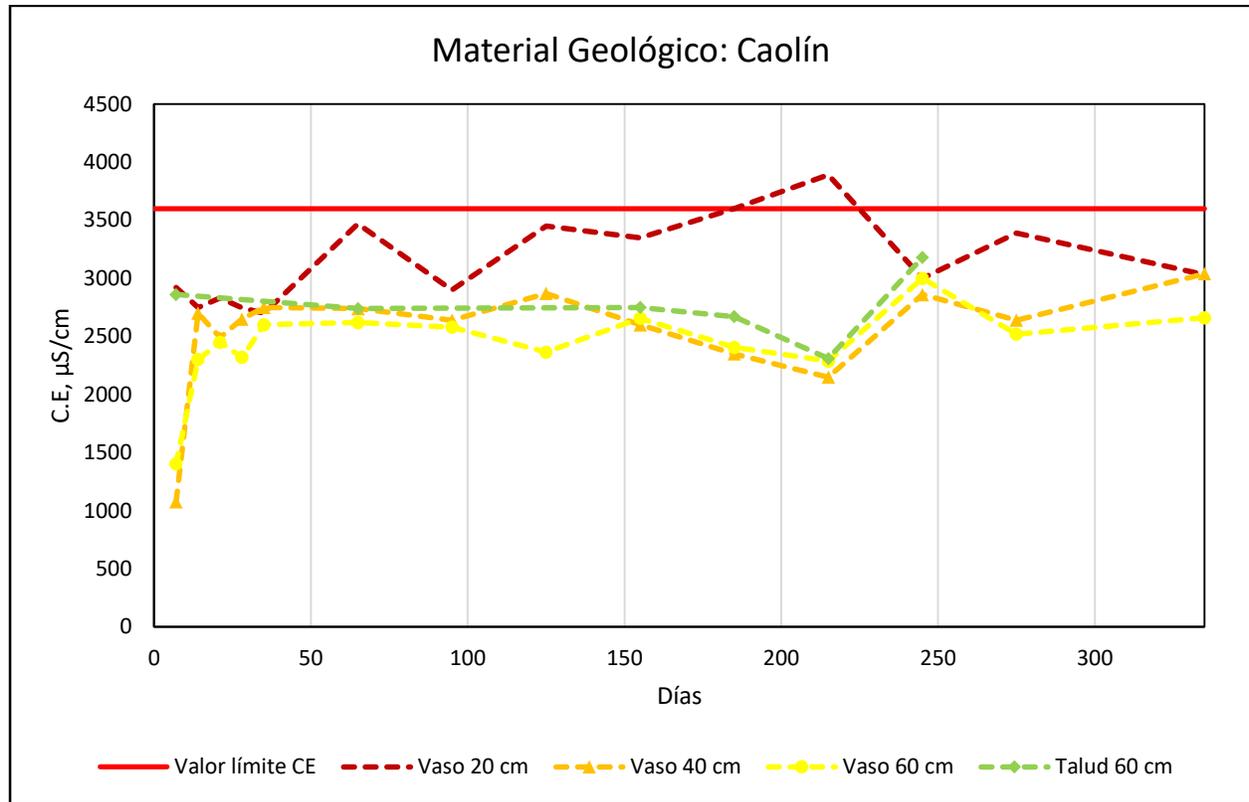


Figura 34 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Caolín en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA.

Para la Figura 34 se tienen las siguientes observaciones de las mediciones de conductividad eléctrica:

El espesor de 20cm presenta una tendencia de aumento, pasando de 2920 a 3890 $\mu$ S/cm en los días 7 y 215 respectivamente, este último valor llegó por encima del valor límite de conductividad eléctrica, esto se debe a la generación de DA en el jal gris los cuales generan sales de sulfato que aumentan la conductividad eléctrica.

El espesor de 40cm presenta de igual manera una tendencia de aumento como en el espesor de 20cm, pasando de 1076 a 3040 $\mu$ S/cm en los días 7 y 330 respectivamente.

El espesor de 60 cm en el Vaso y Talud presentan la misma tendencia de aumento observada, pasando en el Vaso de 1402 a 3000 $\mu$ S/cm en los días 7 y 245 respectivamente y en el Talud de 2860 a 3180 $\mu$ S/cm en los mismos días.

En los espesores de 40 y 60cm en Vaso y de 60 cm en Talud no se aproximan los valores observados al valor límite de conductividad.

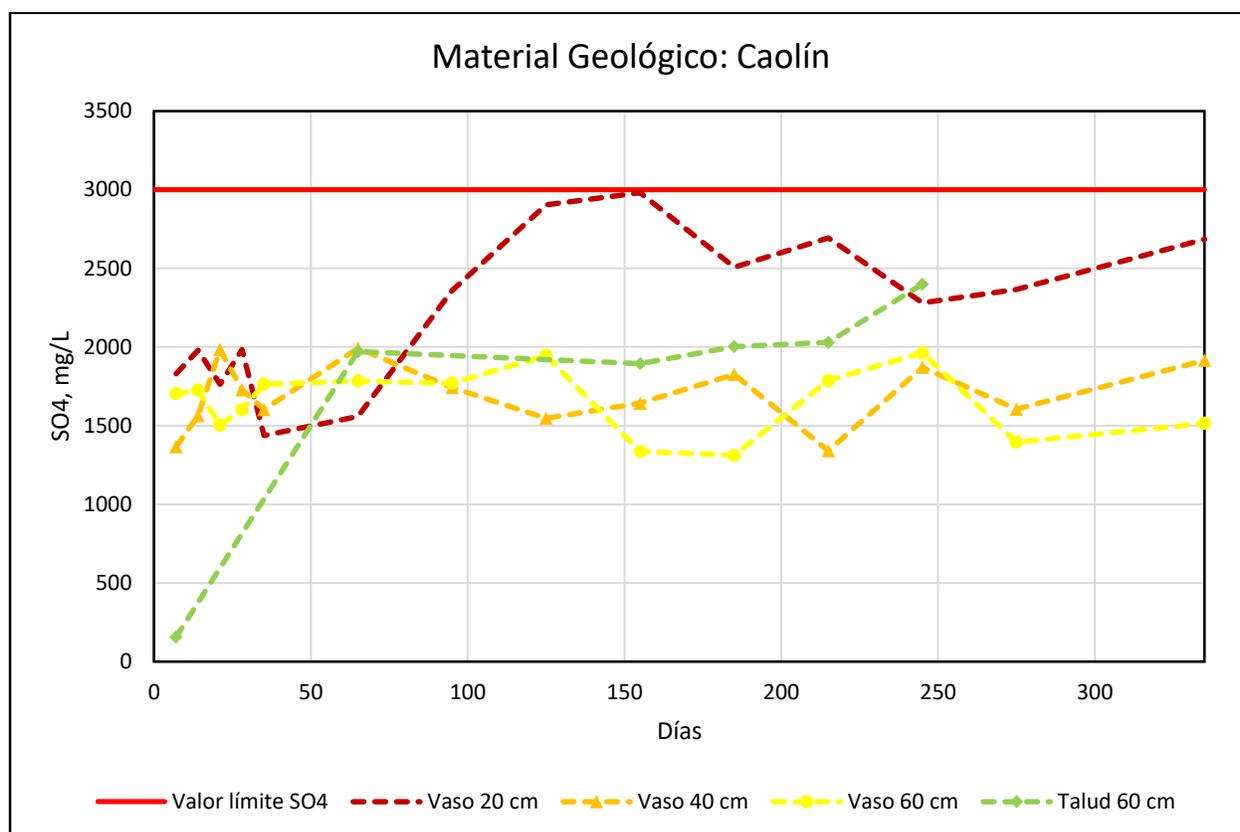


Figura 35 Gráfico de concentración de sulfatos para la capa de Caolín en las Celdas del Vaso y Talud Norte para las pruebas de potencial de generación de DA.

Para la Figura 35 se tienen las siguientes observaciones de las mediciones de concentración de sulfatos:

El espesor de 20cm presenta una tendencia de aumento, pasando de 1830 a 2981mg/L, este último aproximándose al valor límite de concentración de sulfatos, en los días 7 y 155 respectivamente. Esto concuerda con las observaciones de pH y conductividad eléctrica.

El espesor de 40cm presenta una ligera tendencia de aumento, pasando de 1366 a 1916mg/L en los días 7 y 330, está baja concentración de sulfatos indica una baja concentración minerales básicos, generándose sulfatos en menor cantidad que un jal oxidado, pero alcanzando valores de pH ,3.43 unidades de pH en el día 65, correspondiente a uno.

Adicionalmente, en la Figura 36 se observa en los espesores de 20, 40 y 60cm la acumulación de sales en la superficie.



Figura 36 Registro fotográfico de la superficie de la capa de Caolín en las celdas empleadas para evaluar oxidación. A) 20 cm de espesor, B) 40 cm de espesor y C) 60 cm de espesor.

El espesor de 60cm en el Vaso presenta una ligera tendencia de disminución, pasando de 1703 a 1396mg/L en los días 7 y 275 respectivamente. En el día 245 se observa el mismo aumento correspondiente al periodo de secas. Junto con lo observado en el pH y conductividad eléctrica el Caolín a 60cm de espesor es capaz de controlar la generación de DA en el jal gris de Vaso.

El espesor de 60cm en el Talud presenta una tendencia de aumento, pasando de 156 a 2399mg/L en los días 7 y 245 respectivamente, observando el mismo efecto del periodo de secas.

Con base en lo anterior el jal gris bajo la capa de Caolín no es capaz de controlar la generación de DA en el jal gris, como se observa claramente en los espesores de 20 y 40cm en el Vaso y 60 cm en el Talud, adicionalmente se presentó la acumulación de sales en la superficie en los tres espesores de las celdas del Vaso, lo cual no es favorable, pues provocaría la muerte de especies vegetales.

El Caolín resulta ineficiente para controlar la generación de DA en el jal gris del Vaso.

### 6.3.2 Resultados de las Pruebas de Control de Migración de Sales en Jales Grises y en Jales Oxidados en Talud Sur

#### 6.3.3.1 Evaluación de la Capa de Tepetate

Las mediciones de los parámetros: pH, conductividad eléctrica y concentración de sulfatos para las celdas de Tepetate se presentan en las Figura 37 a la Figura 41.

Se realizaron mediciones de cada material geológico correspondiente en la superficie, obteniendo el pH y la conductividad eléctrica.

Cabe señalar que las celdas del Vaso evalúan la migración en el jal gris, en tanto que las celdas del Talud Este en el jal oxidado.

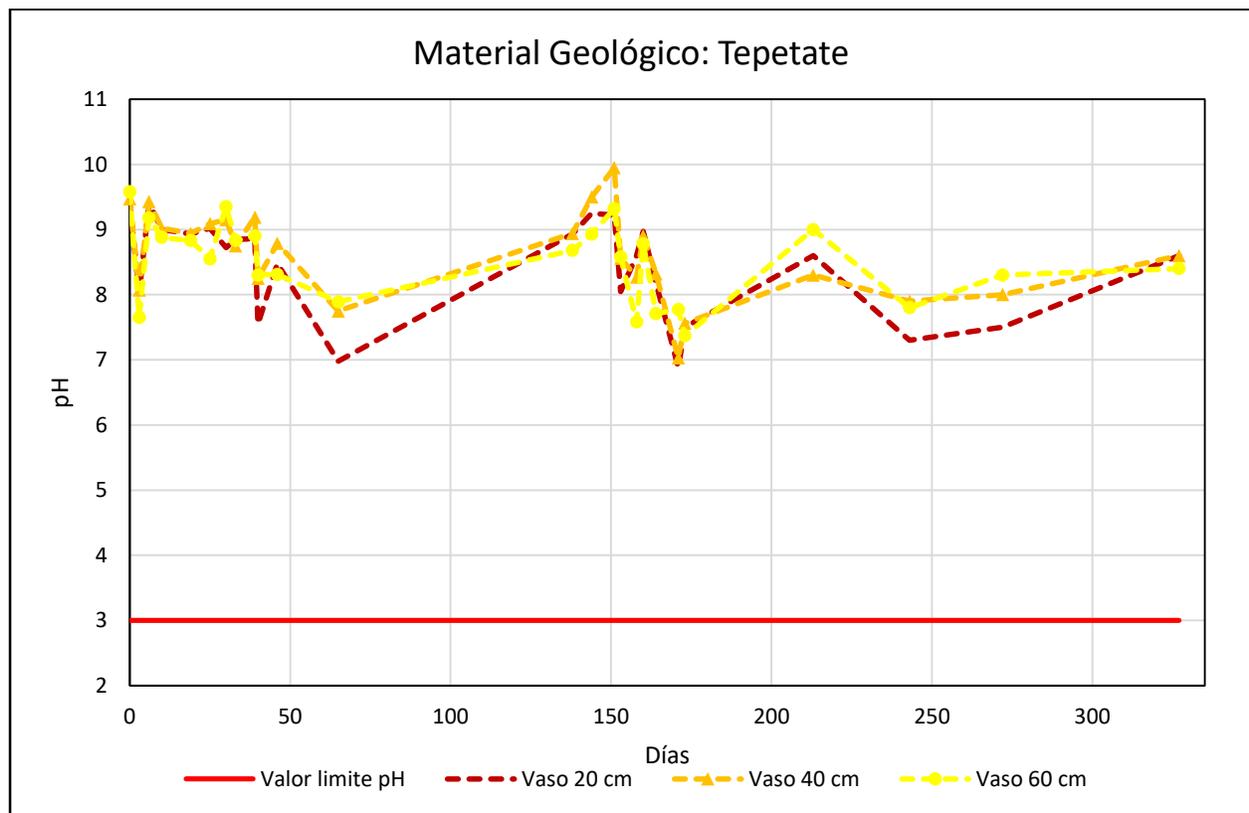


Figura 37 Gráfico de pH para la capa de Tepetate en las Celdas del Vaso para las pruebas de control de migración de sales.

Para la Figura 37 se tienen las siguientes observaciones de las mediciones de pH:

Recuperando los datos del pH y la conductividad eléctrica de la caracterización de materiales geológicos, el Tepetate tiene un pH de 6.64 unidades y conductividad eléctrica de  $1180\mu\text{S}/\text{cm}$ . Es importante tener en cuenta estos valores, ya que se esperarían observar en las pruebas, valores no menores a 6.64 unidades de pH y no mayores a  $1200\mu\text{S}/\text{cm}$ , reflejando el efecto el control de la generación del DA por parte del Tepetate.

El espesor de 20cm en el Vaso presenta una ligera tendencia de disminución, pasando de 9.44 a 6.88 unidades de pH en los días 0 y 171 respectivamente, sin embargo, en el día 327 el valor sube hasta 8.6 unidades. Los espesores siguientes presentan la misma tendencia.

El espesor de 40 cm en el Vaso pasa de 9.47 a 7.03 unidades de pH en los mismos días, de igual manera en el día 327 el valor sube hasta 8.6 unidades y el espesor de 60 cm en el Vaso pasa de 9.58 a 7.77 en los mismos días y en el día 213 el valor sube hasta 9 unidades.

Los cambios abruptos de pH se pueden deber a la migración de sales ácidas a la superficie del jal gris, sin embargo, el Tepetate es capaz de detener su migración, elevando nuevamente los valores de pH.

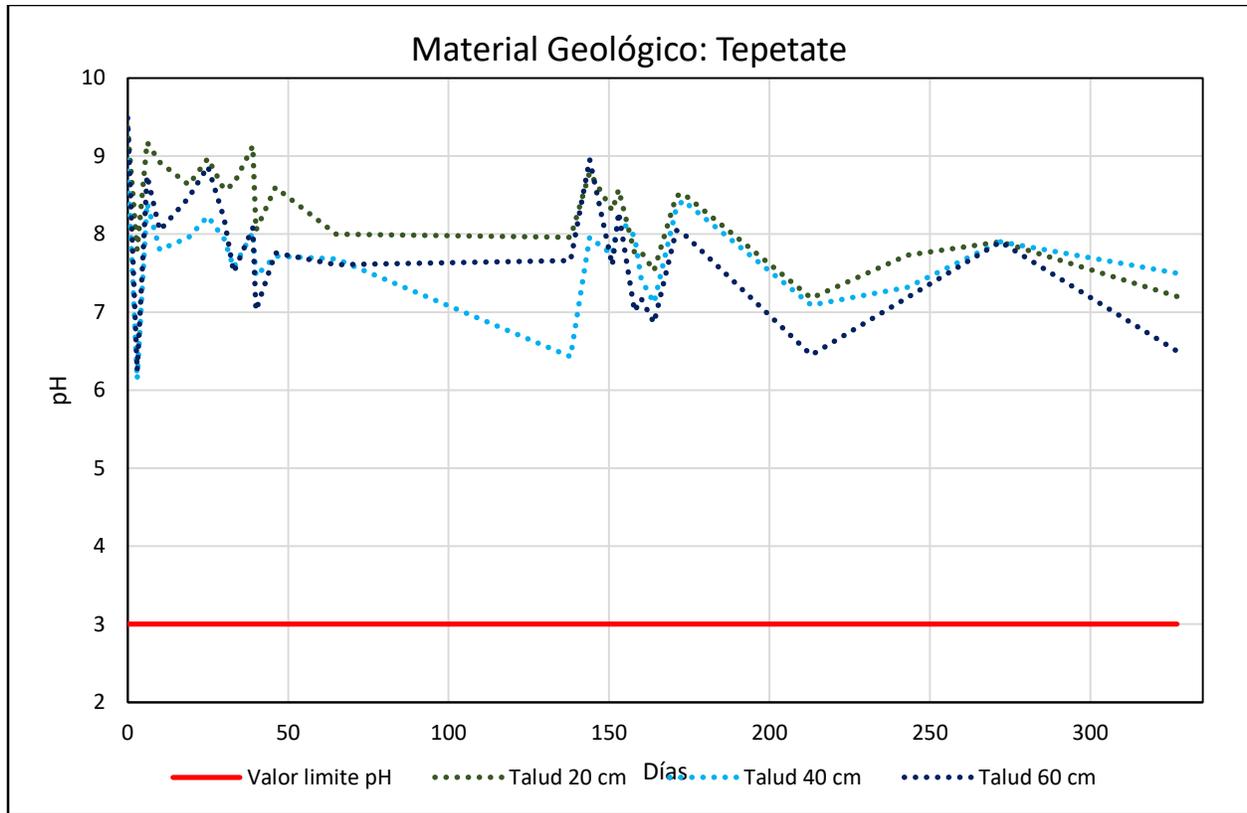


Figura 38 Gráfico de pH para la capa de Tepetate en las Celdas del Talud Este. para las pruebas de control de migración de sales.

Para la Figura 38 se tiene las siguientes observaciones de las mediciones de pH:

El espesor de 20cm en el Talud presenta una tendencia de disminución, pasando de 9.37 a 7.18 unidades de pH en los días 0 y 213 respectivamente. Los espesores siguientes presentan la misma tendencia.

El espesor de 40cm en el Talud pasa de 8.95 a 6.43 unidades de pH en los días 0 y 138 respectivamente y el espesor de 60 cm en el Talud pasa de 9.49 a 6.45 unidades de pH en los días 0 y 213. Se observa que el Tepetate controla los procesos migración de sales acidas a la superficie tanto en el jal gris como en el jal oxidado.

El espesor de 20 cm de Tepetate es el adecuado para controlar los procesos de migración de sales en el jal gris y jal oxidado.

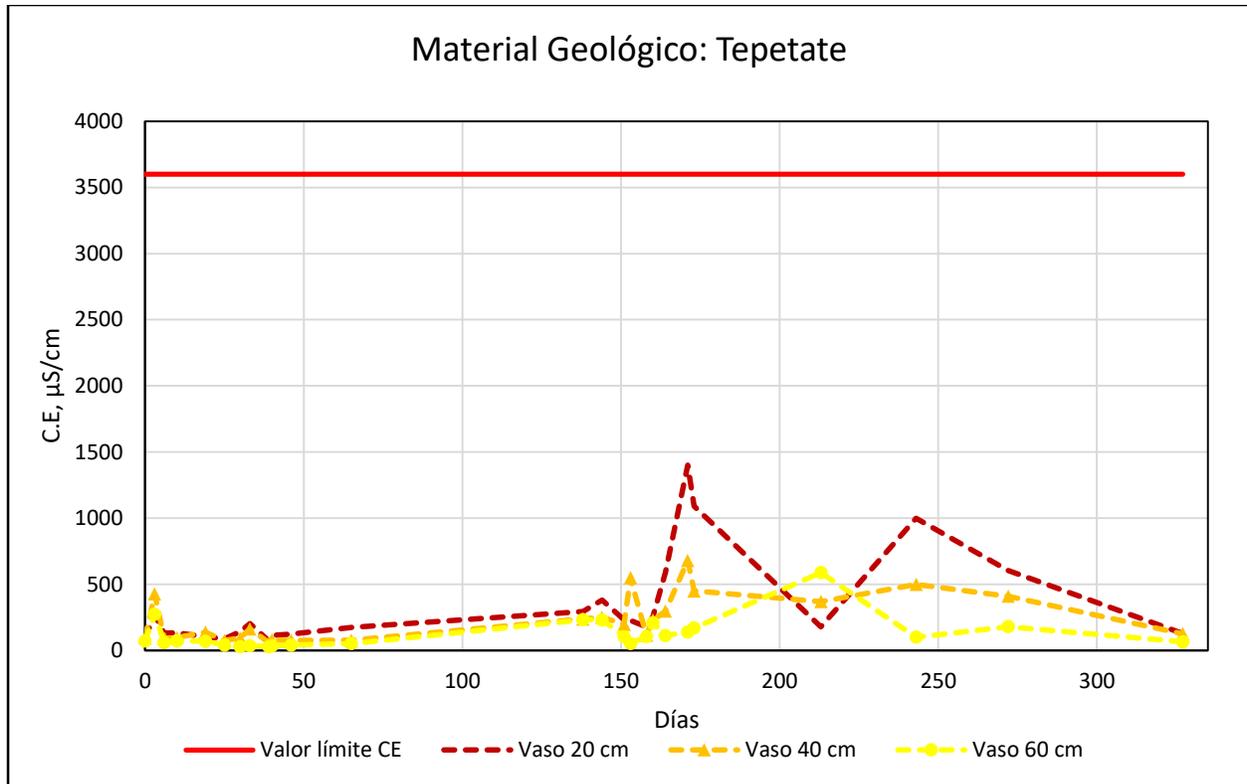


Figura 39 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Tepetate en las Celdas del Vaso para las pruebas de control de migración de sales.

Para la Figura 39 se tiene las siguientes observaciones de las mediciones de conductividad eléctrica:

El espesor de 20cm en el Vaso presenta una tendencia de aumento, pasando de 93.8 a 1400 $\mu$ S/cm en los días 0 y 171 respectivamente, esta tendencia se observa de igual manera en los espesores de 40 y 60cm. En el espesor de 40cm pasa de 95.1 a 680 $\mu$ S/cm en los días 0 y 171, para el espesor 60cm pasa de 72.3 a 588 $\mu$ S/cm en los días 0 y 213 respectivamente.

Comparando el valor de conductividad eléctrica obtenido de la caracterización (1180  $\mu$ S/cm) se observa poca diferencia entre estos valores, por lo tanto, el Tepetate con este espesor controla los procesos de migración de sales en el jal gris desde un espesor de 20cm.

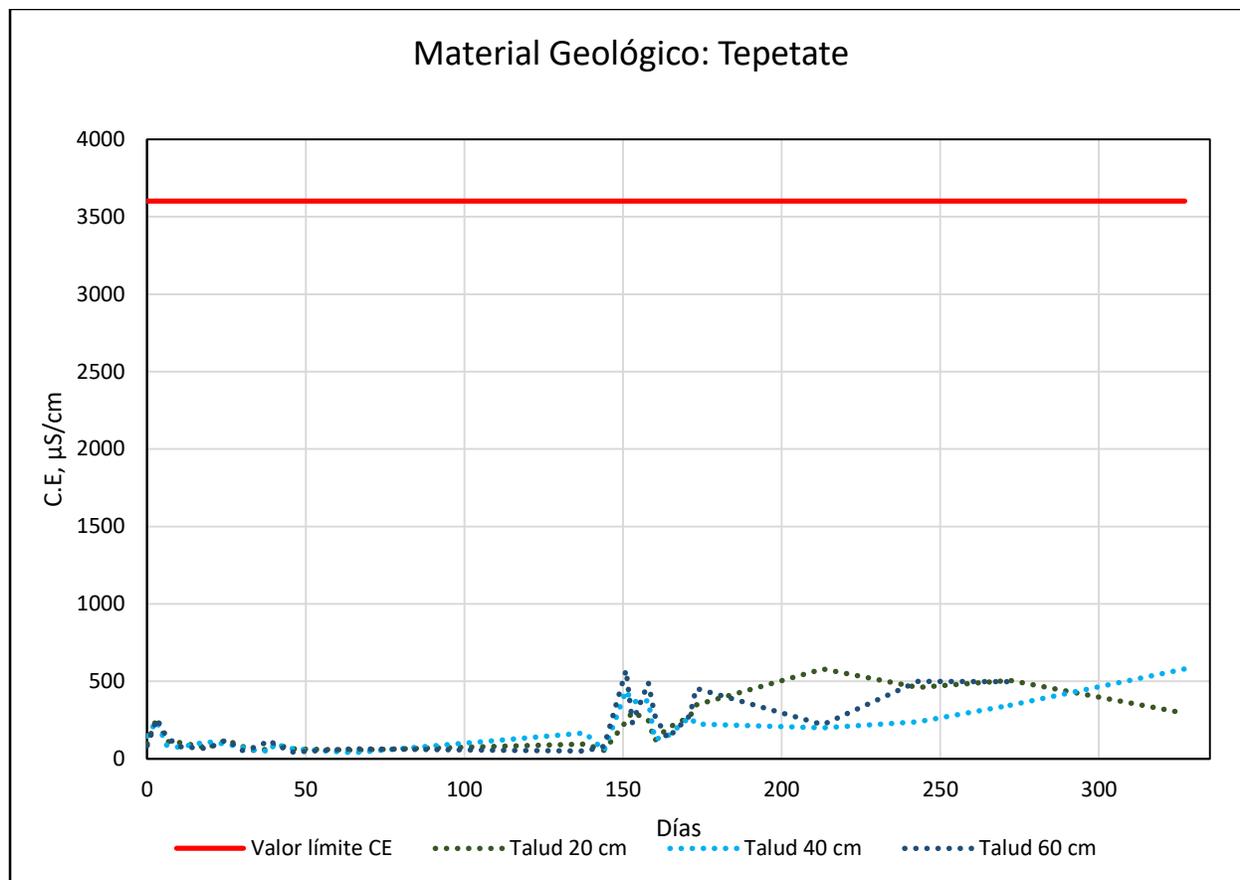


Figura 40 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Tepetate en las Celdas del Talud Este para las pruebas de control de migración de sales.

Para la Figura 40 se tiene las siguientes observaciones de las mediciones de conductividad eléctrica:

El espesor de 20cm en el Talud presenta una ligera tendencia de aumento, pasando de 94.2 a 580 $\mu$ S/cm en los días 0 y 213 respectivamente. Esta tendencia se observa e igual manera en los espesores de 40 y 60cm en el Talud. En el espesor de 40cm pasa de 146.5 a 580 $\mu$ S/cm en los días 0 y 327, el espesor de 60cm pasa de 85.7 a 572 $\mu$ S/cm en los días 0 y 151 respectivamente. Esto muestra la eficiencia para controlar los procesos de migración de sales para el jal oxidado desde los 20cm de espesor.

En conclusión, el Tepetate resulta eficiente, desde un espesor de 20cm de espesor para controlar la generación de DA como la migración de sales, tanto en jales grises como en los jales oxidados.

### 6.3.3.2 Evaluación de la Capa de Conglomerado Rojo

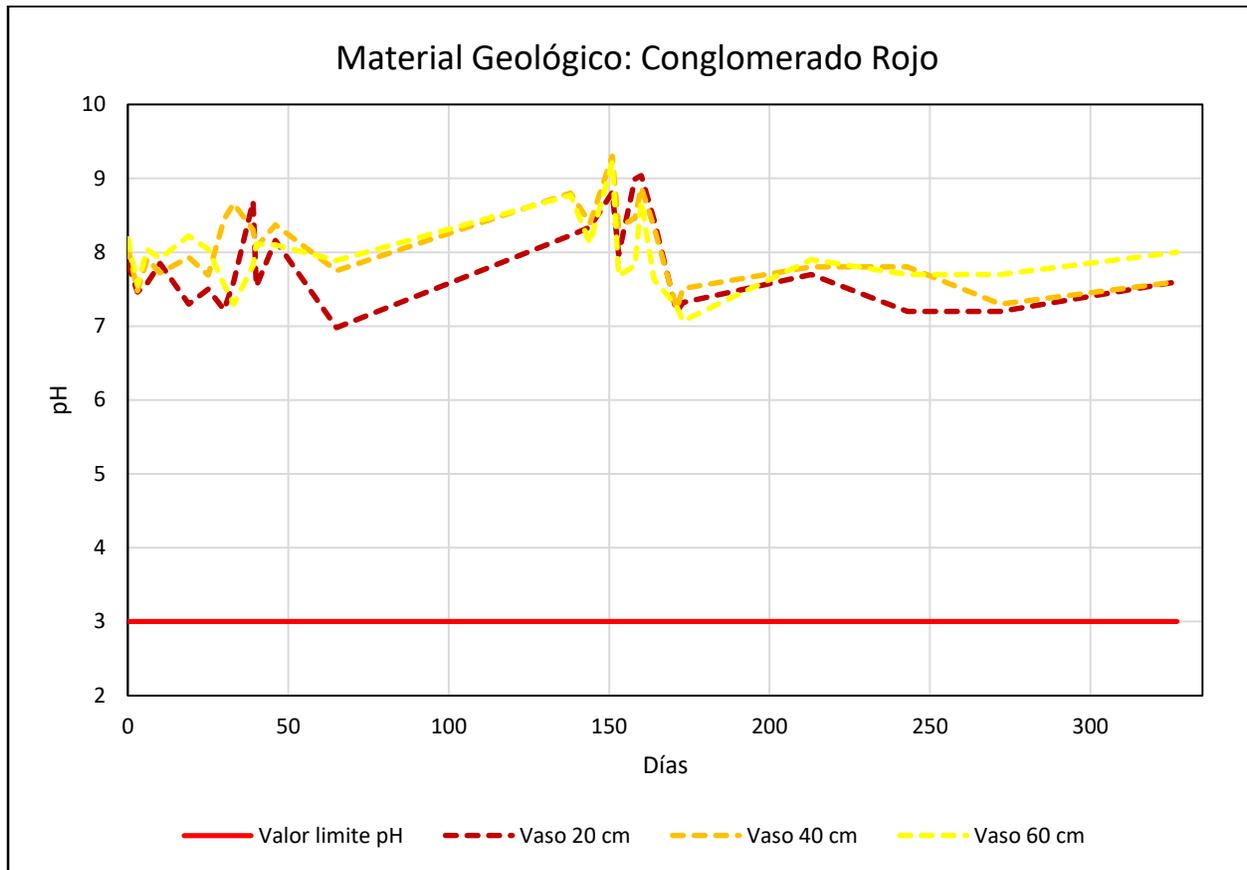


Figura 41 Gráfico de pH para la capa de Conglomerado Rojo en las Celdas del Vaso para las pruebas de control de migración de sales.

Para la Figura 41 se tiene las siguientes observaciones de las mediciones de pH:

El espesor de 20 cm en el Vaso presenta una ligera tendencia de disminución, pasando de 7.84 a 7.6 unidades de pH en los días 0 y 327 respectivamente, sin embargo, aumenta en el día 160 a 9.04 unidades de pH, es necesario observar la conductividad, pues en las pruebas de potencial de generación de DA, en la Figura 32 se observa una acumulación de sales. Los espesores de 40 y 60 cm en el Vaso presentan el mismo comportamiento. Para el caso del espesor de 40 cm pasa de 8.06 a 9.3 unidades de pH en los días 0 y 151 respectivamente, bajando a 7.6 unidades de pH y para el caso del espesor de 60 cm pasa de 8.18 a 8 unidades y aumentando en el día 151 a 9.22 unidades de pH.

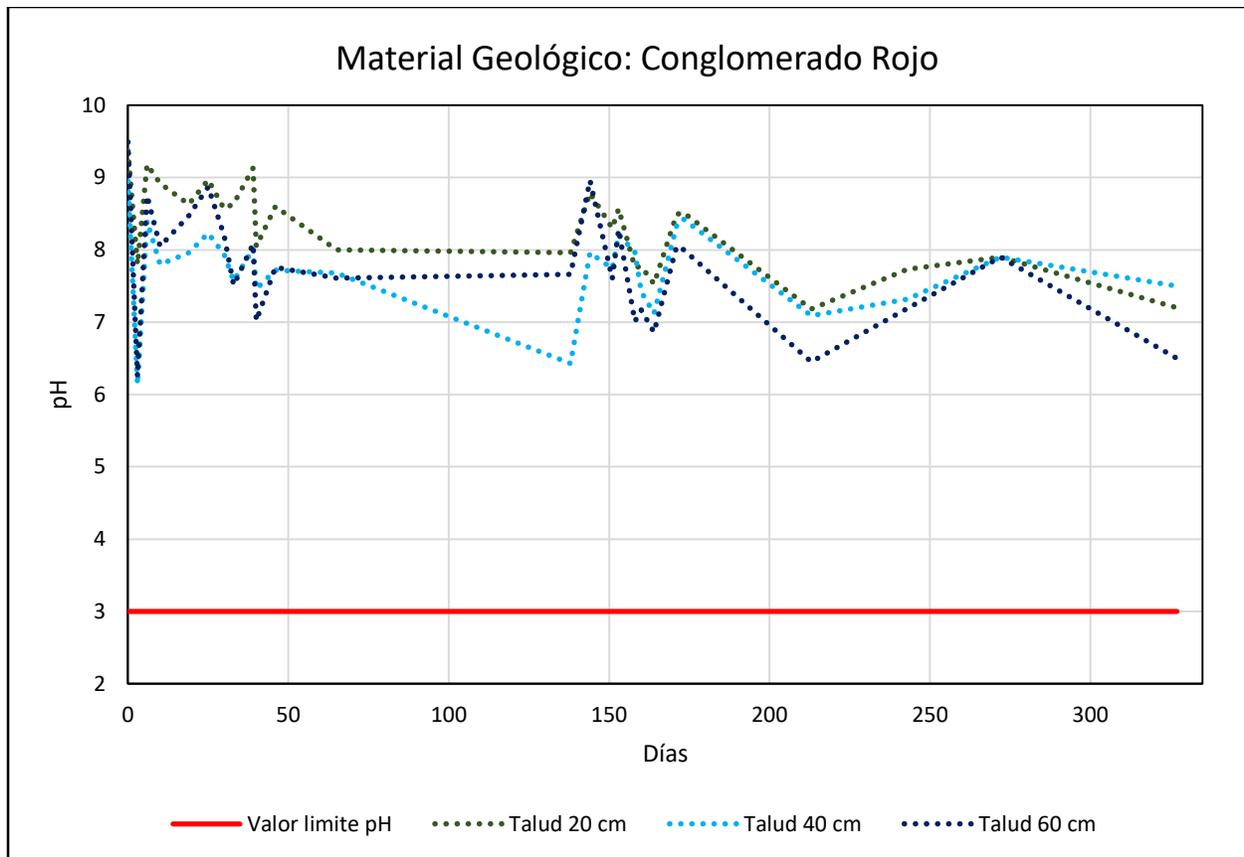


Figura 42 Gráfico de pH para la capa de Conglomerado Rojo en las Celdas del Talud Este para las pruebas de control de migración de sales.

Para la Figura 42 se tiene las siguientes observaciones de las mediciones de pH:

El espesor de 20cm en el Talud presenta una ligera tendencia de disminución, pasando de 9.37 a 7.2 unidades de pH en los días 0 y 327 respectivamente. Los espesores de 40 y 60cm en el Talud presentan esta misma tendencia. El espesor de 40cm pasa de 8.95 a 7.5 en los mismos días y en el día 173 se llega a 8.43 unidades de pH. El espesor de 60cm pasa de 9.48 a 6.5 unidades de pH en los mismos días y en el día 144 llega a 8.96 unidades de pH. Se observa, a comparación de las celdas del Vaso, una mayor disminución hasta el día final de la prueba para el jal oxidado.

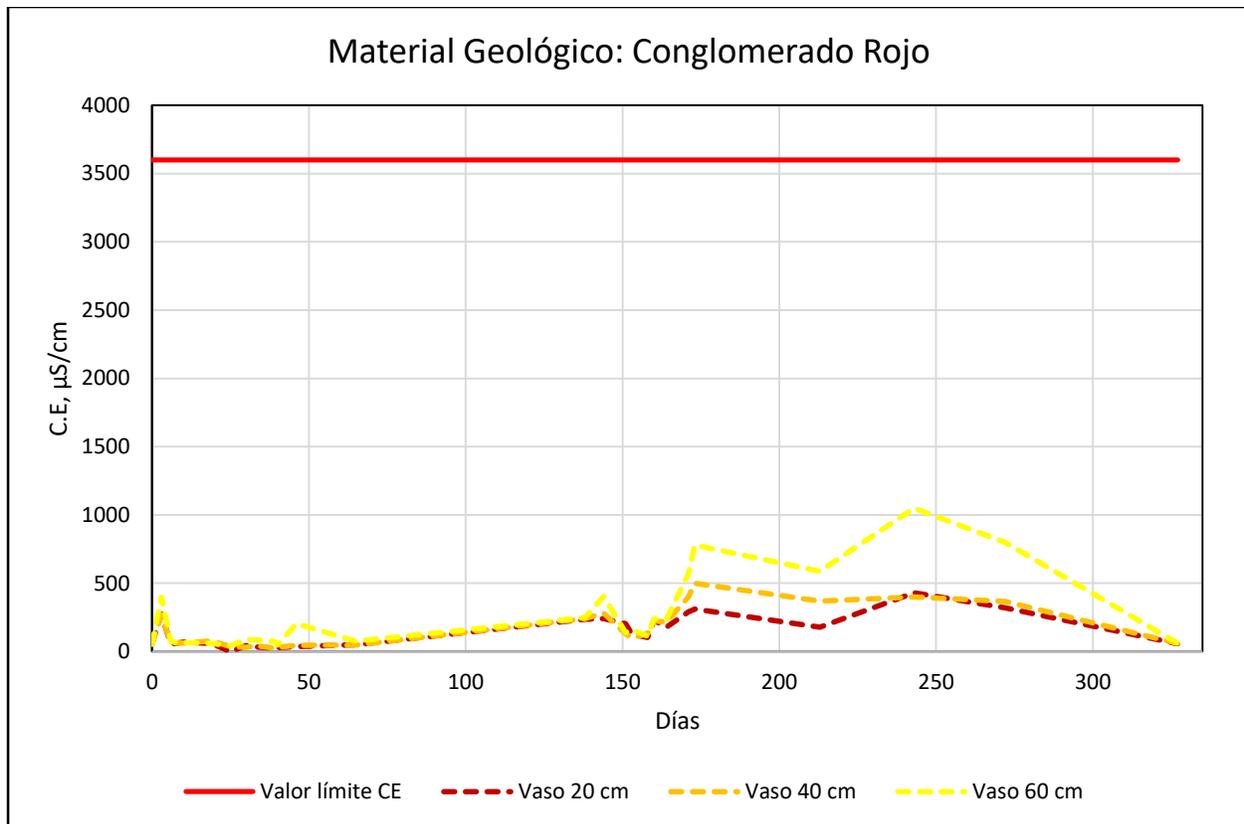


Figura 43 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Conglomerado Rojo en las Celdas del Vaso para las pruebas de control de migración de sales.

Para la Figura 43 se tiene las siguientes observaciones de las mediciones de conductividad eléctrica:

El espesor de 20 cm en el Vaso presenta una tendencia estable, no se observan cambios notables en la conductividad eléctrica, se tiene los valores de 62.7 y 57  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en los días 0 y 327. Esta tendencia se presenta de igual manera en los espesores de 40 y 60cm en el Vaso.

El espesor de 40 cm en el Vaso pasa de 52.4 a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en los días 0 y 173 respectivamente y el espesor de 60cm en el Vaso pasa de 56.4 a 1050  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en los días 0 y 243, bajando en el día 327 a 61 $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En estos dos espesores la conductividad eléctrica al final de la prueba llega muy cerca a los valores iniciales.

Por lo tanto, el Conglomerado Rojo en las celdas del Vaso, para las pruebas de migración de sales, presenta un control en los procesos de migración de sales hacia la superficie.

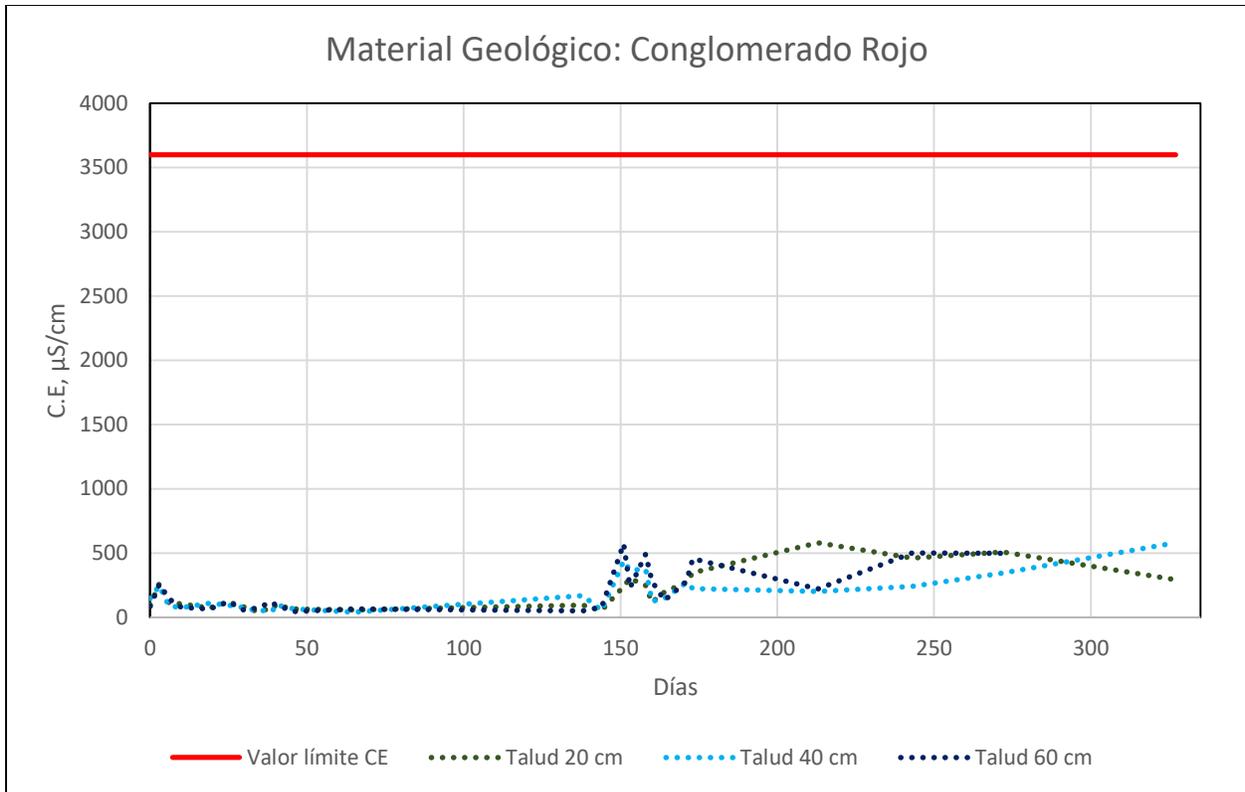


Figura 44 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Conglomerado Rojo en las Celdas del Talud Este para las pruebas de control de migración de sales.

Para la Figura 44 se tiene las siguientes observaciones de las mediciones de conductividad eléctrica:

El espesor de 20 cm en el Talud presenta una ligera tendencia de aumento, pasando de 94.2 a 294 $\mu\text{S}/\text{cm}$  en los días 0 y 327 respectivamente, se observa un control en los procesos de migración de sales para jales oxidados. Esto confirma lo observado anteriormente para jales grises.

La tendencia observada en el espesor de 20cm en el Talud se presenta de la misma manera para los espesores de 40 y 60cm en el Talud. Para el espesor de 40cm pasa de 146.5 a 580 $\mu\text{S}/\text{cm}$  en los días 0 y 327 respectivamente, el espesor de 60 cm pasa de 85.7 a 498 $\mu\text{S}/\text{cm}$  en los días 0 y 272 respectivamente. Se observa, comparado con las celdas del Vaso, un mayor aumento en la conductividad ya que los jales oxidados tienen una mucho mayor conductividad eléctrica, sin embargo, en ninguno de los casos se llega al valor límite de conductividad eléctrica ni de pH.

Con base en las observaciones para las celdas de migración de sales en Vaso y Talud; el Conglomerado Rojo con un espesor desde 20cm controla, dentro de la duración de la prueba, los procesos de migración de sales a la superficie, tanto en jales grises como en jales oxidados.

Se observaron aumentos anormales en para todos los espesores en celdas del Vaso y Talud entre los días 144 y 151. Esto se puede deber a la época de lluvias las cuales adicionan sales que aumentan la conductividad, para el caso del aumento del pH este se puede explicar por lo minerales básicos en el conglomerado, los cuales neutralizan la acides generada en sales ácidas en la superficie.

### 6.3.3.3 Evaluación de la Capa de Caolín

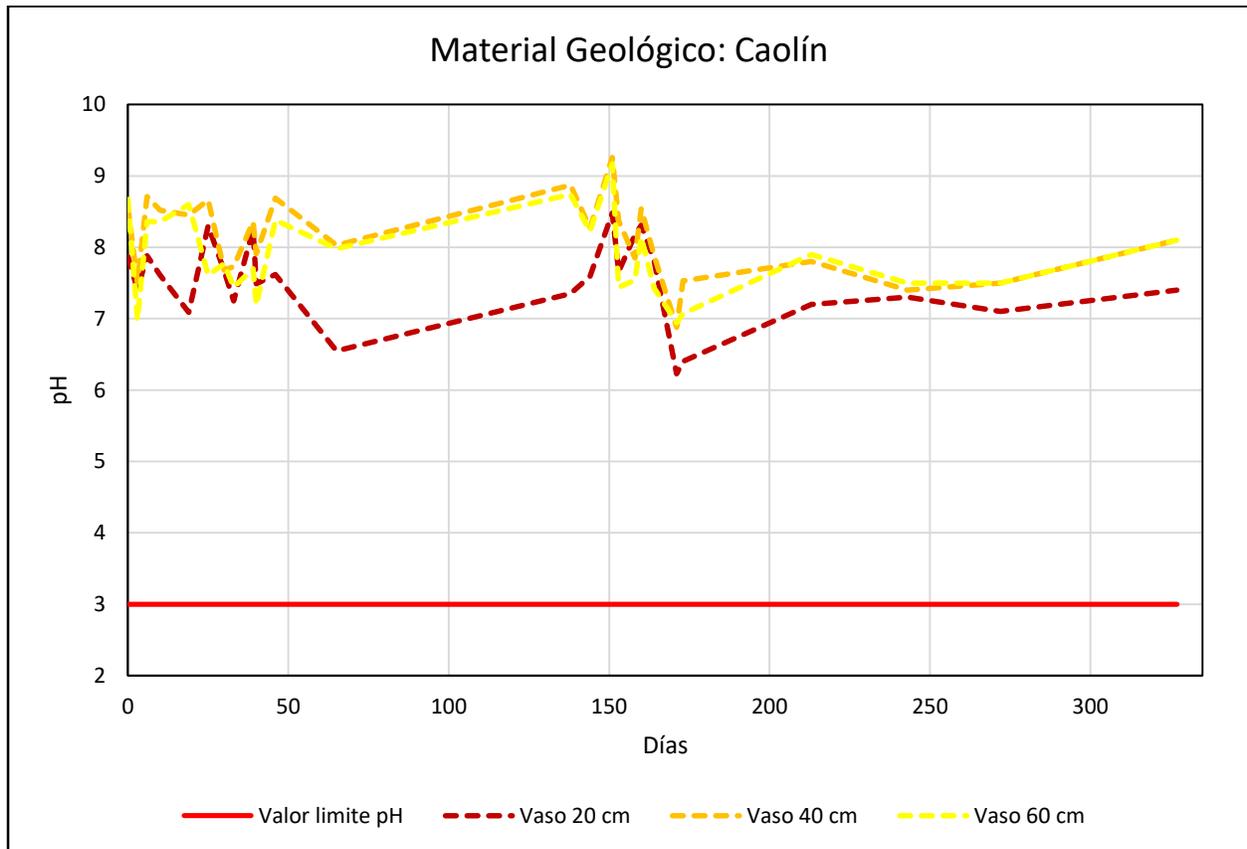


Figura 45 Gráfico de pH para la capa de Caolín en las Celdas del Vaso para las pruebas de control de migración de sales.

Para la Figura 45 se tiene las siguientes observaciones de las mediciones de pH:

El espesor de 20cm en el Vaso presenta una tendencia de disminución, pasando de 7.87 a 6.23 unidades de pH en los días 0 y 171 respectivamente, sin embargo, este vuelve a subir en el día 327 a 7.4 unidades.

Los espesores de 40 y 60 cm en el Vaso presentan la misma tendencia, pero en menor medida. El espesor de 40cm pasa de 8.57 a 6.88 unidades de pH y vuelve a subir a 8.1 unidades en los días 0, 171 y 327 respectivamente, para el espesor de 60 cm este pasa de 8.67 a 6.94 y vuelve a subir a 8.1 en los mismos días.

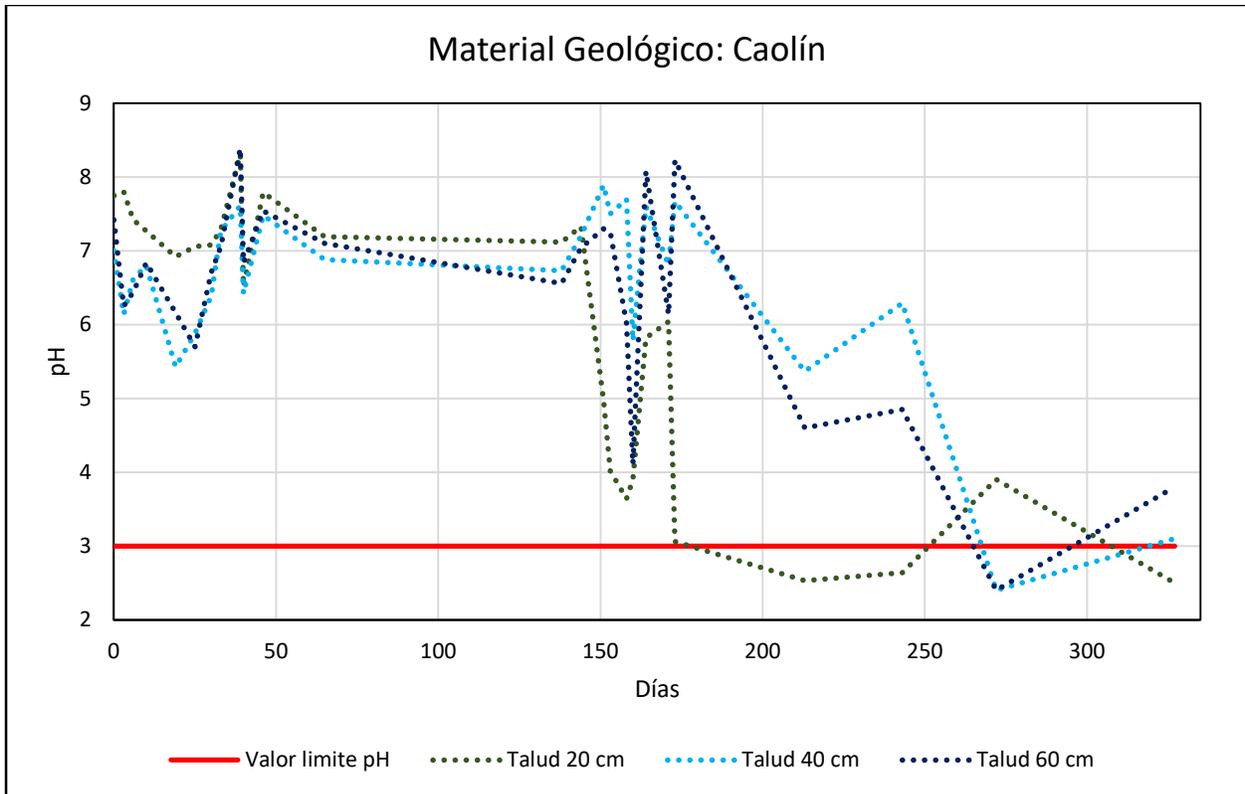


Figura 46 Gráfico de pH para la capa de Caolín en las Celdas del Talud Este para las pruebas de control de migración de sales.

Para la Figura 46 se tiene las siguientes observaciones de las mediciones de pH:

El espesor de 20 cm en el Talud presenta una notable tendencia de disminución, pasando de 7.75 a 2.53 unidades de pH en los días 0 y 213 respectivamente, este último valor llega por debajo del valor límite de pH, esto se debe al poco control en los procesos de migración de sales ácidas para el jal oxidado.

Los espesores de 40 y 60cm en el Talud presentan la misma tendencia que el espesor de 20cm. El espesor de 40cm pasa de 7 a 2.4 unidades de pH en los días 0 y 272, el espesor de 60cm pasa de 7.42 a 2.4 unidades de pH en los mismos días.

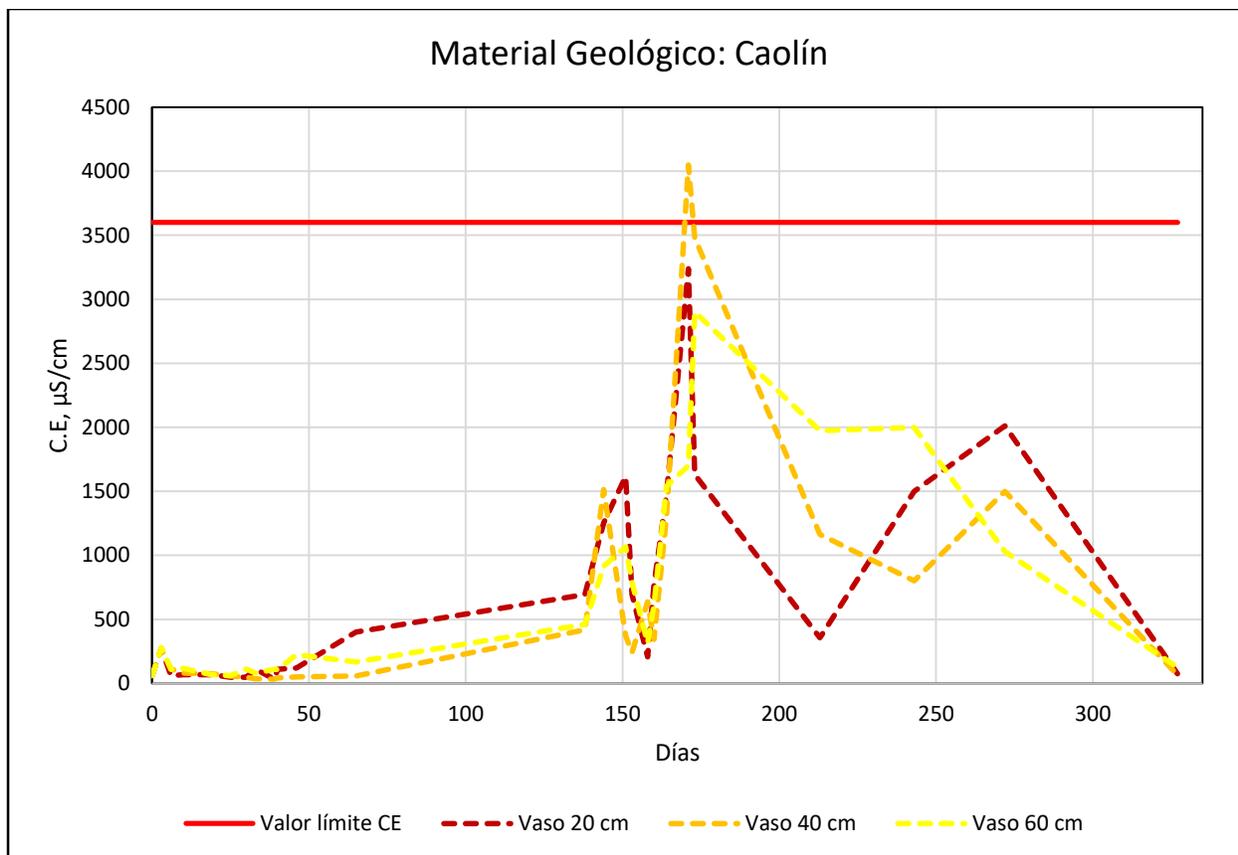


Figura 47 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Caolín en las Celdas del Vaso para las pruebas de control de migración de sales.

Para la Figura 47 se tiene las siguientes observaciones de las mediciones de conductividad eléctrica:

El espesor de 20 cm en el Vaso presenta una tendencia de aumento, pasando de 62.2 a 3240 $\mu\text{S/cm}$  en los días 0 y 171 respectivamente, sin embargo, en el día 327 esta baja hasta 75  $\mu\text{S/cm}$ . Esta tendencia se observa de igual manera en los espesores de 40 y 60cm.

El espesor de 40 cm en el Vaso pasa de 61.2 a 4050 y baja a 66 $\mu\text{S/cm}$  en los días 0 y 171 y 327 respectivamente, superando el valor límite de conductividad en el día 171. Para el espesor de 60 cm en el Vaso pasa de 60.4 a 2900 y baja a 124 $\mu\text{S/cm}$  en los mismos días.

Esto confirma lo observado en el pH, se están llevando procesos de migración de sales ácidas en el Caolín, especialmente en los espesores de 20 y 40cm.

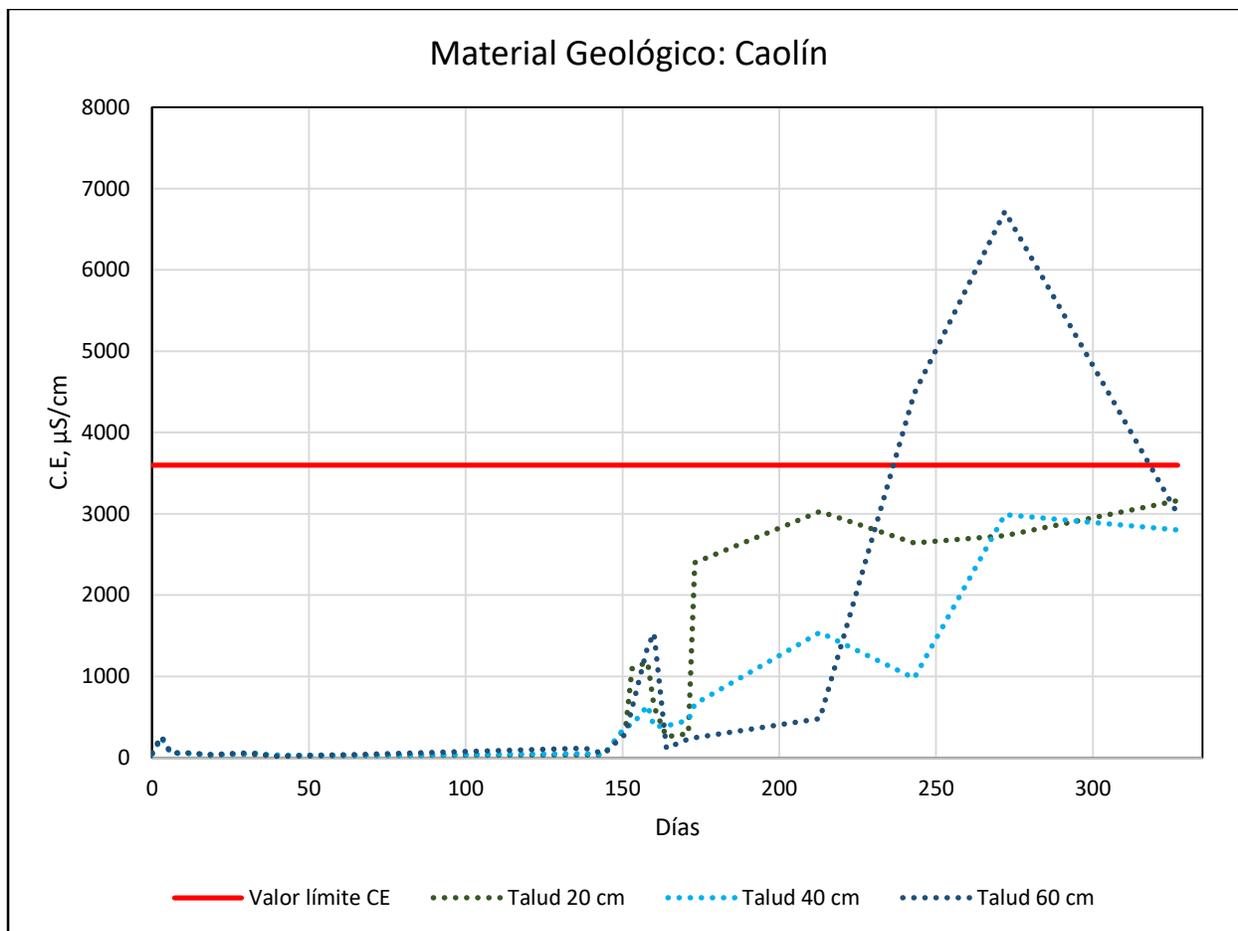


Figura 48 Gráfico de conductividad eléctrica para la capa de Caolín en las Celdas del Talud Este. para las pruebas de control de migración de sales.

Para la Figura 48 se tiene las siguientes observaciones de las mediciones de conductividad eléctrica:

El espesor de 20cm en el Talud presenta una notable tendencia de aumento, pasando de 57.2 a 3160 $\mu$ S/cm en los días 0 y 327 respectivamente, para los espesores de 40 y 60cm se observa la misma tendencia. Para el espesor de 40cm pasa de 42.9 a 2990 $\mu$ S/cm en los días 0 y 272 y para el espesor de 60cm se pasa de 50 a 6720 $\mu$ S/cm y baja a 3000 $\mu$ S/cm en los días 0, 272 y 327 respectivamente.

Con base en las observaciones de pH y conductividad eléctrica en jal gris y jal oxidado se puede concluir que el Caolín, en los tres espesores, no es capaz de controlar los procesos de migración de sales ácidas.

La medición de parámetros en la superficie de la capa de cualquier material geológico se verá afectada por las condiciones climáticas, como se observa en los casos de lluvias, entre los días 150 y 171, y de secas, entre los días 215 a 270, aumentando la conductividad por los procesos de migración por capilaridad de sales ácidas.

## Capítulo 7. Conclusiones

1. Los resultados de la caracterización del jal gris permiten concluir lo siguiente:

- La concentración de parámetros fisicoquímicos y químicos permitió concluir lo siguiente:

Con base en la NOM-157-SEMARNAT-2009 el jal gris en el Vaso y el Talud no resultar ser peligroso por su composición de constituyentes tóxicos.

Las concentraciones totales en el Tepetate y el Conglomerado Rojo de Cu Fe, K, Mn, y Zn con base en la NOM-021-RECNAT-2000, pueden considerarse aptos para desarrollar especies vegetales sin la necesidad de adicionar nutrientes.

- La determinación mineralógica por Difracción de Rayos X permitió concluir lo siguiente:

Se determinó en el jal gris, del Vaso y el Talud la presencia de las especies minerales pirita, magnetita y calcita, la pirita y magnetita son potenciales generadores de drenaje ácido de mina, mientras que la calcita es capaz de neutralizar la acidez generada, sin embargo, no se encuentra en cantidad suficiente para lograrlo, como lo muestran las pruebas de oxidación acelerada.

- Las pruebas de oxidación acelerada permitieron concluir lo siguiente:

El jal gris del Vaso presenta el mayor potencial de generación de DA, llegando a un pH de 2.43 unidades y una conductividad eléctrica de 1672.66  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo cual concuerda con estudios anteriores que mostraron un PN/PA (balance ácido-base) de 0.81, un elevado potencial de generación de DA, con base en la NOM-141-SEMARNAT-2003.

2. Los resultados de la caracterización de los materiales geológicos permitieron concluir lo siguiente:

El Tepetate presenta las mejores características para evitar la generación de DA en el jal gris, con base en los altos valores de conductividad hidráulica, característica ideal para romper la migración de sales por efecto de capilaridad, su composición mineralógica de caliza, mineral capaz de neutralizar el pH ácido y su tamaño de partícula de 3in.

3. Los resultados para el Potencial de Generación de DA concluyeron lo siguiente:

El Tepetate con un espesor mínimo del 20 cm es eficaz para evitar la generación de DA en el jal gris y el jal oxidado.

El Conglomerado Rojo y el Caolín no evitaron la generación de DA en el jal gris y el jal oxidado.

El jal gris en el Talud presentará el mayor potencial de generación de DA, esto se debe a la menor cantidad de minerales básicos que neutralicen la acides generada.

4. Los resultados para el control de migración de sales concluyeron lo siguiente:

El Tepetate desde un espesor de 20 cm, evita los procesos de migración de sales del jal gris y el jal oxidado hacia la superficie.

El Conglomerado Rojo, a primera vista, presenta un control en los procesos de migración, sin embargo, como se observa en el caso práctico del Talud con una capa de Conglomerado Rojo, a largo plazo, no controlará la generación de DA, resultando en la muerte de especies vegetales que se desarrollen en la superficie.

El Caolín no es capaz de evitar el proceso de migración de sales hacia la superficie tanto en el jal gris como en el jal oxidado.

5. El Tepetate con un tamaño de partícula menor a 3in y con un espesor mínimo de 20 cm, con base en los datos arrojados por su caracterización, las pruebas de control de generación de DA y de migración de sales, tanto en los jales grises y los jales oxidados, resulta ser el mejor material geológico para ser usado como cubierta de la presa de jales “Guásimas”.

## Referencias

### Bibliografía

- [1] Servicio Geológico Mexicano. (04 de octubre de 2018). *Carta Geológico-Minera Minatitlán E13-B33*. Recuperado el 04 de Octubre de 2018, de gov.com.mx "Tu gobierno en un solo punto."
- [2] Secretaría de Economía (4 de septiembre del 2020). *Minería* Recuperado el 8 de septiembre del 2020, de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>
- [3] Ortiz Hernández, M. L., Mussali Galante , P., Sánchez Salinas, E., & Tovar Sánchez, E. (2015). *Mining and Mine Tailings: Characterization, Impacts, Ecology and Bioremediation Strategies*. En M. S. Fuentes, V. L. Colin, & J. M. Saez, *Strategies for Bioremediation of Organic and Inorganic Pollutants* ,p. 2015. CRC Press.
- [4] Mondragón Romero, E., Hernández Acosta, E., Rubiños Panta, J. E., & Santoyo Edmundo, R. (2009). *CARACTERÍSTICAS DE RESIDUOS DE MINAS "JALES" DE LA CIUDAD DE PACHUCA, HIDALGO*. 01. Recuperado el 20 de junio de 2018, de <http://studylib.es/doc/571668/caracter%C3%ADsticas-de-residuos-de-minas-%E2%80%9Cjales%E2%80%9D>
- [5] Corrales Pérez Daniel, Martín Romero Francisco. (2013). Evaluación de la peligrosidad de jales de zonas mineras de Nicaragua y México y alternativas de solución. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen 65, Núm. 3, 2013, 427-446.
- [6] López Pamo, E., Aduvire, O., & Baretino D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina; estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*, 113, 3-21.
- [7] Grupo de Biogeoquímica Ambiental, Instituto de Geografía-UNAM. (2008). *Plan de Cierre de la Presa de Jales del CMBJPC, De Acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas*. DF.

- [8] Rodríguez Ceja , S. (2005). *Estudio de la Desulfuración en los Minerales de Peña Colorada*. Tesis de Maestría, Universidad de Colima, Coquimatlán. Recuperado el 02 de Octubre de 2018 de [http://digeset.ucol.mx/tesis\\_posgrado/Pdf/Sergio\\_Rodriguez\\_Ceja.pdf](http://digeset.ucol.mx/tesis_posgrado/Pdf/Sergio_Rodriguez_Ceja.pdf)
- [9] Corona Esquivel, R., Tritlla, J., Henríquez, F., Morales Isinza, A., de la Luz Portugal, J., & Nava Pérez, L. (2009). *Geología y mineralización del yacimiento de hierro Peña Colorada, Colima*. En K. F. Clark, G. A. Salas Pizá, & R. Cubillas Estrada (Edits.), *Geología Económica de México* (Segunda ed., pp.522-527). D.F: Servicio Geológico Mexicano. Recuperado el 20 de junio de 2018, de [https://www.researchgate.net/publication/273439003\\_Geologia\\_y\\_mineralizacion\\_del\\_Yacimiento\\_Pena\\_Colorada\\_Colima](https://www.researchgate.net/publication/273439003_Geologia_y_mineralizacion_del_Yacimiento_Pena_Colorada_Colima)
- [10] Tritlla, J., Camprubí, A., Centeno García, E., Corona Esquivel, R., Iriondo, A., Sánchez Martínez, S., Morales Puente , P. (2003). *Estructura y edad del depósito de hierro de Peña Colorada (Colima): un posible equivalente fanerozoico de los depósitos de tipo IOCG*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 20, núm. 3, 182-183. Recuperado el 13 de junio de 2018 de la base de datos Redalyc.
- [11] Ramírez López, P. Y. (2018). *Implementación de Sistema Operacional del Comedor General y Control de Mejoras en el Área de Transporte*. Proyecto, Instituto Tecnológico de Colima. Recuperado el 24 de Septiembre de 2018 de la base de datos DSpace @ ITColima.
- [12 ] Luna Celis, L. (2011). *Evaluación de la Eficiencia de Diferentes Rocas, para el Control y Manejo del Drenaje Ácido, Producido por una Mina de Hierro*. Tesis de Maestría , UNAM, DF.
- [13] INEGI (1995). *Estudio Hidrológico del Estado de Colima*. Recuperado el 01 de diciembre de 2018.
- [14] CONAGUA. (2018). *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero de Colima (0601), Estado de Colima*. Diario Oficial de la Nación.

- [15] CONAGUA. (2015). *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Minatitlán (0613), Estado de Colima*. Diario Oficial de la Federación.
- [16] PROFEPA, *NORMA Oficial Mexicana , NOM-141-SEMARNAT-2003*. Recuperado el 31 de octubre de 2018, : <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1317/1/nom-141-semarnat-2003.pdf>
- [17] Aduvire, O. (2006). *Drenaje Acido de Mina Generación y Tratamiento*. Instituto Geológico y Minero de España, Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente, Madrid. Recuperado el 01 de diciembre de 2018
- [18] Benner, S., Blowes, D., Gould, W., Herbert, R., & Ptacek, C. (1999). Geochemistry of a permeable reactive barrier for metals and acid mine drainage. *Environ. Sci. Technol.*, 33(16), 2793-2799.
- [19] Pérez, N., Schwarz, A., & Urrutia, H. (2017). Tratamiento del drenaje ácido de minas: estudio de reducción de sulfato en mezclas orgánicas. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(1), 53-64. Recuperado el 01 de diciembre de 2018, de la base de datos SCIELO México.
- [20] Yann René Ramos-Arroyo, A. M.-G. (julio-septiembre de 2006). Simulación de los procesos geoquímicos en jales mineros. *Ingeniería hidráulica en México*, XXI(03), 87-100. Recuperado el 01 de diciembre de 2018
- [21] Trumm, D. (June-September de 2010). Selection of active and passive treatment systems for AMD-flow charts for New Zealand condition. *New Zeland Journal of Geology and Geophysics*, 53, 195-210.
- [22] Chaparro Leal, L. T. (Junio de 2015). Drenajes Ácidos de Mina Formación y Manejo. *ESAICA*, 1(1), 53-57.
- [23] López Pamo, E., Aduvire, O., & Baretino D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina; estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*, 113, 3-21.

- [24] A.I. Roca-Fernández(S.f) . *Macro-, micronutrientes y metales pesados presentes en el suelo.*, Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo. INGACAL, Recuperado el 15 de junio de 2018
- [25] Benner, S., Blowes, D., Gould, W., Herbert, R., & Ptacek, C. (1999). Geochemistry of a permeable reactive barrier for metals and acid mine drainage. *Environ. Sci. Technol.*,33(16), 2793-2799.
- [26] CONAGUA. (2015). *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Minatitlán (0613), Estado de Colima.* Diario Oficial de la Federación.
- [27] Consultoría e Investigación en Medio Ambiente, S.C. (2017). *ESTUDIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE LA CUBIERTA DE MATERIALES DE LA PRESA DE JALES DE PEÑA COLORADA.* Informe de Avance.
- [28] España Hoyos, C., & Serna Córdoba, M. (2016). *Impacto ambiental y social de la minería a cielo abierto con maquinaria pesada en el municipio de Condoto, departamento del Chocó, apartir del año 2000.* Trabajo de Grado Magister, Universidad de Medellín, Ciencias Sociales. Recuperado el 29 de octubre de 2018, de <https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/2986/Impacto%20ambiental%20y%20social%20de%20la%20miner%C3%ADa%20a%20cielo%20abierto%20con%20maquinaria%20pesada%20en%20el%20municipio%20de.pdf?sequence=1>
- [29] Liliana Bellotti, M. (2011). MINERÍA A CIELO ABIERTO VERSUS GLACIARES EN ALERTA ROJA EN ARGENTINA. (Rubinzal-Culzoni, Ed.) *Revista de Derecho de Daños.* Recuperado el 29 de octubre de 2018, de [http://amsacta.unibo.it/3085/1/Miner%C3%ADa\\_a\\_cielo\\_abierto.pdf](http://amsacta.unibo.it/3085/1/Miner%C3%ADa_a_cielo_abierto.pdf)
- [30] Luna Celis, L. (2011). *Evaluación de la Eficiencia de Diferentes Rocas, para el Control y Manejo del Drenaje Ácido, Producido por una Mina de Hierro.* Tesis de Maestría , UNAM, DF.

- [31] Martínez Ortiz, V. (2007). *Inventario Físico de los Recursos Minerales del Municipio Minatitlán, Estado de Colima*. Informe, Servicio Geológico Minero. Recuperado el 02 de octubre del 2018 de [https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T0607MAOV0001\\_01.PDF](https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T0607MAOV0001_01.PDF)
- [32] Miquel, C & Antoní Camprubí i, C. (2013). *Yacimientos Minerales: Los tesoros de la tierra*. Fondo de Cultura Económica.
- [33] Mota Sanchez, K. (2013). *Análisis Multitemporal para la Evaluación de Impacto Ambiental de una Mina de Hierro a Cielo Abierto*. Tesis de Maestría, UNAM, DF.
- [34] Navarro García, G. y Navarro Blaya, S. (2000). *Química Agrícola: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 488 pp.
- [35] Nuñez, I. L. (2014). *EVALUACIÓN DE UN SISTEMA BASADO EN ROCAS CALIZAS, PARA TRATAR EL DRENAJE ÁCIDO DE MINA EN EL DISTRITO MINERO DE ZIMAPÁ*, Tesis Doctoral. UNAM, D.F. Recuperado el 02 de octubre de 2018 de la base de datos TESIUNAM.
- [36] Pérez, D. C. (2013). *Evaluación de la peligrosidad de jales de zonas mineras de Nicaragua y México y alternativas de solución*. BOLETÍN DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA MEXICANA, Vol 65, Núm 3, 427-446.
- [37] S. Mitchell, W., & S. Mitchell, C. (1998). Prospeccion. En J. Mager Stellman, *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo* (p. 74.4). Chantal Dufresne, BA. Recuperado el 28 de octubre de 2018 de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/74.pdf>
- [38] Secretaria de Economía. (2013). *Perfil de Mercado del Hierro-Acero*. Coordinación General de Minería. Recuperado el 02 de octubre de 2018 de [https://www.economia.gob.mx/files/comunidad\\_negocios/industria\\_comercio/informacionSectorial/minero/pm\\_hierro\\_acero\\_1013.pdf](https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/pm_hierro_acero_1013.pdf)

- [39] Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *NORMA Oficial Mexicana, NOM-141-SEMARNAT-2003*. Recuperado el 13 de junio de 2018 de: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SEMARNAT/Normas/Oficiales/NOM-141-SEMARNAT-2003.pdf>
- [40] Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *NORMA Oficial Mexicana, NOM-157-SEMARNAT-2009*. Recuperado el 13 de junio de 2018 de <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6665/1/nom-157-semarnat-2009.pdf>
- [41] Secretario de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *NORMA Oficial Mexicana, NOM-052-SEMARNAT-2005*. Recuperado el 01 de diciembre de 2018 de [http://www.inb.unam.mx/stecnica/nom052\\_semarnat.pdf](http://www.inb.unam.mx/stecnica/nom052_semarnat.pdf)
- [42] Servicio Geológico Mexicano. (04 de octubre de 2018). *Carta Geológico-Minera Minatitlán E13-B33*. Recuperado el 04 de Octubre de 2018, de [gob.com.mx](http://gob.com.mx) "Tu gobierno en un solo punto."

## Páginas web

- [43] 911 Metallurgist. (28 de junio de 2016). *Grado de Liberacion de Particulas*. Recuperado el 30 de octubre de 2018, de 911 Metallurgist: <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/grado-de-liberacion-de-particulas/>
- [44] 911 Metallurgist. (7 de abril de 2018). *Beneficio del Mineral de Hierro*. Recuperado el 31 de octubre de 2018, de 911 Metallurgist: <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/beneficio-mineral-hierro/>
- [45] Hustrulid, W. A. (s.f.). *Encyclopedia Britannica*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2018, de Underground Mining: <https://www.britannica.com/technology/mining/Underground-mining>
- [46] Ispatguru. (03 de abril de 2014). Recuperado el 31 de octubre de 2018, de BENEficiATION OF IRON ORES: <http://ispatguru.com/beneficiation-of-iron-ores/>
- [47] Mineral Technologies. (2015). *Mineral Technologies A Downer Company*. Recuperado el 29 de octubre de 2018, de <https://mineraltechnologies.com/industrial-minerals/iron-ore>
- [48] Secretaría de Economía (08 de enero de 2018). *Minería*. Recuperado el 13 de junio de 2018, de gob.mx "Tu gobierno en un solo punto.": <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>
- [49] Servicio Geológico Mexicano. (22 de marzo de 2017). *Beneficio y transformación de minerales*. Recuperado el 30 de octubre de 2018, de gob.mx "Tu gobierno en un solo punto.": [https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones\\_geologicas/Beneficio-y-transformacion--minerales.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Beneficio-y-transformacion--minerales.html)
- [50] Servicio Geológico Mexicano. (22 de marzo de 2017). *Yacimientos minerales en México*. Recuperado el 13 de junio de 2018, de gob.com.mx "Tu gobierno en un solo punto.": [https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones\\_geologicas/Yacimiento-s-minerales-en-Mexico.htm](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Yacimiento-s-minerales-en-Mexico.htm)

[51] Servicio Geológico Mexicano. (22 de marzo de 2017). *Explotación minera*. (S. G. Mexicano, Editor) Recuperado el 29 de octubre de 2018, de gov.mx "Tu gobierno en un solo punto.": [https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones\\_geologicas/Explotacion-minera.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Explotacion-minera.html)

[52] Universidad de Buenos Aires. (2013). Recuperado el 31 de octubre de 2018, de [http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/Antiguo/2015%20-%201%20Cuatr./Problemas1\\_TrituracionyMolienda.pdf](http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/Antiguo/2015%20-%201%20Cuatr./Problemas1_TrituracionyMolienda.pdf)

## Anexos

Anexo I Parámetros Fisicoquímicos, pH y conductividad eléctrica, de la caracterización del jal.

Tabla 20 Parámetros fisicoquímicos de las muestras de jal caracterizadas.

<b>Muestra</b>	<b>pH</b>	<b>Conductividad Eléctrica</b>
A	7.81	2110
	7.85	2250
	7.86	2330
Promedio	7.84	2230
B	8.26	1525
	8.43	1554
	8.30	1567
Promedio	8.33	1549
C	8.08	556
	8.04	589
	8.11	504
Promedio	8.08	550
D	3.12	3568
	2.98	3496
	3.20	3527
Promedio	3.10	3530

## Anexo II Concentración y Porcentaje De Coeficiente De Variación De La Caracterización Por Fluorescencia De Rayos X En Modo Mina y Suelo Para Las Muestras, Blanco y Materiales De Referencia

Tabla 21 Elementos presentes en las muestras de jal analizadas por la Técnica de Fluorescencia de Rayos x en modo mina con sus respectivos controles de calidad.

Modo	Muestra	Sr, %	Sr %CV	Fe, %	Fe %CV	Mn, %	Mn %CV
Mina	A	0.028	0.002	11.003	0.103	0.164	0.013
	C	0.024	0.002	17.626	0.169	0.151	0.013
	B	0.036	0.002	12.327	0.11466667	0.138	0.012
	D	0.031	0.002	22.668	0.218	0.070	0.011
Modo	Muestra	Cr, %	Cr %CV	Ca, %	Ca %CV	Mn, %	Mn %CV
Mina	A	0.018	0.005	6.592	0.145	1825.55	123.58
	C	0.025	0.006	6.604	0.16	2247.84	170.20
	B	0.019	0.005	6.391	0.142	1616.52	124.73
	D	0.03	0.007	5.106	0.152	1318.89	169.53
Controles de Calidad							
Modo	Muestra	Sr, %	Sr %CV	Fe, %	Fe %CV	Mn, %	Mn %CV
	Blanco	< LOD	0.002	< LOD	0.006	< LOD	0.009
Mina	Montana 2711	0.018	0.002	2.601	0.034	0.037	0.009
	Montana 2710a	0.0193	0.002	3.995	0.046	0.189	0.013
Modo	Muestra	Cr, %	Cr %CV	Ca, %	Ca %CV		
	Blanco	< LOD	0.003	0.114	0.010		
Mina	Montana 2711	0.009	0.003	1.923	0.063		
	Montana 2710a	0.008	0.004	0.739	0.048		

Tabla 22 Elementos presentes en las muestras de jal analizadas por la técnica de fluorescencia de rayos x en modo suelo con sus respectivos controles de calidad.

Modo	Muestra	Ba, ppm	Ba %CV	Sb, ppm	Sb %CV	Cd, ppm	Cd %CV
Suelo	A	< LOD	41.73	< LOD	16.62	< LOD	12.49
	C	244.71	38.94	< LOD	20.12	< LOD	14.43
	B	134.43	38.72	< LOD	17.45	< LOD	13.20
	D	< LOD	46.86	< LOD	18.88	< LOD	14.41
Modo	Muestra	Ag, ppm	Ag %CV	As, ppm	As %CV	Se, ppm	Se %CV
Suelo	A	< LOD	9.71	11.45	4.32	< LOD	5.09
	C	< LOD	11.71	29.94	7.05	< LOD	7.16
	B	< LOD	10.11	11.19	4.45	< LOD	5.49
	D	< LOD	11.09	20.21	7.09	< LOD	7.95
Modo	Muestra	Pb, ppm	Pb %CV	Zn, ppm	Zn %CV	Cu, ppm	Cu %CV
Suelo	A	< LOD	7.46	177.44	17.10	267.06	25.37
	C	< LOD	11.25	203.36	22.09	448.65	37.13
	B	< LOD	7.85	115.84	15.33	237.44	25.62
	D	< LOD	13.04	128.75	20.35	197.00	32.09
Modo	Muestra	K, ppm	K %CV	Hg, ppm	Hg %CV		
Suelo	A	9319.97	396.76	< LOD	19.05		
	C	7456.71	396.57	< LOD	25.08		
	B	6310.08	330.26	< LOD	20.45		
	D	3769.31	337.02	< LOD	26.89		
<b>Controles de Calidad</b>							
Modo	Muestra	Ba	Ba %CV	Sb	Sb %CV	Cd	Cd %CV
Suelo	Blanco	< LOD	29.30	< LOD	10.94	< LOD	8.29
	Montana 2711	135.87	24.69	< LOD	13.07	25.39	6.98
	Montana 2710a	305.31	30.13	30.25	10.43	< LOD	11.44

<b>Modo</b>	<b>Muestra</b>	<b>Ag</b>	<b>Ag %CV</b>	<b>As</b>	<b>As %CV</b>	<b>Se</b>	<b>Se %CV</b>
	Blanco	< LOD	6.31	< LOD	3.21	3.44	2.99
Suelo	Montana 2711	< LOD	7.43	105.47	23.61	< LOD	5.39
	Montana 2710a	30.14	6.60	1572.21	60.65	< LOD	10.98
<b>Modo</b>	<b>Muestra</b>	<b>Pb</b>	<b>Pb %CV</b>	<b>Zn</b>	<b>Zn %CV</b>	<b>Cu</b>	<b>Cu %CV</b>
	Blanco	< LOD	4.14	< LOD	7.67	< LOD	13.77
Suelo	Montana 2711	1308.84	30.59	365.41	18.52	96.74	15.15
	Montana 2710a	5092.39	71.49	3970.24	69.75	2841.46	65.08
<b>Modo</b>	<b>Muestra</b>	<b>K</b>	<b>K %CV</b>	<b>Hg</b>	<b>Hg %CV</b>	<b>S</b>	<b>S %CV</b>
	Blanco	-	-	< LOD	10.88	-	-
Suelo	Montana 2711	-	-	< LOD	15.52	-	-
	Montana 2710a	-	-	< LOD	26.48	-	-

Tabla 23 Error porcentual calculado a partir de los valores de los certificados para cada material de referencia.

Material de Referencia <sup>a</sup>	Sr, ppm	Fe, %	Mn, %	Cr, ppm	Ca, %	Ba, ppm	Sb, ppm	Cd, ppm
Montana 2711	245.3	2.89		47	2.88	726	19.4	-
Error Porcentual, % <sup>b</sup>	-26.62	-10.00	-	98.58	-33.22	-81.29	-100.00	-
Montana 2710a	255	4.32	0.214	23	0.964	792	52.5	12.3
Error Porcentual, %	-24.18	-7.52	-11.68	262.32	-23.34	-61.45	-42.37	-100.00
Material de Referencia	Ag, ppm	As, ppm	Se, ppm	Pb, %	Zn, ppm	Cu, ppm	K, %	Hg, ppm
Montana 2711	4.63	105	1.52	-	350.4	114	2.45	6.25
Error Porcentual, %	-100.00	0.45	-100.00	-	4.29	-15.13	-100.00	-100.00
Montana 2710a	40	1540	1	5520	4180	3420	2.17	9.88
Error Porcentual, %	-24.65	2.09	-100.00	-7.75	-5.02	-16.92	-100.00	-100.00

**Nota:**

a El valor de los materiales de referencia se recuperó de sus certificados, NIST SRM-2711 Montana Soil y Standard Reference Material® 2710<sup>a</sup> Montana I Soil respectivamente.

b El error porcentual se calculó realizando el siguiente algoritmo:  $(\text{valor obtenido} - \text{valor del certificado}) * 100 / \text{valor del certificado}$

## Anexo III Concentración e Incertidumbre De Azufre Total Por Método LECO

Tabla 24 Concentración de Azufre total presente en las muestras de jal obtenido por el método LECO.

<b>Elemento</b>	<b>S%(p/p)</b>
LDD (% p/p)	0.03
LDC (% p/p)	0.07
Incertidumbre expandida en un nivel de concentraciones de S de 2.25% (U), k=2	0.09
Muestra	S% (p/p)
A	3.9
B	6.1
C	2.7
D	9.1

# Anexo IV Difractogramas De Las Especies Mineralógicas En Mayor Proporción Presentes En Las Muestras Analizadas Por Medio De La Técnica de Difracción de Rayos X

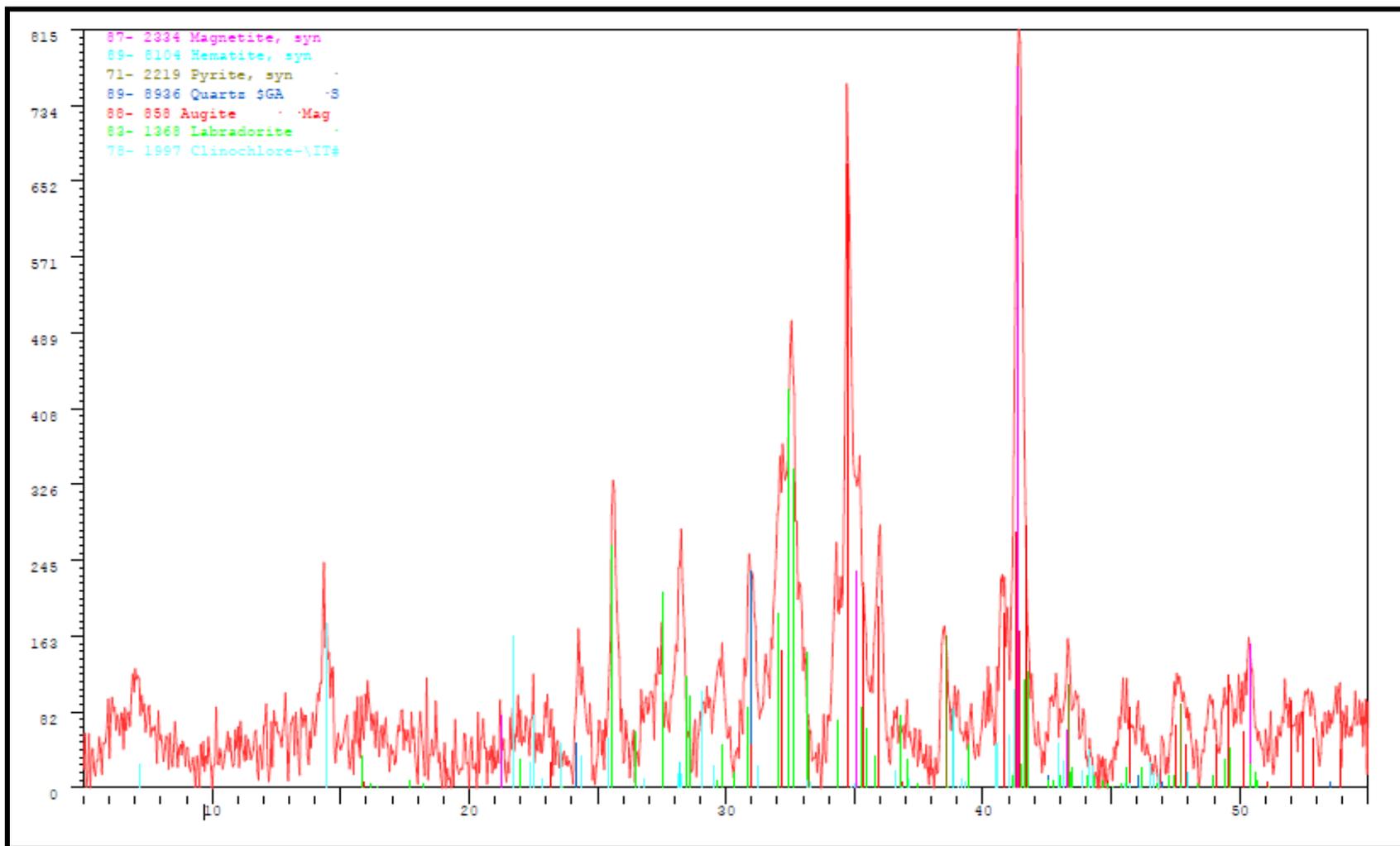


Figura 49 Difractograma para la muestra A. cuentas por segundo en función de 2 veces el ángulo de difracción.

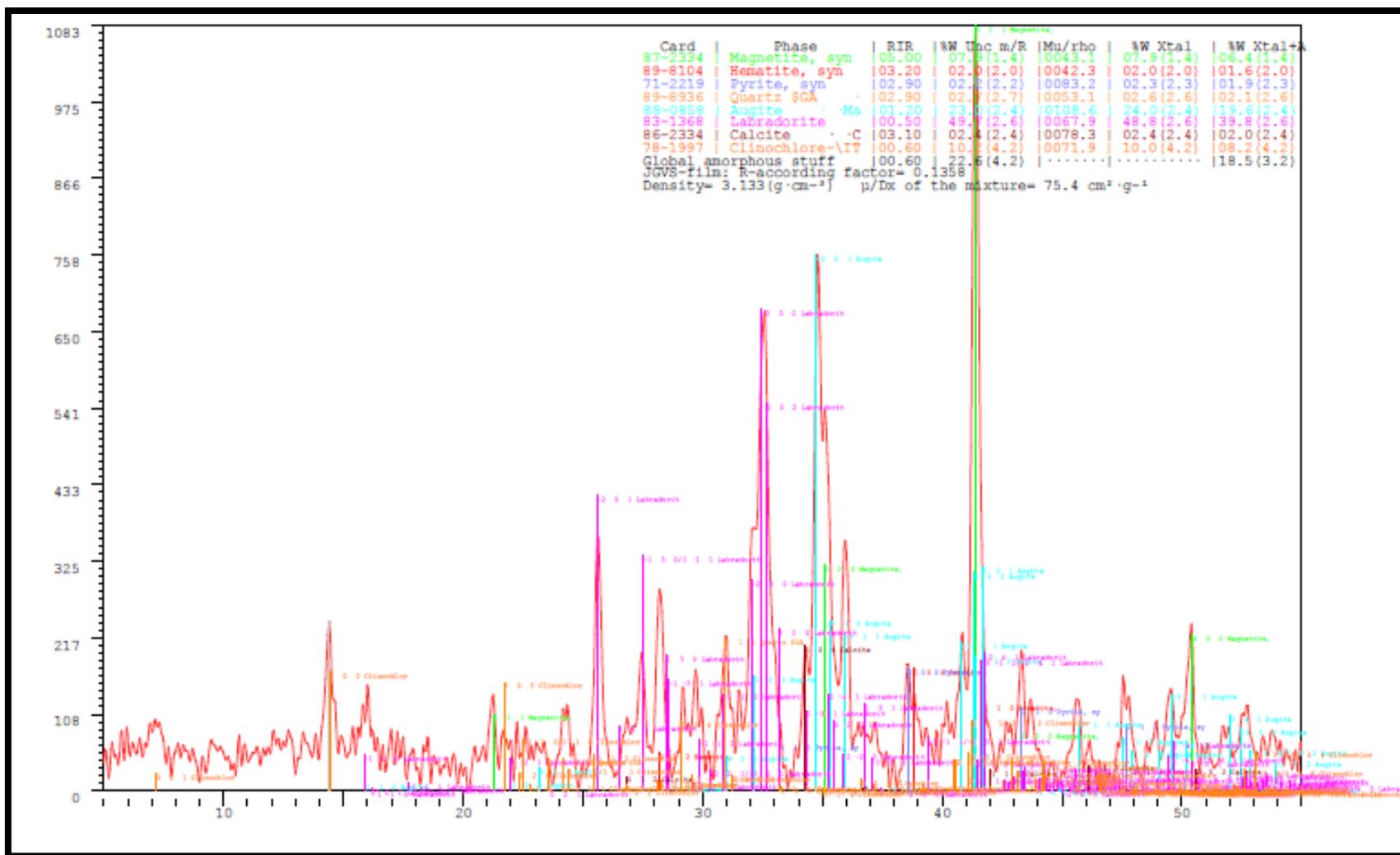


Figura 50 Difractograma para la muestra B, cuentas por segundo en función de 2 veces el ángulo de difracción

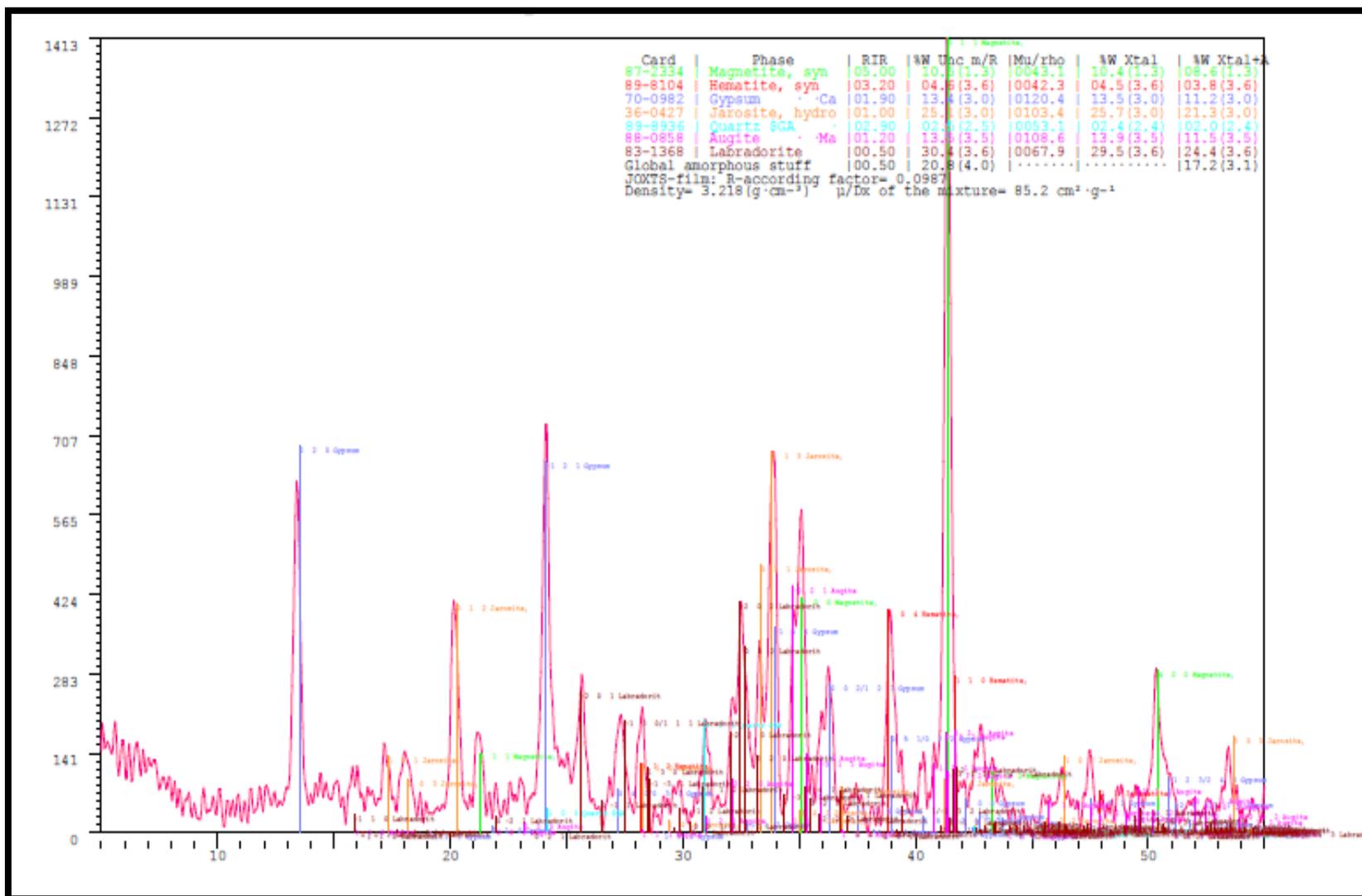


Figura 51 Difractograma para la muestra C, cuentas por segundo en función de 2 veces el ángulo de difracción.

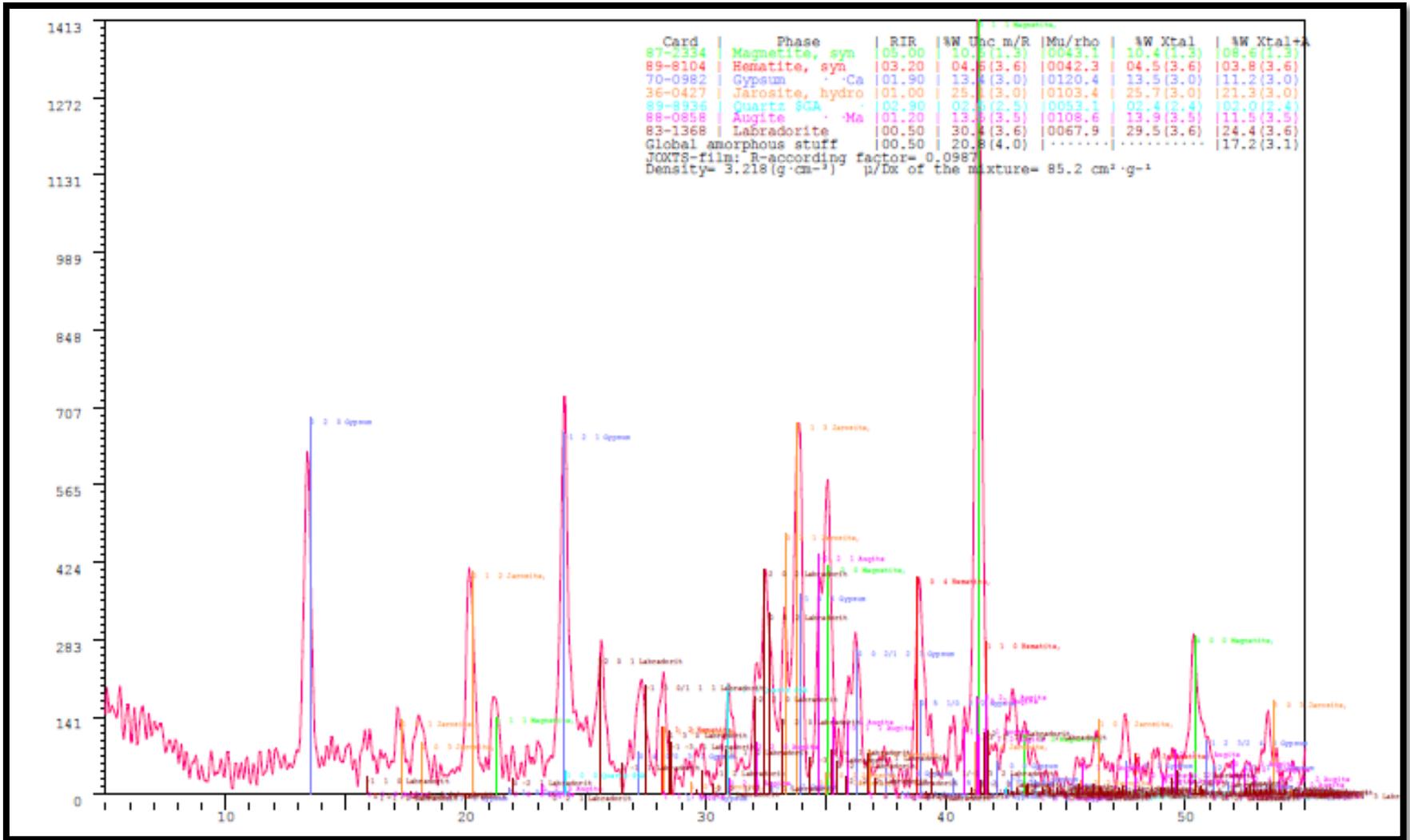


Figura 52 Difractograma para la muestra D, cuentas por segundo en función de 2 veces el ángulo de difracción.

## Anexo V Datos de pH, Conductividad eléctrica y Concentración de Sulfatos De Los Lixiviados y pH y Conductividad eléctrica Superficial Obtenidos Del Seguimiento de las Celdas de Observación

Tabla 25 Datos De pH, Conductividad eléctrica y Concentración de Sulfatos de los Lixiviados Obtenidos del Seguimiento De Las Celdas De Observación Para Las Pruebas De Oxidación.

Fecha	23-sep-17	30-sep-17	07-oct-17	14-oct-17	21-oct-17	28-oct-17	28-nov-17	28-dic-17	28-ene-18	28-feb-18	28-mar-18	28-abr-18	28-may-18	28-jun-18	28-jul-18	28-ago-18
Días	0	7	14	21	28	35	65	95	125	155	185	215	245	275	305	335
Valor límite pH	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Valor límite CE	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800
Valor límite SO4	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Celda	OXI-V-Te															
Parámetro	pH															
Espesor 20 cm		8	8	8	8	8	7	8	8	8	8	8	7	8		8
Espesor 40 cm		8	8	8	8	7	8	8	8	7	8	8	7	8		7
Espesor 60 cm		8	8	8	8	8	8	8	8	7	8	8	7	8		7
Parámetro	CE															
Espesor 20 cm		2840	2860	2900	2874	2795	2680	2714	2450	2517	2600	2550	2500	2250		2410
Espesor 40 cm		2903	2856	2750	2930	2740	2800	2910	2824	2600	2740	2810	2700	2400		2520
Espesor 60 cm		2800	2780	2650	2690	2800	2750	2700	2850	2900	2800	2840	2610	2330		2460
Parámetro	Sulfatos															
Espesor 20 cm		1493	1681	1237	1375	1384	1721	1216	1380	1294	1392	1793	1483	1227		1339
Espesor 40 cm		1727	1787	1660	1227	1756	1390	1688	1712	1432	1344	2006	1428	1563		1633

Espesor 60 cm		1650	1665	1511	1573	1278	1548	1764	1700	1549	1388	1899	1597	1357	1447
Celda	OXI-V- CR														
Parámetro		pH													
Espesor 20 cm		8	7	7	7	6	7	6	6	4	4	3	3	3	3
Espesor 40 cm		8	7	7	6	7	8	7	6	4	3	3	5	3	3
Espesor 60 cm		7	7	7	7	7	8	7	7	8	8	6	7	8	8
Parámetro		CE													
Espesor 20 cm		399	2650	2480	2900	3000	2350	2550	2480	2820	2300	3733	2770	2460	2830
Espesor 40 cm		2740	2600	2740	2800	2840	2740	2500	2800	2930	2940	3950	3160	3360	3190
Espesor 60 cm		762	2650	2640	2500	2740	2680	2700	2350	2690	2780	2540	2880	2570	2740
Parámetro		Sulfatos													
Espesor 20 cm		2411	2357	1943	2019	1678	1798	1932	2001	1864	1874	2339	1877	1574	1690
Espesor 40 cm		2907	2751	1659	1800	2011	2056	1983	1993	2120	2021	2818	2165	2108	2216
Espesor 60 cm		1697	1809	1795	2040	1675	1436	1455	1302	1450	1605	1669	1763	1473	1690
Celda	OXI-V-Ca														
Parámetro		pH													
Espesor 20 cm		8	8	8	8	7	4	4	4	5	3	3	3	3	4
Espesor 40 cm		7	8	7	7	7	3	4	7	5	7	6	6	7	4
Espesor 60 cm		7	7	7	8	8	8	7	7	7	7	7	7	8	8
Parámetro		CE													
Espesor 20 cm		2920	2750	2830	2745	2700	3470	2900	3450	3350	3600	3890	3002	3390	3030
Espesor 40 cm		1076	2700	2490	2650	2750	2740	2640	2870	2600	2350	2150	2860	2640	3040

Espesor 60 cm		1402	2300	2450	2320	2600	2620	2580	2365	2657	2406	2288	3000	2520	2660
Parámetro	Sulfatos														
Espesor 20 cm		1830	1980	1763	1983	1437	1559	2358	2904	2981	2507	2693	2281	2365	2686
Espesor 40 cm		1366	1563	1984	1728	1603	1992	1743	1547	1643	1826	1341	1870	1605	1916
Espesor 60 cm		1703	1725	1504	1603	1764	1784	1770	1946	1336	1311	1787	1963	1396	1515
Celda	OXI-T-Te														
Parámetro	pH														
Espesor 60 cm		8.2					7.85			7.72	7.5	8.03	7.02		
Parámetro	CE														
Espesor 60 cm		1403					2440			2350	2490	2940	3040		
Parámetro	Sulfatos														
Espesor 60 cm		177.70					1878.05			1816.17	1894.65	1926.31	1781.15		
Celda	OXI-T-CR														
Parámetro	pH														
Espesor 60 cm		8.18					7.9			7.88	7.96	7.79	7.06		
Parámetro	CE														
Espesor 60 cm		424					2500			2630	2640	2950	3100		
Parámetro	Sulfatos														
Espesor 60 cm		174.60					1671.07			2029.13	2260.77	1908.69	1993.41		
Celda	OXI-T-Ca														
Parámetro	pH														
Espesor 60 cm		7.42					7.81			7.66	7.9	8.15	7.06		
Parámetro	CE														
Espesor 60 cm		2860					2740			2750	2670	2310			

---

Parámetro	Sulfatos							
	156.287	1970.45	1893.90	2002.22	2029.66	2399.49	156.287	
Espesor 60 cm	5	8	2	3	3	2	5	

---

Tabla 26 Datos De pH y Conductividad eléctrica Obtenidos Del Seguimiento De Las Celdas De Observación Para Las Pruebas De Salinidad.

Fecha	23-sep-17	26-sep-17	29-sep-17	03-oct-17	12-oct-17	18-oct-17	23-oct-17	26-oct-17	01-nov-17	02-nov-17	08-nov-17	27-nov-17	08-feb-18	14-feb-18	21-feb-18	23-feb-18	28-feb-18	02-mar-18	06-mar-18	13-mar-18	15-mar-18	24-abr-18	24-may-18	22-jun-18	16-ago-18
Días	0	3	6	10	19	25	30	33	39	40	46	65	138	144	151	1515	1515	160	164	171	173	213	243	272	327
Valor límite pH	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Valor límite CE	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800
Celda	SAL-V-Te																								
Parámetro	pH																								
Espesor 20 cm	9.44	8.02	9.41	9	8.93	9.02	8.72	8.85	8.86	7.55	8.48	6.98	8.93	9.25	9.22	8.05	8.67	8.97	8.18	6.88	7.5	8.6	7.3	7.5	8.6
Espesor 40 cm	9.47	8.07	9.43	9.02	8.94	9.09	9.15	8.75	9.19	8.25	8.79	7.75	8.94	9.5	9.95	8.56	8.27	8.98	8.32	7.03	7.56	8.3	7.9	8	8.6
Espesor 60 cm	9.58	7.65	9.18	8.88	8.83	8.55	9.35	8.83	8.98.9	8.38.3	8.31	7.89	8.68	8.93	9.32	8.58	7.58	8.78	7.71	7.77	7.37	9	7.8	8.3	8.4
Parámetro	CE																								
Espesor 20 cm	93.8	271	131.6	132.7	105.5	88.5	143	203	70.4	113.3	123.6	173.8	295	381	233	228	179.1	252	591	1400	1090	179	1000	605	129
Espesor 40 cm	95.1	427	92.3	96.5	138.3	76.2	94.2	164.4	58	81.3	76.5	76.9	238	250	197.3	550	115.6	230	298	680	450	370	500	410	127
Espesor 60 cm	72.3	275	61.1	71.1	70.1	40.9	28.6	36.8	29.2	35.8	41	51.9	232	231	104.3	53.6	105.4	210	112	140	170	588	100	180	66
Celda	SAL-V-CR																								
Parámetro	pH																								
Espesor 20 cm	7.84	7.46	7.58	7.85	7.37.3	7.57.5	7.22	7.67.6	8.69	7.54	8.16	6.98	8.23	8.34	8.81	7.97	8.99	9.04	8.44	7.19	7.32	7.7	7.2	7.2	7.6
Espesor 40 cm	8.06	7.48	7.91	7.72	7.93	7.69	8.45	8.66	8.38.3	8.07	8.37	7.75	8.88.8	8.39	9.39.3	8.34	8.46	8.88	8.34	7.23	7.51	7.8	7.8	7.3	7.6
Espesor 60 cm	8.18	7.55	8.04	7.92	8.22	8.04	7.56	7.37.3	7.82	8.11	8.18.1	7.89	8.77	8.12	9.22	7.68	7.82	8.69	7.63	7.27	7.07	7.9	7.7	7.7	8
Parámetro	CE																								

Espesor 20 cm	62.7	27 4	54. 9	68. 6	59. 2	50. 7	42. 1	34. 5	24. 2	28. 1	36. 2	49. 1	23 7	24 0	20 5	12 4.6	10 3.8	22 9	17 9.2	29 0	31 0	17 9	43 0	32 0	57
Espesor 40 cm	52.4	26 9	64. 5	60. 9	77. 7	35	30. 4	43. 1	24. 3	30. 6	44. 6	47	24 2	28 0	12 8.2	10 0.2	13 1.3	22 4	21 6	40 0	50 0	37 0	40 0	36 6	59
Espesor 60 cm	56.4	39 7	70. 6	66. 3	58. 8	39. 9	88. 7	86	72. 8	48. 4	20 3	76. 4	24 9	40 5	13 8.3	15 9	11 3.9	23 8	23 7	57 0	78 0	58 8	10 50	80 0	61
Celda Parámetro	SAL- V-Ca pH																								
Espesor 20 cm	7.87	7.4 1	7.8 8	7.6 1	7.0 9	8.3	7.6 7	7.2 5	8.2 5	7.4 9	7.6 2	6.5 5	7.3 5	7.5 9	8.4 8	7.6 6	8.1 7	8.3 1	7.8 2	6.2 3	6.4	7.2	7.3	7.1	7.4
Espesor 40 cm	8.56	7.5 1	8.7 1	8.5 2	8.4 5	8.6 6	7.6 8	7.7 3	8.3 6	7.9 1	8.6 9	8.0 3	8.8 7	8.2 7	9.2 6	8.3 7	7.8 5	8.5 4	7.8 9	6.8 8	7.5 3	7.8	7.4	7.5	8.1
Espesor 60 cm	8.67	6.9 8	8.3 6	8.3 6	8.6	7.6 1	7.7 7	7.4 4	7.7	7.1 9	8.3 8	7.9 8	8.7 4	8.2 2	9.1 7	7.4 4	7.5 4	8.1 4	7.4 3	6.9 4	7.0 7	7.9	7.5	7.5	8.1
Celda Parámetro	CE																								
Espesor 20 cm	62.2	27 3	59. 8	68. 9	68. 5	47. 6	47. 5	11 0.6	32. 2	11 1	11 9.8	40 0	69 5	12 52	16 16	69 4	20 7	77 2	14 71	32 40	16 30	35 5	15 00	20 10	75
Espesor 40 cm	61.2	27 2	11 3.5	79. 1	75. 1	56. 9	48. 6	36. 5	34	42. 5	50. 8	58. 7	41 8	15 15	37 2	24 2	63 6	34 3	12 97	40 50	34 80	11 64	80 0	15 00	66
Espesor 60 cm	60.4	27 9	10 9.5	11 6.9	68. 8	61. 3	11 2.5	80. 3	11 1	10 8.4	22 5	16 8.1	46 1	91 4	10 67	78 8	31 5	60 9	15 38	17 00	29 00	19 74	20 00	10 30	12 4
Celda Parámetro	SAL- T-Te pH																								
Espesor 20 cm	9.37	7.8	9.1 8	8.9 2	8.6 3	8.9 7	8.5 7	8.6 4	9.1 3	8.0 5	8.6	8	7.9 6	8.7 9	8.3	8.5 7	7.7 6	7.7 7	7.5 3	8.4 9	8.5 2	7.1 8	7.7 3	7.9	7.2
Espesor 40 cm	8.95	6.1 4	8.4	7.8	7.9 6	8.2 3	7.9 4	7.5 7	8.0 2	7.4 6	7.7 2	7.6 8	6.4 3	7.9 6	7.7 4	8.2 1	7.9 7	7.4 2	7.1 2	8.3 3	8.4 3	7.0 9	7.3 2	7.9	7.5
Espesor 60 cm	9.49	6.2 5	8.7 5	8.0 5	8.4 7	8.8 7	8.2	7.5 1	8.0 8	7.0 2	7.7 6	7.6 1	7.6 6	8.9 6	7.6	8.2 8	7.0 1	7.1 7	6.8 6	8.0 5	8.0 1	6.4 5	7.1 9	7.9	6.5
Celda Parámetro	CE																								
Espesor 20 cm	94.2	26 4	11 2.2	10 5.1	71. 6	11 9	79. 9	53. 5	61. 7	94. 7	64. 5	56. 7	95. 8	53. 9	24 2	30 2	24 7	11 8.1	19 7.3	27 2	34 7	58 0	46 0	50 7	29 4
Espesor 40 cm	146.5	24 5	89. 3	74	10 9.8	95. 5	74. 2	58. 2	47. 8	98. 1	64. 4	40. 7	16 8	53. 4	44 0	36 8	37 4	12 5.5	14 5.9	27 0	22 4	20 0	24 0	34 5	58 0

Espesor 60 cm	85.7	25 8	14 5.3	78. 4	65. 8	12 0.9	54. 7	68. 4	11 7.7	94. 6	44. 8	63. 8	49. 5	80. 13	57 2	23 2	49 2	28 0	13 2.7	27 7	45 5	22 0	50 0	49 8	
Celda	SAL-T-CR																								
Parámetro	pH																								
Espesor 20 cm	9.37	7.8	9.1 8	8.9 2	8.6 3	8.9 7	8.5 7	8.6 4	9.1 3	8.0 5	8.6	8	7.9 6	8.7 9	8.3	8.5 7	7.7 6	7.7 7	7.5 3	8.4 9	8.5 2	7.1 8	7.7 3	7.9	7.2
Espesor 40 cm	8.95	6.1 4	8.4	7.8	7.9 6	8.2 3	7.9 4	7.5 7	8.0 2	7.4 6	7.7 2	7.6 8	6.4 3	7.9 6	7.7 4	8.2 1	7.9 7	7.4 2	7.1 2	8.3 3	8.4 3	7.0 9	7.3 2	7.9	7.5
Espesor 60 cm	9.49	6.2 5	8.7 5	8.0 5	8.4 7	8.8 7	8.2	7.5 1	8.0 8	7.0 2	7.7 6	7.6 1	7.6 6	8.9 6	7.6	8.2 8	7.0 1	7.1 7	6.8 6	8.0 5	8.0 1	6.4 5	7.1 9	7.9	6.5
Parámetro	CE																								
Espesor 20 cm	94.2	26 4	11 2.2	10 5.1	71. 6	11 9	79. 9	53. 5	61. 7	94. 7	64. 5	56. 7	95. 8	53. 9	24 2	30 2	24 7	11 8.1	19 7.3	27 2	34 7	58 0	46 0	50 7	29 4
Espesor 40 cm	146.5	24 5	89. 3	74	10 9.8	95. 5	74. 2	58. 2	47. 8	98. 1	64. 4	40. 7	16 8	53. 4	44 0	36 8	37 4	12 5.5	14 5.9	27 0	22 4	20 0	24 0	34 5	58 0
Espesor 60 cm	85.7	25 8	14 5.3	78. 4	65. 8	12 0.9	54. 7	68. 4	11 7.7	94. 6	44. 8	63. 8	49. 5	80. 13	57 2	23 2	49 2	28 0	13 2.7	27 7	45 5	22 0	50 0	49 8	
Celda	SAL-T-Ca																								
Parámetro	pH																								
Espesor 20 cm	7.75	7.8	7.4 2	7.2 7	6.9 2	7.0 6	7.0 8	7.2 9	8.3 1	6.5 2	7.7 9	7.1 9	7.1 2	7.3 3	4.9 7	4.0 2	3.6 4	3.9	5.8 2	6.0 4	3.0 6	2.5 3	2.6 4	3.9	2.5
Espesor 40 cm	7	6.1 4	6.6 2	6.8	5.4 3	5.8 8	6.3 9	7.2 7	7.6 1	6.4 2	7.4 8	6.8 8	6.7 3	7.2	7.8 9	7.5	7.7	5.7 8	7.6	6.8 1	7.6 7	5.3 7	6.2 9	2.4	3.1
Espesor 60 cm	7.42	6.2 5	6.4 4	6.8 4	6.1 6	5.7	6.7 1	7.0 6	8.3 9	6.8 4	7.5 4	7.1	6.5 6	7.0 4	7.3	7.2 5	6.0 2	4.1 1	8.0 8	6.1 4	8.2 3	4.6	4.8 5	2.4	3.8
Parámetro	CE																								
Espesor 20 cm	57.2	26 4	57. 4	64. 3	28. 6	44. 5	43. 1	40. 4	21. 5	19. 4	21. 2	26. 4	33. 5	30. 1	37 2	10 95	11 78	63 0	25 8	29 7	24 00	30 30	26 40	27 30	31 60
Espesor 40 cm	42.9	24 5	49. 7	56. 5	34. 7	43. 6	46. 1	53. 9	25. 6	36. 1	27. 2	26. 6	50. 9	34. 3	38 7	40 2	64 1	38 3	39 0	46 0	66 0	15 40	98 0	29 90	28 00
Espesor 60 cm	50	25 8	53. 1	63	38. 7	50. 5	58. 8	52. 3	24. 1	20. 8	28	40. 2	11 6.4	51. 2	29 5	61 2	13 64	15 29	11 8.1	23 0	24 8	48 1	44 75	67 20	30 00