



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PRUEBAS ESTÁTICAS Y CINÉTICAS PARA  
VALUAR PELIGROSIDAD DE JALES

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO DE MINAS Y METALURGIA

PRESENTA:

FLORES MENDOZA JORGE ALBERTO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. FRANCISCO MARTIN ROMERO



MÉXICO DF, AGOSTO 2013



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.

## DEDICATORIA

*A mi madre, quien siempre me ha apoyado en todo momento no importando cual difícil sea la circunstancia, esta tesis también es parte de tu logro y los que vendrán en el futuro. Gracias por todo.*

<b>ÍNDICE</b>	<b>Página</b>
<b>ABSTRACT</b>	6
<b>RESUMEN</b>	8
<b>I INTRODUCCIÓN</b>	7
<b>II ASPECTOS GEOGRÁFICOS Y GEOLÓGICO MINEROS</b>	10
2.1 Localización de los sitios de estudio: Jales de Tizapa y Charcas	10
2.2 Características de la Unidad Minera Tizapa	10
2.2.1 Localización	10
2.2.2 Clima	12
2.2.3 Orografía	12
2.2.4 Hidrología	12
2.2.5 Geología local	12
2.2.6 Yacimiento mineral	13
2.2.7 Hidrogeología	15
2.2.8 Antecedentes de estudios ambientales	15
2.3 Características de la Unidad Minera Charcas	18
2.3.1 Localización	18
2.3.2 Clima	19
2.3.3 Orografía	19
2.3.4 Hidrología	20
2.3.5 Geología local	20
2.3.6 Yacimiento mineral	21
2.3.7 Hidrogeología	21

<b>ÍNDICE</b>	<b>Página</b>
2.3.8 Antecedentes de estudios ambientales	21
<b>III ASPECTOS TEÓRICOS</b>	<b>24</b>
3.1 Jales	24
3.1.1 Generalidades	24
3.1.2 Presa de jales	25
3.2 Drenaje ácido de mina	26
3.3 Procesos geoquímicos que ocurren en los jales	28
3.3.1 Oxidación	28
3.3.2 Neutralización	29
3.4 Pruebas utilizadas para valorar y/o predecir el drenaje ácido de minas en jales	30
3.4.1 Pruebas de extracción	31
3.4.2 Pruebas estáticas	31
3.4.3 Pruebas cinéticas	33
3.5 Valoración y/o predicción del drenaje ácido de minas de jales en México	33
<b>IV METODOLOGÍA</b>	<b>35</b>
4.1 Selección de muestras de jales	35
4.1.1 Muestras de los jales de Tizapa	35
4.1.2 Muestras de los jales de Charcas	36
4.2 Pruebas cinéticas	36
4.2.1 Diseño experimental de las celdas	36
4.2.2 Armado de las celdas de humedad	37

<b>ÍNDICE</b>	<b>Página</b>
4.2.3 Comienzo del proceso de 20 semanas de las celdas de humedad	38
4.3 Análisis de lixiviados de las celdas de humedad	39
<b>V RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>41</b>
5.1 Jales de Tizapa	41
5.1.1 Celda JTZ1	41
5.1.2 Celda JTZ 6	45
5.1.3 Celda JTZ 11	50
5.1.4 Discusión de los resultados de las pruebas cinéticas de celdas húmedas en los jales Tizapa	53
5.2 Jales de Charcas	59
5.2.1 Celda JCH III	59
5.2.2 Celda JCH VII	63
5.2.3 Celda JCH X	67
5.2.4 Celda JCH VB	71
5.2.5 Discusión de los resultados de las pruebas cinéticas de celdas húmedas en los jales Charcas	74
<b>VI CONCLUSIONES</b>	<b>81</b>
<b>VII BIBLIOGRAFIA</b>	<b>84</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>87</b>

## ABSTRACT

We studied the tailings derived from exploitation of two different ore deposits, a Skarn from Charcas, San Luis Potosí and a Volcanogenic massive sulfide from Tizapa, Estado de México.

Previous studies indicate that tailings from both sites are characterized by high concentrations of arsenic (up to 2562 mg / kg), lead (up to 3043 mg / kg), cadmium (up to 1716 mg / kg), copper (up to 6326 mg / kg) and zinc (up to 80632 mg / kg). Also, it is reported that these tailings are not generating acid drainage (AD), in the present; but static test results from acid-base balance (ABA) allows to predict that Tizapa tailings will generate AD in the future, and conversely the tailings from Charcas will not. However, this static tests, does not allow to predict the content of dissolved potentially toxic elements (PTE) in water drainage.

This research was performed in order to corroborate the results of the static tests and predict drainage quality in the future. We selected three samples from Tizapa and four samples from Charcas for the accelerated weathering kinetic tests (humidity cells) to simulate the natural oxidation process, for 20 weeks, under controlled laboratory conditions.

Kinetic tests results, allow corroborating the results of ABA in two samples from Tizapa and in all four samples from Charcas.

According to the results of ABA test, in 2 samples from Tizapa, the ratio of AP/PN are lower than 1 (AP/PN varied between 0.021 and 0.029), indicating that the acid potential (AP) is higher than the neutralization potential (NP), which was corroborated by kinetic tests results, which indicated that the pH values in the samples decreased from 6.4 to 2.9 and from 6.36 to 3.92. However, in one sample from Tizapa, humidity cells results do not support the ABA results. According to ABA results, the ratio AP/PN is less than 1 (PA / PN = 0.051), However, humidity cell results indicate that the pH values are nearly neutral (pH = 7.63) and during the 20 weeks testing, conditions were maintained close to neutrality and even increased pH slightly to 8.33.

In the four samples from Charcas, the ratio AP/PN is greater than 1 (values varied between 2.4 and 9.3), which indicates that the acidity potential (AP) is much lesser than the neutralization potential, which was corroborated by with kinetic tests results and during the 20 weeks testing, conditions were maintained practically neutral and slightly basic (pH between 6.85 and 9.01).

The acidity generated in humidity cells, can be explained by pyrite oxidation, and in those that did not generate acid, it is due to minerals dissolution such as calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), that according to several authors is the main neutralizing mineral that consume the acidity generate by oxidation of sulfide metals

It is important to highlight that this study provide evidence of the important role, in neutralization process, of wollastonite ( $\text{CaSiO}_3$ ) and plagioclase  $[(\text{Na}, \text{Ca}) \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$  that has been little reported in the literature.

On the other hand, this study allows predicting that acidic leachates will be characterized by high dissolved concentrations of heavy metals, arsenic and sulfates, but more importantly is that allows to predict that the near neutral leachates will contain high dissolved concentrations of Zn, Cd and Si, indicating that the neutral drainage involves an environmental problem which has not been considered in previous studies performed in Mexico.

Finally we can conclude that humidity cells (kinetic tests) results, indicate that ABA static tests are not sufficient for the evaluation of tailings derived from massive sulfide deposits, due to tests only considers to carbonates as neutralizing minerals, which is insufficient when the samples contain sufficient quantity of another alkaline minerals, to consume the acid generated as in the case of Tizapa sample, where plagioclase plays the lead role as neutralizing mineral.



## RESUMEN

Para realizar este estudio se seleccionaron jales que provienen de la explotación dos tipos de yacimientos minerales en las zonas mineras de Tizapa, Estado de México y Charcas, San Luis Potosí. En Tizapa se ha explotado un yacimiento del tipo "sulfuro masivo vulcanogenético", mientras que en Charcas un depósito del tipo "skarn".

Estudios previos indican que los jales de ambos sitios se caracterizan por las altas concentraciones de arsénico (hasta 2562 mg/kg), plomo (hasta 3043 mg/kg), cadmio (hasta 1716 mg/kg), cobre (hasta 6326 mg/kg) y zinc (hasta 80632 mg/kg). Así mismo, se reporta que actualmente estos jales no son generadores de drenaje ácido (DA), pero resultados de pruebas estáticas de balance ácido-base (BAB) permiten pronosticar que los jales de Tizapa serán generadores de DA, en el futuro, pero los jales de Charcas, no; sin embargo esta pruebas no permiten pronosticar el contenido de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) disueltos en el agua del drenaje.

Se realizó la presente investigación con el fin de corroborar los resultados de las pruebas estáticas y pronosticar la calidad del drenaje, en el futuro, para lo cual los jales de estudio se sometieron a pruebas cinéticas de intemperismo acelerado (celdas húmedas) que permite simular el proceso de oxidación natural, durante 20 semanas, bajo condiciones controladas de laboratorio.

Los resultados de las pruebas cinéticas permitieron corroborar los resultados de las pruebas de BAB; en 2 de las muestras de jales de Tizapa (de un total de 3) y en las 4 muestras de los jales de Charcas (de un total de 4).

De acuerdo a los resultados de la prueba estática de BAB, en las 2 muestras de jales de Tizapa, los valores de la relación PA/PN son muy inferiores a 1 (PA/PN varió entre 0.021 y 0.029) lo que indica que el potencial de acidez es mucho mayor que el de neutralización; lo que fue corroborado con los resultados de la prueba cinética, ya que en el periodo de 20 semanas de prueba, los valores de pH en las muestras disminuyeron de 6.4 hasta 2.9 y de 6.36 hasta 3.92.

Sin embargo, en 1 de las muestras de jales de Tizapa, los resultados de celdas húmedas no corroboran los resultados de BAB. De acuerdo a los resultados de la prueba de BAB, la relación PA/PN es muy inferior a 1 (PA/PN = 0.051) que indica que el potencial de acidez es mucho mayor que el de neutralización. Sin embargo, los resultados de celdas húmedas indican lo contrario; ya al inicio de la prueba los valores de pH son prácticamente neutros (pH = 7.63) y durante las 20 semanas de pruebas se mantuvieron las condiciones cercanas a la neutralidad e incluso aumentaron ligeramente hasta alcanzar un pH, al final de la prueba, de 8.33.

En las 4 muestras de los jales de Charcas los valores de la relación PA/PN fueron superiores a 1 (PA/PN varió entre 2.4 y 9.3); lo que indica que el potencial de acidez es mucho menor que el de neutralización; lo que fue corroborado con los resultados de la prueba cinética, ya que desde el inicio de la prueba y hasta el final de la misma, los valores de pH en estas muestras se mantuvieron prácticamente neutros y ligeramente básicos (pH entre 6.85 y 9.01).

La acidez generada durante la prueba cinéticas de celdas húmedas se explica por la oxidación de la pirita; y en los jales que resultaron NO ser generadores acidez se explica por la disolución de minerales como la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), que es el principal mineral neutralizador, que impide la generación de drenaje ácido en los jales de minas.

Sin embargo, es importante destacar que en este estudio se aportan evidencia del papel neutralizador de la wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ) y la plagioclasa  $[(\text{Na,Ca})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ , a los que se les ha dado importancia y ha sido poco reportado en la literatura.

Por otro lado, el estudio permitió pronosticar que los lixiviados de los jales que serán generadores de acidez estarán enriquecidos en sulfatos, metales pesados y arsénico disueltos; pero lo más importante es que permite pronosticar que los lixiviados de los jales que NO serán generadores de acidez contendrán Zn, Cd y Si disueltos, lo que indica que el drenaje neutro implica un problema ambiental que no ha sido considerado en los estudios de jales, realizados en México.

Finalmente podemos concluir que los resultados de las pruebas cinéticas de celdas húmedas indican que las pruebas estáticas de balance ácido-base (BAB) no son suficientes para la valoración de la peligrosidad de los jales que provienen de yacimientos del tipo sulfuros masivos, lo que se debe a que la prueba BAB solo considera el papel de los carbonatos para el potencial de neutralización, lo que es insuficiente cuando en las muestras existen otros minerales alcalinos en cantidad suficiente para consumir la acidez generada como es el caso de una muestra de Tizapa, donde la plagioclasa juega el papel principal como mineral neutralizador, como lo demostraron los resultados de las pruebas cinéticas de celdas húmedas realizadas.

## I INTRODUCCIÓN

El manejo adecuado de residuos mineros es un tema que empezó a tomar importancia en México a partir de la década de los noventa con el Programa Nacional de Modernización de la Minería, también se publicó la nueva Ley Minera (1992) y su Reglamento (1993), respectivamente, así como el Manual de Servicios al Público en Materia Minera. Después en la siguiente década, se crea el Convenio de Concertación en Materia Ecológica para la Industria Minera Nacional, en donde se estipula el manejo de los residuos mineros, en particular en lo que respecta a su depósito en presas de jales.

En el 2004 se publicó la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales. A partir de la publicación de esta NOM, los generadores de jales tienen la obligación de realizar los estudios necesarios para depositarlos en presas diseñadas para reducir el riesgo al medio ambiente.

Por lo anteriormente expuesto, en la actualidad la industria minera está trabajando para cumplir con su responsabilidad social y ambiental con el fin de generar el menor impacto posible asociado a las operaciones mineras, especialmente al manejo de sus residuos y los jales. Sin embargo, históricamente, los jales generados fueron depositados en los alrededores de las minas sin ninguna consideración ambiental, convirtiéndose en fuentes potenciales de contaminación por la posible liberación de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) al entorno.

Los jales, tanto históricos como actuales, que provienen de la explotación de yacimientos minerales de sulfuros metálicos, contienen cantidades residuales de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ). En presencia de agua y aire, estos sulfuros metálicos se oxidan, con la subsecuente generación de Drenaje Ácido de Mina (DAM). El DAM se caracteriza por valores bajos de pH y generalmente, altas concentraciones de sulfatos y Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) disueltos (Romero et al., 2007). La oxidación de los sulfuros metálicos en los jales es, generalmente, muy limitada durante la operación de la mina y se desarrolla lentamente a lo largo del tiempo, después que cesa la acumulación en el depósito y la porosidad en el mismo permite la difusión del aire y agua (Romero et al., 2010)

Sin embargo, la oxidación de los sulfuros metálicos no siempre genera DAM. La capacidad de los residuos mineros para generar DAM está en función del balance entre los minerales que son productores potenciales de drenaje ácido (sulfuros metálicos) y los minerales alcalinos que son consumidores potenciales de acidez (carbonatos, hidróxidos, aluminosilicatos). Cuando la capacidad de neutralización es mayor que la capacidad de producción de acidez en los residuos mineros, éstos se consideran como No generadores de DAM, ya que la acidez producida, durante la oxidación de los sulfuros metálicos, es eficientemente consumida por la disolución de los minerales alcalinos, mediante el denominado proceso de neutralización.

Es importante resaltar que la composición mineralógica de los residuos mineros depende del tipo de yacimiento del que provienen y de las rocas que los contienen (Romero et al. 2010), los jales que provienen de yacimientos polimetálicos (sulfuros de Pb, Zn y Cu) de vetas epitermales encajonadas en lutitas calcáreas y areniscas del Cretácico, en el sur de

México, generan drenaje más ácido ( $\text{pH} = 2.4 - 3.7$ ) con cantidades variables de elementos potencialmente tóxicos (EPT) disueltos, que aquellos que provienen de yacimientos polimetálicos (sulfuros de Pb, Zn y Cu) asociados a cuerpos de reemplazamiento (Skarn), en el centro de México, encajonados en calizas del Jurásico-Cretácico, que generan lixiviados neutros ( $\text{pH} = 6.5 - 8.2$ ) con la, prácticamente ausencia de EPT disueltos.

El DAM ha sido reconocido como el principal problema ambiental derivado de las actividades mineras (Dold and Fontbote, 2001) debido a que los EPT liberados pueden transportarse y contaminar cuerpos de aguas superficiales o subterráneos. En las últimas décadas se han incrementado los estudios, en México y el mundo, en sitios mineros con problemas de generación de DAM (Jambor and Blowes, 1998; Cravotta y Trahan, 1999; Armienta, 2011; Romero et al., 2007; Mendez y Armienta, 2003; Romero et al., 2011) por mencionar algunos.

Considerando la importancia del problema ambiental que representa el DAM en las zonas mineras, se han hecho muchos esfuerzos, tanto a nivel internacional como nacional, con el fin de poder valorar y predecir el comportamiento de los residuos mineros con relación a su capacidad para la generación de DAM. Una adecuada valoración y/o predicción del fenómeno DAM en las zonas mineras, permitiría plantear las estrategias eficaces para el manejo ambientalmente seguro de los residuos que los generan, que podrían ser encaminadas a realizar acciones para el manejo y control del DAM, hasta la realización de acciones para prevenirlo.

En México, para valorar la peligrosidad de los jales, de acuerdo a la NOM-141, solamente se consideran las pruebas de extracción y de balance ácido-base, las cuales tienen un fundamento científico muy sólido pero de alcance limitado debido a:

1. La prueba de extracción: Se realizan con el fin de evaluar las condiciones de acidez (determinación del  $\text{pH}$ ) y los componentes fácilmente solubles en agua que se pueden liberar en forma iónica en el ambiente. Esta prueba solamente permite valorar la calidad del DAM en el tiempo que dura la prueba, 18 horas, pero no permite hacer la valoración para el futuro cuando se comienza a presentar el proceso de oxidación de los sulfuros, lo que es una debilidad muy grande, si se toma en cuenta que el fenómeno del DAM puede durar décadas y a veces hasta siglos (Holmstrom et al. 2001).
2. La prueba de balance ácido-base permite valorar el contenido de azufre contenido en los minerales, el cual producirá la acidez además de determinar la cantidad de carbonatos, por otro lado, no toma en cuenta otros minerales alcalinos que pueden contribuir a este proceso de neutralización como los aluminosilicatos, que tienen una cinética lenta para reaccionar y un buen poder de neutralización. Así mismo, esta prueba no toma en cuenta el papel de los otros sulfuros metálicos como galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), que se encuentran comúnmente en los jales de yacimientos polimetálicos.

Considerando que la generación del DAM está en función del balance entre los sulfuros metálicos (productores potenciales de ácido) y los minerales alcalinos (consumidores potenciales de ácido); para la adecuada valoración y/o predicción del comportamiento de los jales con relación al peligro potencial que representan para el ambiente, además de las pruebas señaladas en la normatividad ambiental mexicana, es recomendable realizar pruebas cinéticas que permitan valorar y/o predecir la velocidad relativa de

liberación de productos de oxidación y el tiempo de duración de este fenómeno (Lawrence 1990).

De acuerdo a la revisión bibliográfica, en México, se han realizado investigaciones para estudiar el drenaje ácido de minas (DAM) en diferentes zonas a través de la cuantificación de la concentración total de contaminantes, pruebas de extracción y de balance ácido-base; pero prácticamente no se han hecho estudios de DAM que impliquen la realización de pruebas cinéticas.

Por lo tanto, se realizó la presente tesis para conocer el comportamiento de dos tipos de residuos pertenecientes a yacimientos totalmente opuestos, un sulfuro masivo que es Tizapa, en el Estado de México y el otro, un Skarn en Charcas, San Luis Potosí, sometiendo los jales a pruebas cinéticas con celdas húmedas. Las dos presas de jales de las unidades mineras, están actualmente activas y, de manera general, presentan una coloración gris, propia de jales inalterados; pero en ambas se observan zonas donde ya ha iniciado la oxidación de los sulfuros metálicos de los jales, los cuales presentan la coloración amarillo – café, que es característica de estos residuos mineros, cuando están alterados.

En estas dos zonas mineras se han explotado dos tipos de yacimientos, cuya principal diferencia es el contenido de minerales que generan acidez (pirita) y minerales que la consumen (calcita):

En Tizapa se ha explotado un yacimiento polimetálico del tipo “sulfuros masivos vulcanogenéticos”, que se caracteriza por un contenido anormalmente alto de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), que es el principal sulfuro metálico que al oxidarse genera drenaje ácido de mina (DAM). Es importante resaltar que en México, de acuerdo a la revisión bibliográfica de acceso público, ha sido poco estudiado el fenómeno del drenaje ácido en este tipo de yacimientos. Estudios anteriores, utilizando las pruebas que marca la normatividad ambiental mexicana, indican que estos jales, actualmente, son generadores de drenaje ácido (Martínez Soriano, 2011).

En Charcas se ha explotado un yacimiento polimetálico del tipo “Skarn”, que se caracteriza por un contenido anómalamente alto de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), que es el mineral con mayor capacidad de neutralización, en el corto plazo y además de otros minerales que pueden jugar un papel relevante en el largo plazo, como es la wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ), por ser un mineral con una cinética más lenta para reaccionar. En estudios anteriores, utilizando las pruebas que marca la normatividad ambiental mexicana, indican que estos jales, actualmente, NO son generadores de drenaje ácido (Luna Celis, 2010).

En ambos casos se desconoce el comportamiento futuro de estos jales, en cuanto a la generación de DAM y cuando pasen a la etapa de pos-operación; por lo que el objetivo principal de esta tesis es estudiar los jales de estas dos zonas mineras con el fin de valorar y/o predecir la calidad del agua del DAM a través del tiempo, utilizando las pruebas cinéticas conocidas como “celdas húmedas”, que consiste en someter a intemperismo acelerado a los jales de estudio, bajo condiciones controladas de laboratorio.

Los resultados de este estudio son útiles para hacer un plan de cierre adecuado de estas dos presas de jales.

## II ASPECTOS GEOGRÁFICOS Y GEOLÓGICO MINEROS

### 2.1 Localización de los sitios de estudio: Jales de Tizapa y Charcas

Los residuos del proceso de beneficio de minerales (jales), que se generan en la Unidad Minera Tizapa y en la Unidad Minera Charcas, son el objeto de este estudio.

Los jales de la Unidad Minera Tizapa se localizan en el Municipio de Zacazonapan, en el Estado de México; y los jales de la Unidad Minera Charcas, se localizan en el municipio de Charcas, San Luis Potosí (Figura 2.1).



Figura 2.1 Localización geográfica de los sitios de estudio: Jales de Tizapa y Charcas.

### 2.2 Características de la Unidad Minera Tizapa

#### 2.2.1 Localización

La Unidad Minera Tizapa inició operaciones en 1994. Se encuentra dentro del municipio de Zacazonapan en la porción SW del Estado de México, a 67 Kilómetros al SW en línea recta de la Cd. de Toluca de Lerdo y a 4 Kilómetros al SE de la cabecera municipal de Zacazonapan (Fig. 2.2).

Esta Unidad Minera se encuentra ente las coordenadas geográficas  $19^{\circ} 00' 17''$  -  $19^{\circ} 16' 17''$  de latitud norte y  $100^{\circ} 12' 55''$  -  $100^{\circ} 18' 13''$  de longitud oeste. Se ubica a una altura media de 1,470 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con el municipio de Otzoloapan, al sur con la municipalidad de Tejupilco; al este con los municipios de Temascaltepec y Valle de Bravo y al oeste con Otzoloapan.

En la Unidad Minera de Tizapa, se explota un yacimiento de sulfuros masivo vulcanosedimentario de Zn-Pb-Cu con valores de Ag y Au, esto ha generado desechos que se encuentran depositados en dos presas de jales I y II (Fig. 2.3). La presa de jales I actualmente está inactiva y ocupa una superficie de 16.6 hectáreas, mientras que la presa de jales II está activa y ocupa una superficie de 5.2 hectáreas.



Figura 2.2 Localización de la Unidad Minera Tizapa en Zacazonapan, Edo. Mex.

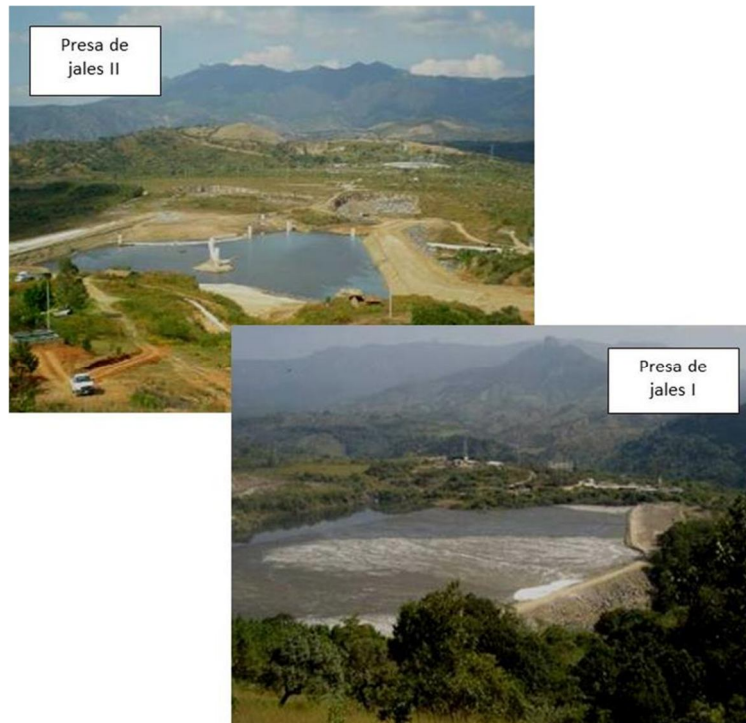


Figura 2.3 Fotografías de las dos presas de jales de la Unidad Minera Tizapa

### **2.2.2 Clima**

El clima predominante es el cálido, sub-húmedo con humedad moderada. La temperatura media anual es de 23° C, la máxima anual de 31°C y la mínima anual de 15°C. La precipitación es de 1,800 mm/año, presentándose vientos en mayo y esporádicamente en agosto y septiembre. La evaporación potencial es del orden de 900 mm/año.

### **2.2.3 Orografía**

El municipio de Zacazonapan, donde se ubica la Unidad Minera Tizapa, pertenece a la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur y a la sub-provincia Depresión del Balsas, como ejemplos notables de orografía se tienen los cerros de La Pila, Sombrero, Pelón, entre otros. Además, al norte del municipio se localizan elevaciones importantes como El Xomil, Peña Colorada, Peñas del Fraile y parte de la cuesta.

### **2.2.4 Hidrología**

Hidrológicamente el área corresponde a la Región Hidrológica RH 18, Río Balsas, a la Cuenca del Río Cutzamala (18G) y la Subcuenca del Río Temascaltepec. Localmente se trata de un sistema de cañadas del Arroyo "El Ahogado", tributario del Río Temascaltepec, que es el más importante por su caudal permanente.

La hidrografía de Zacazonapan se complementa con una serie de manantiales, bordos y represas distribuidos en el territorio municipal, cuyo uso se destina para el abrevadero de ganado, uso doméstico y para irrigar pequeñas superficies.

### **2.2.5 Geología local**

La información geológica local se tomó de la Monografía Geológico – Minera del Estado de México del Consejo de Recursos Minerales, México (COREMI, 1996) y se representa en la Figura 2.4.

La base de la secuencia estratigráfica de la zona de estudio corresponde a las rocas metamórficas del Jurásico, constituidas por esquistos, gneises y filitas grafíticas.

Sobre las rocas metamórficas del jurásico yacen rocas del Cretácico constituidas por rocas con cierto grado de metamorfismo: metalutita-metarenisca (Kase(¿) MLu-MAr), metacaliza-metalutita (KapaMCz-Lu) y metandesita-metarenisca (Kvh MA-Mar).

Algunos cuerpos intrusivos Riolitico (TmPr) se ha identificados hacia el sureste de la presa de jales. Posteriormente a los eventos riolíticos ocurren los depósitos de un conglomerado riolítico combinado con fragmentos de filita y esquistos.



Derrames basálticos (QhOb) y brechas basálticas (QhObvb), conforman la mesa de Tizapa. Estos derrames rellenaron una antigua depresión formada en el metamórfico, alineada oeste-este, su mejor expresión como afloramiento se tiene en los cortes acantilados de hasta 70 metros en ambas márgenes del arroyo del Ahogado, se han logrado identificar dos coladas separadas por una brecha volcánica.

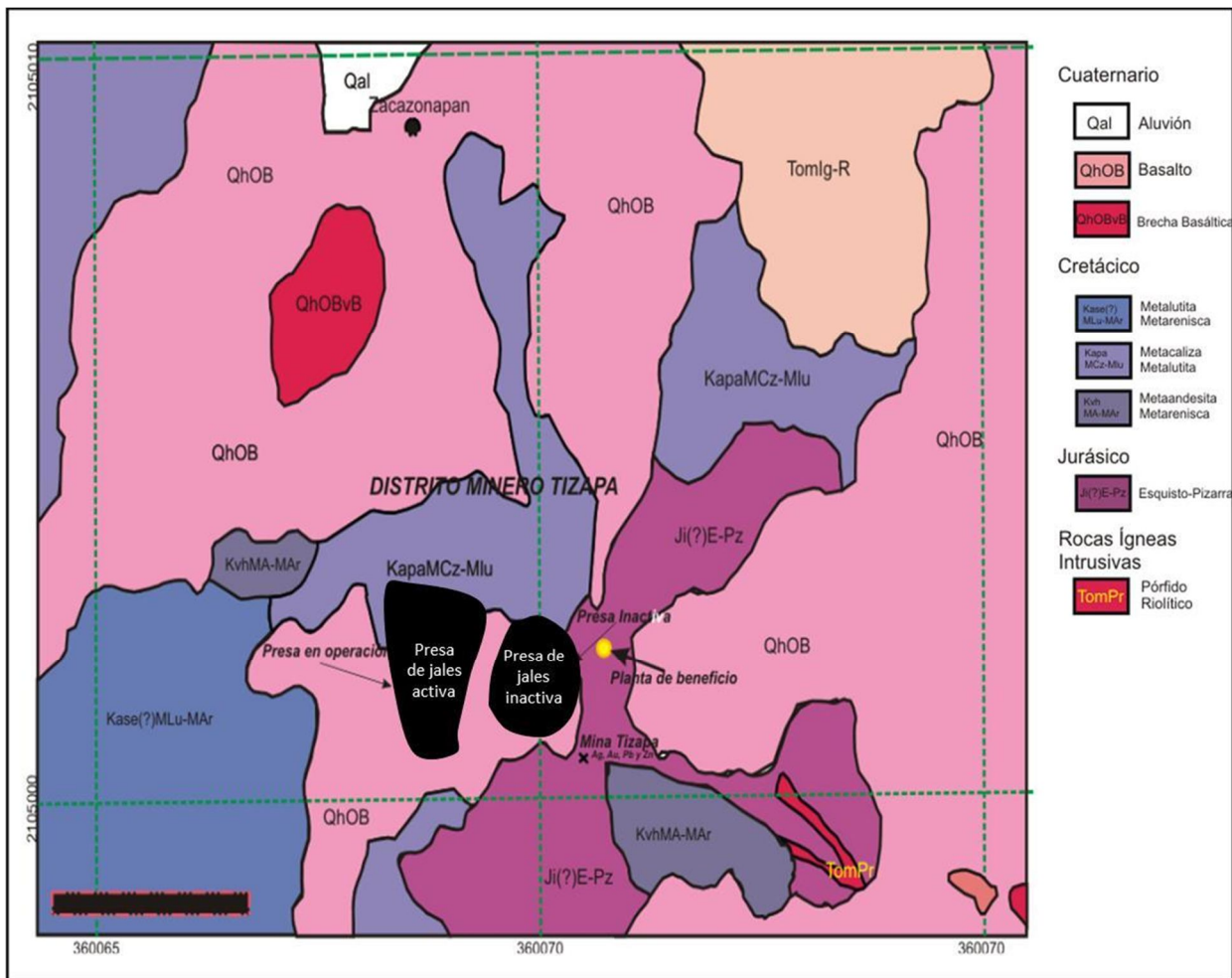


Figura 2.4 Geología local del sitio de estudio (Modificado de Martínez Soriano, 2011).

## 2.2.6 Yacimiento mineral

En el municipio de Zacazonapan, en el yacimiento de Tizapa, la roca encajonante es una secuencia vulcanosedimentaria con metamorfismo de facies de esquisto verde, constituida por filita gráfica con intercalaciones complejas de esquistos de clorita y

moscovita y pizarra carbonosa. La edad de esta secuencia se considera del Triásico Tardío-Jurásico Temprano (Elías-Herrera et al., 2000) o del Cretácico Temprano (JICA, 2004).

Las dimensiones de los cuerpos mineralizados en este yacimiento, tanto en espesor como en extensión, son variables. Se extienden en un área de aproximadamente 500 m de este a oeste y 400 m de norte a sur, aunque existen grandes posibilidades de que su extensión sea mayor. Asociados a estos cuerpos es posible encontrar también zonas relativamente extensas con diseminación de sulfuros. Megascópicamente, es común observar pequeñas bandas de color gris oscuro y amarillento que representan, principalmente, una zonación de esfalerita y pirita-calcopirita, respectivamente. Tizapa es en la actualidad, por sus leyes y reservas, el yacimiento vulcanogénico polimetálico más importante del Estado, y uno de los más significativos del país. Las numerosas capas de sulfuros se consideran resultado del plegamiento y cabalgamiento de una sola capa original, depositada sobre rocas andesíticas a dacíticas, según análisis de elementos inmóviles, las que dieron origen por alteración hidrotermal y metamorfismo a los actuales esquistos de sericita y biotita, y cubiertas por lutitas carbonosas, transformadas a esquistos grafiticos (Akio y Koji, 2000).

El Servicio Geológico Mexicano en el estado de México pudo ubicar 3 millones de toneladas posibles de mineral polimetálico (Pb, Cd, Zn, Cu, Au, Ag), mediante estudios de geología y barrenación a diamante.

Como depósito característico de esta zona, se tiene al conocido como Tizapa, está constituido por tres cuerpos estratiformes de sulfuros masivos de forma lenticular, concordante con la foliación de la roca huésped. El yacimiento se formó a partir de la exhalación de fluidos hidrotermales por debajo del piso marino. Estos fluidos viajaron a través de fracturas transportando sulfuros ricos en Fe, Zn, Pb, Cu, As y sulfosales de Ag.

Este depósito de sulfuros masivos está constituido principalmente por pirita ( $\text{FeS}_2$ ), comparativamente abundante, esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) hacia la parte superior con tendencia al aumento de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) en la parte inferior. Además, hay presencia de minerales como arsenopirita ( $\text{FeAsS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ) y freibergita ( $\text{Ag,Cu,Fe}_{12}(\text{Sb,As})_4\text{S}_{13}$ )

Estos cuerpos tienen un espesor promedio de 6 metros. Sus longitudes son variables debido a su comportamiento lenticular; tienen dimensiones de 10 a 200 m; la máxima longitud comprobada para un cuerpo fue de 300 m. Las leyes medias de todo el yacimiento son 1.68 g/t de oro, 288 g/t de plata, 1.65% de plomo, 7.03% de zinc y 0.55% de cobre (datos proporcionados por Minera Tizapa, S.A. de C.V., en 1996).

### **2.2.7 Hidrogeología**

Administrativamente, el acuífero donde se ubica la Unidad Minera Tizapa pertenece al acuífero 1509 Temascaltepec.

En la zona de Tizapa, el conglomerado (Tcg) se encuentra entre el basalto (Qba) y la secuencia metamórfica (J-T sst), logrando alojar pequeños volúmenes de agua por ser la roca más permeable. El agua de lluvia se transporta lentamente a través de las fracturas del basalto (Qba) hasta llegar al conglomerado (Tcg) que tiene como roca base a la secuencia metamórfica (J-T sst) que le sirven de sello por su baja permeabilidad.

Se han logrado ubicar muy localmente algunas pequeñas fracturas interconectadas que conducen agua dentro de la parte superior de la secuencia metamórfica (J-T sst) que son probablemente las que conducen el agua desde el conglomerado (Tcg) hasta los cuerpos de mineral alojados entre la secuencia metamórfica (J-T sst).

La mayor presencia de agua se tiene dentro del cuerpo mineral de sulfuros masivos que se encuentra intensamente fracturado, la secuencia metamórfica del esquisto y filita (J-T sst) le sirven como sello, quedando el agua confinada en el cuerpo mineral.

### **2.2.8 Antecedentes de estudios ambientales**

En los jales de la Unidad Minera Tizapa, Martínez Soriano (2011), reporta jales con valores de pH bajos ( $\text{pH} = 2.1 - 3$ ) que indican condiciones de acidez extrema, por lo que actualmente son generadores potenciales de drenaje ácido.

También se reportan jales con los valores de pH ligeramente neutros ( $\text{pH} = 5.0 - 6.4$ ). Las pruebas de balance ácido-base, en este tipo de jales, indica que serán generadores de drenaje ácido en el futuro cuando se oxiden, ya que el potencial de neutralización "PN" (media = 16.5 Kg  $\text{CaCO}_3$ /tonelada de jal) es muy inferior al potencial de acidez "PA" (media = 584.105 Kg  $\text{CaCO}_3$ /tonelada de jal). La relación PN/PA varía entre 0.021 y 0.051 (Tabla 2.1), siendo que el criterio que establece la NOM 141, para que el jal sea potencialmente generador de ácido, la relación  $\text{PN/PA} < 1.2$ . En la misma tabla se observa que las concentraciones de hierro (como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y S son sustancialmente altas, lo que es congruente con la presencia de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) que fue debidamente identificada por DRX.

MUESTRA	CE	pH	PN	PA	PN/PA
	mS/cm		Kg CaCO3/ton	Kg CaCO3/ton	
JTZ1	1.78	5.3	12.34	586.25	0.021
JTZ2	1.71	5.1	12.71	558.70	0.023
JTZ3	1.98	5.0	12.72	616.89	0.021
JTZ4	1.46	5.0	14.65	683.15	0.021
JTZ6	1.82	5.1	17.38	589.86	0.029
JTZ11	1.96	6.4	25.53	502.56	0.051

MUESTRA	As	Ba	Cd	Ag	Pb	Se	Cu	Zn
	mg/kg							
JTZ1	1666	259.8	107.6	50.6	2378	BLB	941	18577
JTZ6	2013	209.3	62.9	29.8	2170	19.22	927	12081
JT11	746	BLD	BLD	BLD	1048	BLD	154	4359

MUESTRA	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	S
	%									
JTZ1	6.54	BLD	0.99	40.59	0.08	0.83	0.33	0.13	0.11	19.9
JTZ6	7.14	BLD	0.84	39.99	0.09	0.71	0.35	0.21	0.1	20
JT11	7.55	BLD	1.06	40.72	BLD	0.54	0.55	0.19	0.06	18.11

MUESTRA	Mineralogía por Difracción de Rayos X (DRX)
JTZ-1	Pirita: FeS <sub>2</sub>
	Cuarzo: SiO <sub>2</sub>
	Clorita: Mg <sub>5</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
	Moscovita: KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
	Yeso: CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O
JTZ-6	Pirita: FeS <sub>2</sub>
	Cuarzo: SiO <sub>2</sub>
	Moscovita: KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
	Clorita: Mg <sub>5</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
	Yeso: CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O
JTZ-11	Pirita: FeS <sub>2</sub>
	Cuarzo: SiO <sub>2</sub>
	Yeso: CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O
	Jarosita: KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>
	Plagioclasa de composición intermedia: (Na,Ca)Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>

Tabla 2.1 Potencial de generación de drenaje ácido y caracterización química y mineralógica de los jales de la Unidad Minera Tizapa Fuente: Martínez Soriano, 2011, bld: debajo límites de detección

Por otro lado, Martínez Soriano reporta que los jales de Tizapa se caracterizan por las altas concentraciones de elementos de naturaleza tóxica como el arsénico (As), plomo (Pb) y cadmio (Cd). Se determinaron concentraciones totales de hasta 2562 mg/kg de As, 3043 mg/kg de Pb y 181 mg/kg de Cd. Estos materiales también se caracterizan por las altas concentraciones de otros metales pesados que no son de naturaleza tóxica como el cobre Cu (hasta 1268 mg/kg) y el zinc Zn (hasta 32644 mg/kg).

También se reporta una concentración de hierro Fe de hasta 45.1% (como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) lo que sugiere que estos jales se caracterizan por las altas concentraciones de pirita, que es el principal mineral que genera acidez. En proporción inferior destacan las concentraciones de Si como  $\text{SiO}_2$  (hasta 7.78%), Al como  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (hasta 2.11%), Ca como CaO (hasta 2.61%), Na como  $\text{Na}_2\text{O}$  (hasta 1.31%) y K como  $\text{K}_2\text{O}$  (hasta 0.52%); lo que sugiere la baja proporción de minerales carbonatados y aluminosilicatos, que son los que tienen un alto potencial para la neutralización del drenaje ácido.

En todas las muestras de jales inalterados se identificaron los minerales primarios pirita  $\text{FeS}_2$ , cuarzo  $\text{SiO}_2$ , moscovita  $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  y clorita  $\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ . En algunas muestras se identificaron picos de calcita  $\text{CaCO}_3$ , plagioclasas ( $\text{Ca},(\text{Si},\text{Al})_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ). En los jales oxidados se identificaron minerales secundarios yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y jarosita ( $(\text{K},\text{H}_3\text{O})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})$ ).

En los lixiviados ácidos de los jales de Tizapa, se reportan concentraciones de elementos tóxicos disueltos como As (hasta 0.198 mg/L), Cd (hasta 0.273 mg/L) y Pb (hasta 2.35 mg/L) y de otros elementos como el Al (hasta 40 mg/L), Cu (hasta 5.33 mg/L), Fe (hasta 224 mg/L) y Zn (37.6 mg/L). En los lixiviados, prácticamente, neutros de los jales de Tizapa se reportan concentraciones de elementos tóxicos disueltos como As (hasta 0.0256 mg/L), Cd (hasta 0.588 mg/L) y Pb (hasta 2.91 mg/L) y de otros elementos como el Al (hasta 0.56 mg/L), Cu (hasta 1.58 mg/L), Fe (hasta 4.41 mg/L) y Zn (77.7 mg/L).

## 2.3 Características de la Unidad Minera Charcas

### 2.3.1 Localización

Unidad Minera Charcas (UMCh) se encuentra localizada en el municipio de Charcas, a 120 kilómetros al norte de la ciudad de San Luis Potosí, SLP y a 4 km al oeste del poblado del municipio de Charcas (Fig. 2.5), entre las coordenadas geográficas 23° 07' 47" Latitud Norte y 101° 06' 37" Longitud Oeste. Se encuentra a una altitud de 2,057 msnm. El municipio colinda al norte con el municipio de Catorce, al sur con el de Venado, al este con Villa de Guadalupe, al oeste con el municipio de Santo Domingo y al suroeste con el de Salinas de Hidalgo.

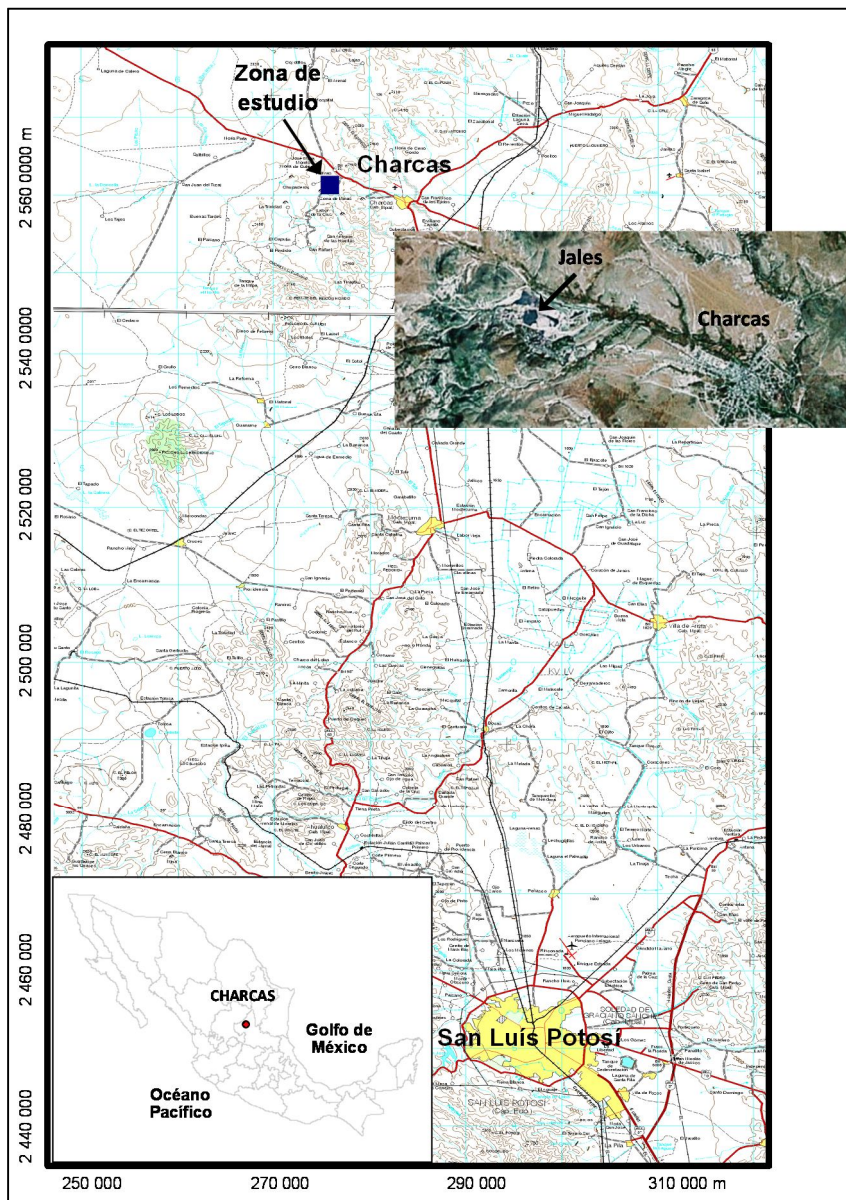


Figura 2.5 Ubicación de la Unidad Minera Charcas, en San Luis Potosí.

Producto de la explotación del yacimiento tipo "Skarn" en Charcas, se han generado residuos de granulometría fina que se ha depositado en una presa de jales que ocupa una superficie de aproximadamente 95 hectáreas (Fig. 2.6).



*Figura 2.6 Fotografías de las dos presas de jales de la Unidad Minera Charcas*

### **2.3.2 Clima**

El clima característico de Charcas es seco templado, semi-seco templado y seco semi-cálido. Se reportan los siguientes datos climáticos para el periodo 1962-1999: i) Temperatura media anual es de 16.9° C. ii) Precipitación promedio es de 391.2 mm anuales. iii) Evaporación potencial 1-941.9 mm anuales (CNA, 2002).

### **2.3.3 Orografía**

Charcas se localiza en dos provincias fisiográficas del estado de San Luis Potosí, que son la Mesa del Centro y la Sierra Madre Oriental, dentro de las sub-provincias Llanos y Sierras Potosino-Zacatecano y Sierras y Lomeríos de Aldama. En el territorio municipal se distinguen dos regiones montañosas formadas por la Sierra de los Picachos del Tunalillo,

Sierra La Cuesta, Blanco y Coronado. La Sierra de los Picachos del Tunalillo atraviesa de norte a sur la parte central del municipio. Es importante porque en ella se localiza la principal zona minera del municipio.

### 2.3.4 Hidrología

Charcas se encuentra en la región hidrológica No. 37 denominada El Salado. El fuerte desequilibrio existente entre precipitación y evapotranspiración ocasionan que no existan escurrimientos superficiales de importancia, cuando más, arroyos intermitentes.

### 2.3.5 Geología local

La secuencia litológica de la zona está conformada por rocas calizas del Jurásico de la Formación Zuloaga que se divide en dos unidades, la primera de ellas se compone de capas de caliza densa de aproximadamente 1 m de espesor, alternando con capas de 3 a 4 m de caliza micro cristalina (Figura 2.7). Sobre las calizas de la Formación Zuloaga yacen las calizas del Cretácico de la Formación Cuesta del Cura, que se compone de estratos delgados a medios con intercalaciones de horizontes arcillosos y abundantes bandas de pedernal negro. Las calizas de ambas Formaciones están afectadas por rocas intrusivas ácidas del Terciario. La secuencia litológica finaliza con los materiales aluviales del Cuaternario.

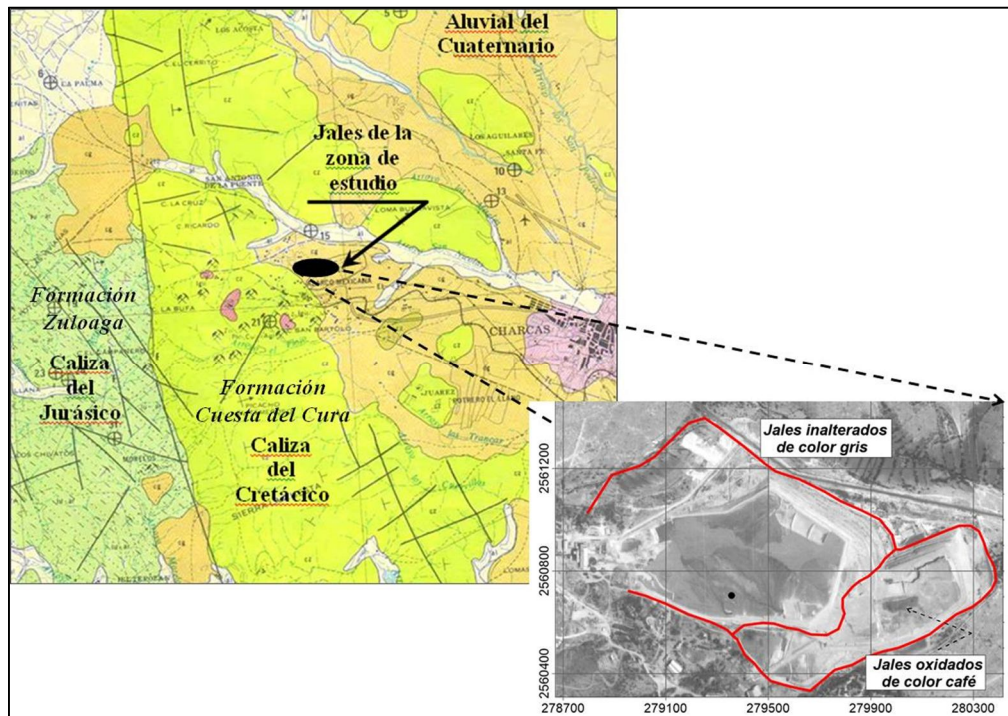


Fig. 2.7 Mapa geológico de la zona de estudio.



### **2.3.6 Yacimiento mineral**

Los depósitos minerales que se han extraído y beneficiado se identifican como cuerpos de reemplazamiento (Skarn) que se encuentran encajonados en calizas del Jurásico-Cretácico y están asociados a zonas de contacto con los intrusivos ácidos. La mineralización característica del relleno de fisura (de menor potencialidad) está asociada a vetas encajonadas en el contacto entre las calizas y los intrusivos. Los sulfuros metálicos reportados son: pirita ( $\text{FeS}_2$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), calcopirita ( $\text{FeCuS}_2$ ), argentita ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ). Entre los minerales de ganga se reportan calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ), grosularita ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ) y danburita ( $\text{CaB}_2(\text{SiO}_4)_2$ , (Romero, 2007).

### **2.3.7 Hidrogeología**

Administrativamente, el acuífero donde se ubica la Unidad Minera Charcas pertenece al acuífero 2408 Villa de Arista.

En la zona hidrogeológica del valle de Villa de Arista, el sistema acuífero conocido se encuentra alojado en el material aluvial y sedimentos lacustres que rellenan el valle. Tanto las fronteras laterales como el piso rocoso se consideran impermeables, ya que corresponden a formaciones de naturaleza calcáreo-arcillosa. En la zona donde se ubican los jales de estudio no se encontraron datos de manifestación de aguas subterráneas.

### **2.3.8 Antecedentes de estudios ambientales**

En la presa de jales de Charcas se identificaron jales inalterados de color gris que cubren aproximadamente 2/3 partes de la presa y jales oxidados de color café que cubren 1/3 parte de la presa de jales.

En el trabajo de tesis de Luna Celis (2008) se reporta que en los lixiviados de los jales oxidados y jales inalterados se determinaron valores de pH prácticamente neutros ( $\text{pH} = 6.5 - 8.4$ ), lo que indica que, actualmente, los jales de Charcas no son generadores de drenaje ácido de mina.

Los resultados de la prueba de balance ácido - base (Tabla 2.2), indican que los valores de PN/PA varían de 2.4 a 9.3, lo que indica que los jales de Charcas no generarán drenaje ácido en el futuro, como lo considera el criterio de la NOM 141.

Clave	%Stotal	%S(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	%S(S <sup>2-</sup> )	PA	PN	PN/PA
				kg CaCO <sub>3</sub> /Ton	kg CaCO <sub>3</sub> /Ton	
J CH I	1.73	0.011	1.72	53.7	438.57	8.2
J CH II	2.12	0.007	2.12	66.1	352.45	5.3
J CH III	2.52	0.009	2.51	78.4	485.31	6.2
J CH IV	1.87	0.007	1.86	58.3	349.45	6.0
J CH V A	3.17	0.018	3.16	98.6	453.17	4.6
J CH VI	1.82	0.026	1.80	56.1	366.40	6.5
J CH VII	1.79	0.014	1.78	55.5	515.25	9.3
J CH VIII	2.04	0.011	2.03	63.4	357.53	5.6
J CH IX	1.73	0.011	1.71	53.6	431.59	8.1
J CH X	3.36	0.026	3.33	104.1	359.47	3.5
J CH XI	3.06	0.006	3.06	95.5	448.74	4.7
J CH V B	4.10	0.064	4.04	126.2	297.51	2.4

Tabla 2.2 Potencial de generación de drenaje ácido de los jales alterado e inalterados de la Unidad Minera Charcas (Fuente: Luna Celis, 2008)

Por otro lado, Luna Celis (2008) reporta que los jales de Charcas se caracterizan por las altas concentraciones de elementos de naturaleza tóxica como el arsénico (As), plomo (Pb) y cadmio (Cd). Se determinaron concentraciones totales de hasta 1493 mg/kg de As, 26824 mg/kg de Pb y 1716 mg/kg de Cd. Estos materiales también se caracterizan por las altas concentraciones de otros metales pesados que no son de naturaleza tóxica como el cobre Cu (hasta 6326 mg/kg) y el zinc Zn (hasta 80632 mg/kg). (Tabla 2.3)

CLAVE	As	Ba	Cd	Ag	Pb	Se	Cu	Zn
	mg/kg							
J CH III	231.5	12.7	33.8	18.2	532	BLD	231	2425
J CH VII	280.6	24.6	185.7	41.2	1321	BLD	1138	15525
J CH X	492.8	22.3	80.8	56.4	1777	10.3	870	7457
J CH V B	1493.1	115.1	1716.4	33.7	26824	BLD	6376	80072

MUESTRA	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	%									
JCH III	32.68	0.13	3.96	9.58	0.90	1.66	40.09	0.20	0.25	0.12
JCH VII	34.32	0.13	4.05	6.09	0.79	1.42	38.68	0.59	0.29	0.16
JCH X	37.07	0.11	3.36	8.42	0.65	1.16	39.55	0.25	0.19	0.07
JCH VB	29.04	0.14	3.50	19.62	1.14	0.24	21.84	1.97	0.51	0.07

Tabla 2.3 Caracterización química de las muestras seleccionadas de la Unidad Minera Charcas Luna Celis, 2008, bld: debajo de los límites de detección.

También se reporta una concentración de hierro Fe de hasta 19.62% (como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) lo que sugiere que estos jales se caracterizan por las relativamente altas concentraciones de pirita. En proporción relativamente alta destacan las concentraciones de Si como SiO<sub>2</sub>

(hasta 37.07%), Al como  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (hasta 4.05%) Ca como CaO (hasta 40.09%), Na como  $\text{Na}_2\text{O}$  (hasta 1.97%) y K como  $\text{K}_2\text{O}$  (hasta 0.51%); lo que sugiere la alta proporción de minerales carbonatados y aluminosilicatos, que son los que tienen un alto potencial para la neutralización del drenaje ácido.

Los análisis de DRX realizados (Tabla 2.4), indican la presencia de minerales primarios como pirita ( $\text{FeS}_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ). En los jales oxidados también se reportaron minerales secundarios como yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), jarosita ( $\text{KFe}_3[\text{SO}_4]_2(\text{OH})_6$ ) y hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Este mismo estudio reporta que por microscopía óptica se identificaron esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), calcopirita ( $\text{FeCuS}$ ), arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) y aluminosilicatos.

En los lixiviados ácidos de los jales de Charcas, las concentraciones de elementos tóxicos disueltos no fueron detectadas por las técnicas de análisis. Solamente en una muestra que corresponde a los jales oxidados de color café se detectó cadmio y zinc disueltos ( $\text{Cd} = 1.57 \text{ mg/L}$ ,  $\text{Zn} = 10.6 \text{ mg/L}$ ).

MUESTRA	Mineralogía por Difracción de Rayos X (DRX)
JCH III	Pirita: $\text{FeS}_2$
	Cuarzo: $\text{SiO}_2$
	calcita: $\text{CaCO}_3$
JCH VII	Pirita: $\text{FeS}_2$
	Cuarzo: $\text{SiO}_2$
	calcita: $\text{CaCO}_3$
	Yeso: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
JCH X	Pirita: $\text{FeS}_2$
	Cuarzo: $\text{SiO}_2$
	calcita: $\text{CaCO}_3$
	Yeso: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
JCHVB(*)	Cuarzo: $\text{SiO}_2$
	Jarosita: $\text{KFe}_3[\text{SO}_4]_2(\text{OH})_6$
	Yeso: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Hematita: $\text{Fe}_2\text{O}_3$
	Wollastonita: $\text{CaSiO}_3$
	Celestita: $\text{SrSO}_4$

(\*) Aunque en esta muestra no se identificó la presencia de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) por DRX, este mismo autor reporta que este sulfuro metálico fue identificado por microscopía óptica pero rodeada por un costra de oxihidróxidos de Fe

Tabla 2.4 Caracterización química y mineralógica de las muestras seleccionadas de Charcas  
Luna Celis, 2008.

### III ASPECTOS TEÓRICOS

#### 3.1 Jales

##### 3.1.1 Generalidades

En general, los sulfuros metálicos ocurren en yacimientos minerales de diferente origen y son portadores de metales con valor comercial como el oro, plata, cobre, plomo, zinc, etc. Sin embargo, para obtener estos metales, la industria minero-metalúrgica forzosamente genera residuos entre los que destacan los jales, que son el producto del proceso de concentración físicos y químicos. Consecuentemente, los jales tienen la misma composición química que los minerales beneficiados, sólo que con menor cantidad de metales y por ser partículas finas, resultado de la trituración y molienda, cuentan con mayor superficie de reacción. Además, en la composición de los jales se pueden encontrar algunos residuos de los reactivos utilizados en el proceso de beneficio (cianatos, xantatos, sulfatos de Cu y Zn). En la tabla 3.1 se presentan los principales tipos de yacimientos minerales que se han identificado en México, entre los que se incluyen Tizapa y Charcas, cuyos jales fueron seleccionados para este estudio.

Tipo de Yacimiento	Ejemplos
Yacimientos Tipo Epitermal de Alta, Mediana y Baja sulfuración	Taxco, Guerrero; Guanajuato, Guanajuato; Pachuca, Hidalgo; Real de Ángeles, Zacatecas; Santa Bárbara Chihuahua.
Yacimientos de Alta Temperatura de reemplazo en rocas carbonatadas CRD (Carbonate-hosted replacement deposits)	Charcas, San Luis Potosí; Zimapán, Hidalgo; Concepción del Oro, Zacatecas.
Yacimientos tipo Sulfuros Masivos Vulcanogénicos polimetálicos o VMS	Tizapa, Estado de México; Rey de Plata, Guerrero y algunas otras zonas mineras ubicadas en Jalisco, Guerrero, Michoacán y el Estado de México.
Yacimientos tipo Pórfido Cuprífero	Caridad y Cananea, Estado de Sonora

Tabla 3.1.- Tipos de Yacimientos minerales identificados en México (Tomado de Clark & Melendez 1991 y Camprubi & Albinson, 2006).

Históricamente, los jales generados han sido depositados en los denominadas “presas de jales” en los alrededores de las minas en sitios topográficamente bajos sin ninguna

consideración ambiental, convirtiéndose en focos de potencial contaminación para la región. Sin embargo, con la publicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 el 13 de septiembre de 2004, a partir de la publicación de esta norma, las nuevas empresas mineras están obligadas a depositar sus jales en presas diseñadas para reducir el riesgo al medio ambiente.

### **3.1.2 Presa de jales**

Una presa de jales es una obra de ingeniería civil y se construye con el fin de almacenar los desechos mineros de granulometría fina denominados jales. Esta obra consta de cuatro elementos constitutivos que son la cortina contenedora, el vaso, el sistema decantador drenante y el vertedor de excedencias (Fig.3.1).

Una de las principales características de las presas de jales es que se construyen a medida que se explota el yacimiento mineral. De hecho, el tamaño y capacidad de estos depósitos suele aumentar a medida que se lleva a cabo la producción minera, lo cual demanda un proceso continuo de construcción y la atención permanente a las cuestiones de seguridad asociadas a ello.

Los elementos constructivos de una presa de jales son:

- a) Cortina contenedora (dique o talud): es el elemento que constituye una barrera contra el desplazamiento de la masa de jales hacia áreas adyacentes, por lo que constituye el componente más importante del sistema de depósito vinculado con la disposición de la seguridad. Para su construcción se pueden usar jales u otro material; y los métodos de construcción son: aguas arriba, aguas abajo o la combinación de ambos.
- b) Vaso de almacenamiento: es el espacio donde se van almacenar los jales en forma de pulpa, está delimitado por la cortina contenedora y, en ocasiones, por el mismo terreno en algunas partes.
- c) Sistema decantador drenante: es un sistema de tuberías de concreto reforzado con o sin perforaciones, de sección cuadrada o circular. La función principal de este sistema es el de recuperar el agua para poder volver a utilizarla en el proceso de beneficio.
- d) Vertedor de excedencias: es un sistema de túneles o canales que permite desalojar escurrimientos normales y extremos hasta desalojar con seguridad el agua de la tormenta máxima posible del diseño de la presa.

Como medidas preventivas para evitar la contaminación por la operación de presas de jales, se recomienda desviar los cursos de agua más cercanos a esas obras y establecer sistemas para captar el agua que caiga dentro del vaso de almacenamiento, así como mecanismos para retener a los materiales de los taludes que puedan estarse erosionando. La cantidad de agua dentro de las presas de jales debe mantenerse bajo control, eliminando periódicamente los excesos, para evitar que la presa pueda tener una falla por el empuje que ocasiona el agua dentro de los jales, además de que se puede volver a usar en la planta de beneficio. En algunos casos, puede llegarse a requerir la instalación de geomembranas en la base del vaso con el fin de evitar la infiltración hacia el subsuelo.

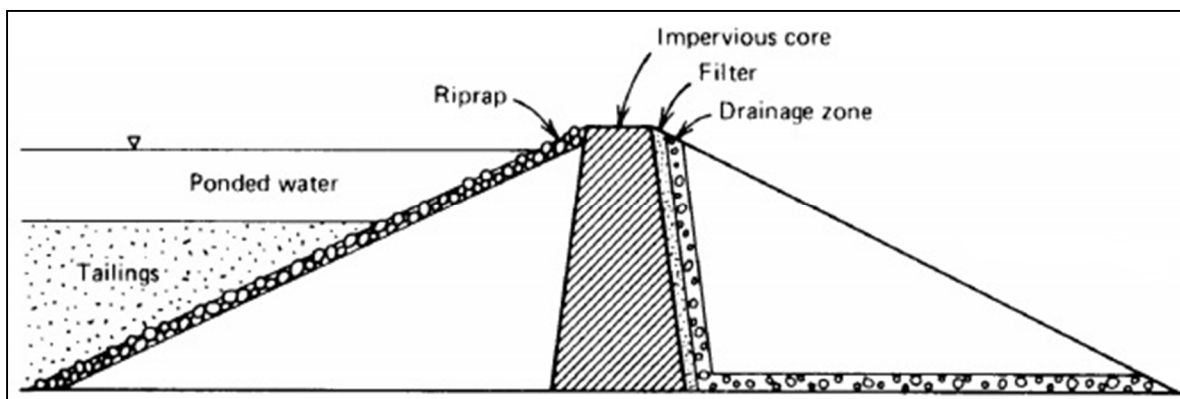


Figura 3.1 Presa de jales tipo retención de agua (Fuente: Vick, S.G. 1990. *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*. BiTech Publishers Ltd.)

### 3.2 Drenaje ácido de mina

En las zonas mineras es común la ocurrencia de minerales sulfurosos en los afloramientos de rocas, en las obras mineras y en los residuos que se almacenan alrededor de las minas. Los jales, tanto históricos como actuales, que provienen de la explotación de yacimientos de sulfuros metálicos, contienen cantidades residuales de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ). La oxidación de los jales es un proceso previo a la generación de DAM, donde interactúan los minerales y compuestos químicos que contengan los jales (minerales metálicos y no metálicos).

En presencia de agua y aire, los sulfuros metálicos se oxidan, con la subsecuente generación de Drenaje Ácido de Mina (DAM). El DAM se caracteriza por los valores bajos de pH y, generalmente, altas concentraciones de sulfatos y Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) disueltos (Romero et al., 2007). La oxidación de los sulfuros metálicos en los jales es, generalmente, muy limitada durante la operación de la mina y se desarrolla lentamente a lo largo del tiempo, después que cesa la acumulación en el depósito y la porosidad en el mismo permite la difusión del aire y agua (Romero et al., 2010).

Sin embargo, la oxidación de los sulfuros metálicos no siempre genera DAM. La capacidad de los residuos mineros para generar DAM está en función del balance entre los minerales que son productores potenciales de drenaje ácido (sulfuros metálicos) y los minerales no metálicos que son consumidores potenciales de acidez (carbonatos, hidróxidos, aluminosilicatos). Cuando la capacidad de neutralización es mayor que la capacidad de producción de acidez en los residuos mineros, éstos se clasifican como No generadores de DAM, ya que la acidez producida, durante la oxidación de los sulfuros metálicos, es eficientemente consumida por la disolución de los minerales alcalinos, mediante el denominado proceso de neutralización.

La generación del DAM ocurre en tres etapas:

A) Etapa inicial: Predominan las reacciones de oxidación química donde el  $O_2$  es el oxidante principal del sulfuro. Los sulfatos " $SO_4^{2-}$ " y protones " $H^+$ " liberados por la oxidación de los sulfuros metálicos son consumidos por las reacciones de neutralización que se producen por la disolución y alteración de minerales carbonatados, hidróxidos y aluminosilicatos que mantienen las condiciones desde neutras a alcalinas ( $pH > 7$ ). En esta etapa se propicia la precipitación de minerales secundarios que son liberados durante la oxidación.

B) Etapa intermedia: Coexisten las reacciones de oxidación química y biológica. A medida que continúa la generación de DAM y los minerales con potencial neutralizador se agotan o se vuelven inaccesibles, el pH del drenaje disminuye a 3.5 - 4.5 y la oxidación puede ser catalizada por el tipo de bacterias "Metallogenium" (Walsh and Mitchell 1972), y se producen condiciones favorables para el desarrollo de bacterias del género *Thiobacillus*.

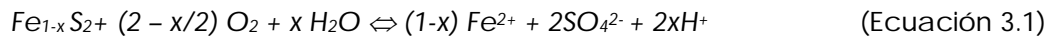
C) Etapa final: Predominan las reacciones de oxidación biológica. La producción de  $H^+$  ocurre a mayor velocidad que la de  $OH^-$ ; el pH se vuelve más ácido y cuando el medio alcanza un  $pH < 3.5$ , la oxidación es catalizada por microorganismos del género *Thiobacillus*: ferrooxidans y thiooxidans (USEPA 1994). De las reacciones de oxidación química (etapa inicial), a partir de los sulfuros de hierro, se produce hierro ferroso " $Fe^{2+}$ ", que se oxida biológicamente y se convierte en hierro férrico " $Fe^{3+}$ " que reemplaza el  $O_2$  como oxidante. En esta etapa la velocidad de oxidación es considerablemente más rápida que en las etapas anteriores. Evangelou y Zhang (1995) reportan que la oxidación de los sulfuros metálicos catalizada por bacterias puede ser más rápida que la oxidación química hasta en seis órdenes de magnitud.

### 3.3 Procesos geoquímicos que ocurren en los jales

#### 3.3.1 Oxidación

Los sulfuros metálicos en los jales se pueden oxidar al estar expuestos a los fenómenos de intemperismo (interacción con oxígeno y agua).

Los sulfuros de hierro pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y la pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$ ) son los minerales más importantes, cuya oxidación puede generar drenaje ácido y la formación de oxihidróxidos de Fe que le dan la coloración café-rojo-amarilla a los jales oxidados a través de las siguientes ecuaciones:



Posteriormente, el hierro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) reacciona con el oxígeno para formar hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), lo que ocurre a través de la ecuación 3.3.



Dependiendo del pH en el sistema sólido/líquido, el hierro férrico  $\text{Fe}^{3+}$  tiende a precipitar como hidróxido férrico al hidrolizarse en condiciones de  $\text{pH} > 3.5$  (Ecuación 3.4). Bajo condiciones de acidez, el ion férrico  $\text{Fe}^{3+}$  permanece en solución y puede desempeñar el papel de oxidante (Ecuación 3.5)



Se ha reportado en la literatura que ciertas bacterias pueden acelerar la velocidad con la cual ocurren las reacciones anteriormente descritas (Evangelou y Zhang 1995). La bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* es capaz de oxidar compuestos de azufre reducidos, así como oxidar el hierro ferroso en férrico. Otras bacterias conocidas que pueden catalizar la oxidación de los sulfuros metálicos son *Thiobacillus thiooxidans* y *Sulfolobus*.

La oxidación catalizada por bacterias ocurre en función de ciertos parámetros como:

- Temperatura.
- pH.
- Disponibilidad de oxígeno.
- Disponibilidad de dióxido de carbono (fuente de carbono para la reproducción de las células).
- Nutrientes (Nitrógeno y Fósforo).
- Considerable área superficial del mineral sulfuroso expuesto.

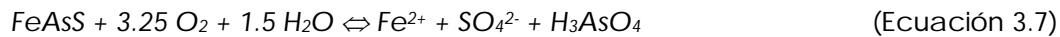


En general, las velocidades de las reacciones de oxidación aumentan con un incremento de temperatura. Como regla empírica, las velocidades de reacción pueden duplicarse por cada 10°C de aumento de temperatura. El proceso de oxidación del sulfuro es exotérmico, genera calor y aumenta la temperatura en el sitio de la reacción, por lo que el fenómeno en si puede generar la temperatura necesaria para aumentar la velocidad de la reacción. Se han registrado temperaturas superiores a los 50°C en almacenamientos de residuos mineros ubicadas en regiones cuya temperatura de aire ambiental es menor a 5°C.

La oxidación inorgánica de los sulfuros metálicos puede crear condiciones ideales para el crecimiento de las bacterias oxidantes. La producción de H<sup>+</sup> y la consiguiente disminución del pH, hasta un nivel adecuado para las bacterias y el aumento de la temperatura son condiciones ideales para la actividad bacteriana.

Además de la pirita, arsenopirita y pirrotita, los otros sulfuros metálicos comúnmente encontrados en jales, también se pueden oxidar a través de las reacciones que se presentan a continuación:

Arsenopirita (FeAsS)



Galena (PbS)



Esfalerita (ZnS)



Calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>)



### 3.3.2 Neutralización

El proceso mediante el cual se consume ácido se denomina "neutralización" donde participan un ácido y una base. En general, cuando la capacidad consumidora de ácido en los jales (potencial de neutralización) excede al potencial de generación de ácido, se consumirán todos los protones y el agua que drene del depósito tendrá un pH cercano al neutro.

Existe una serie de minerales que pueden consumir acidez y neutralizar el drenaje ácido. Entre los minerales que consumen ácido se encuentran carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos.

El mineral más común que consume ácido es el carbonato de calcio (calcita  $CaCO_3$ ), que consume acidez a través de la formación de bicarbonato  $HCO_3^-$  (Ec. 3.11) o ácido carbónico  $H_2CO_3$  (Ec. 3.12). La calcita tiende a neutralizar soluciones hasta valores de pH entre 6.0 y 8.0 .

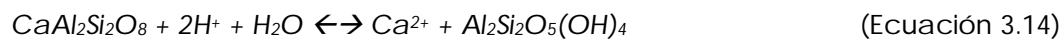


Otro carbonato que puede participar en la neutralización del DAM es la siderita ( $FeCO_3$ ). Este mineral es menos soluble que la calcita, tendiendo a amortiguar el pH en el rango de 4.5 a 6.0 .

Los minerales que proporcionan alcalinidad, luego del consumo de los minerales carbonatados, generalmente son los hidróxidos. En la ecuación 3.13 se muestra la reacción de consumo de acidez ( $H^+$ ) por la disolución del  $Al(OH)_3$  .



Cuando se han agotado los carbonatos y los hidróxidos, entonces se propicia la alteración de los aluminosilicatos. Este proceso consume protones ( $H^+$ ) y libera cationes (Lin, 1997). En la ecuación 3.14 se puede observar la alteración de aluminosilicatos (anortita) que ocurre por el consumo de  $H^+$ , lo que permite neutralizar el drenaje ácido.



La importancia de la neutralización del drenaje ácido por la disolución de carbonatos, hidróxidos y por la alteración de aluminosilicatos, es que bajo condiciones de pH neutro, la mayoría de metales presentan baja solubilidad y precipitan en la solución en forma de hidróxidos u óxidos metálicos; lo que es un mecanismo natural de retención de contaminantes.

### 3.4 Pruebas utilizadas para valorar y/o predecir el drenaje ácido de minas en jales

La valoración y/o predicción del potencial de generación de ácido y lixiviación de metales es muy importante desde una perspectiva ambiental y también desde la económica.

La identificación anticipada de los materiales potencialmente generadores de ácido y el desarrollo de un plan de manejo adecuado de los desechos pueden reducir considerablemente los problemas ambientales de largo plazo y los costos de las medidas correctivas.

Los objetivos de valorar y/o predecir el drenaje ácido de minas son:

- La caracterización de los jales para identificar el potencial de generación de ácido, el potencial de neutralización y la lixiviación de contaminantes.
- La predicción de la calidad del agua del drenaje ácido con miras a desarrollar un sistema de tratamiento.

Considerando que la generación del DAM en los jales, esta función del balance entre los sulfuros metálicos (productores potenciales de ácido) y los minerales alcalinos (consumidores potenciales de ácido); para la adecuada valoración y/o predicción del comportamiento de los jales con relación al peligro potencial que representan para el ambiente, se recomienda realizar pruebas del tipo indicativo y/o predictivo (Lawrence 1990).

Existen tres tipos principales de pruebas que se utilizan para la predicción y son:

- Pruebas de extracción.
- Pruebas estáticas de balance ácido-base.
- Pruebas cinéticas.

### **3.4.1 Pruebas de extracción**

Son pruebas de tipo indicativo que se realizan con el fin de determinar los componentes fácilmente solubles que se pueden dispersar en el ambiente.

La prueba consiste en mezclar la muestra de jales con agua meteórica o un ácido débil en una proporción de 1:20 y se agita para mantener los sólidos en suspensión por 18 a 24 horas. El pH final de la solución indica la capacidad amortiguadora del material y el extracto final se analiza por parámetros tales como pH, Eh, conductividad, sulfatos, y elementos tóxicos disueltos. Las metodologías de mayor aceptación para realizar estas pruebas son: 1) USEPA 1312 y 2) la prueba modificada de la ASTM D3987-85 (U.S. Geological Survey y American Society for Testing and Materials).

### 3.4.2 Pruebas estáticas

Son pruebas del tipo predictivo y se aplican para pronosticar el potencial para la producción de DAM de los jales, en el futuro. Los resultados de las pruebas estáticas permiten estimar el balance entre los minerales potencialmente generadores de ácido y aquellos potencialmente consumidores de ácido en una muestra.

Estas pruebas se conducen de manera simple, rápida y con costos relativamente bajos.

Las pruebas estáticas son útiles sólo para predicciones cualitativas del potencial DAM. El procedimiento más utilizado para estimar el balance entre los minerales productores de acidez y los neutralizadores es el propuesto por Lawrence (1990, 1997), denominado "Prueba Modificada de Balance Ácido-Base (PM - ABA)", que consiste en determinar en la muestras de jales:

- a) El Potencial de neutralización (PN), que está dado por la presencia de minerales que contienen carbonatos.
- b) El Potencial de acidez (PA), que está dado por la presencia de minerales que contienen azufre.

Para determinar el Potencial de Neutralización (PN) se determinan los carbonatos por titulación. La muestra se agita durante 24 horas y después de que se haya completado la acidificación, se titula el ácido que no ha sido consumido con una base estandarizada (NaOH) a un pH = 8.3, luego se calcula el equivalente de carbonato de calcio a través de la ecuación:

$$PN = [(N\text{NaOH} \times \text{Vol. NaOH (ml)}) - (N\text{HCl} \times \text{Vol HCl. (ml)}) \times 50] / [\text{peso (g)}]$$

Para determinar el Potencial de Acidez (PA), la PM-ABA solamente toma en cuenta la cantidad de azufre que se encuentra en forma de "sulfuro" y se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$PA = \% \text{ de azufre como sulfuro } [\%S^{2-}] \times 31.25^1$$

<sup>1</sup> (El factor 31.25 se basa en la acidez generada, según se derivó por estequiometría química, para la oxidación completa de la pirita y la subsiguiente hidrólisis del Fe<sup>3+</sup> generado. Por tanto, este factor relaciona la acidez total producida con la alcalinidad equivalente como CaCO<sub>3</sub> requerida para la neutralización)

$$\% \text{ de azufre como sulfuro } (S^{2-}) = \% \text{ azufre total} - \% \text{ azufre como sulfato } (S^{6+})$$

La determinación del potencial de acidez (PA) y el potencial de neutralización (PN) permite valorar el potencial de generación de drenaje ácido de mina (DAM) a través de la relación entre PN y PA. Internacionalmente es aceptado que las muestras con una relación  $PN/PA > 3$ , se pueden considerar como No generadoras de DAM; en cambio, las muestras con una relación  $PN/PA < 1$ , se consideran generadoras potenciales de drenaje ácido de minas. Generalmente las muestras con una relación  $PN/PA$  entre 1 y 3 no son ni claramente generadoras ni consumidoras de ácido.

### **3.4.3 Pruebas cinéticas**

Las pruebas cinéticas consisten en someter a intemperismo acelerado a las muestras, bajo condiciones controladas de laboratorio. Una de las pruebas cinéticas más utilizadas es la prueba de celdas húmedas, que está diseñada para simular los procesos de intemperismo geoquímico bajo condiciones de oxidación óptimas. La muestra se coloca en una celda, de 20 cm de diámetro donde se somete a ciclos semanales de aire seco y húmedo (tres días cada uno) y un día de lavado con agua destilada; y evaluación del lixiviado.

Los parámetros típicos que se controlan incluyen el pH, potencial redox, acidez, alcalinidad, sulfatos, conductividad y metales disueltos. El tiempo de duración de la prueba varía según los resultados del lavado con agua semanal y el objetivo de la prueba; se considera que el tiempo mínimo de prueba es de 20 semanas, dependiendo del intervalo de retardación pero, con frecuencia, se requieren periodos de más de 20 semanas, para definir la composición química del agua.

Las pruebas proporcionan información sobre la calidad del agua del drenaje que se producirá debido a la oxidación de los materiales evaluados.

El objetivo de las pruebas cinéticas es confirmar el potencial de generación de ácido, determinado con las pruebas estáticas de balance ácido-base, y predecir la calidad del agua del drenaje.

## **3.5 Valoración y/o predicción del drenaje ácido de minas de jales en México**

En el 2004 se publicó la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales.

De acuerdo a esta NOM-141, para valorar la peligrosidad de los jales, solamente se consideran las pruebas de extracción y de balance ácido-base.

En cuanto a la prueba de extracción, en esta NOM se señala que si la concentración en el extracto (obtenido mediante la prueba modificada ASTM 3987-85) de uno o varios de los elementos listados es superior a los límites permisibles señalados en la misma, los jales se consideran peligrosos por su toxicidad.

En cuanto a la prueba de balance ácido-base, esta NOM señala que si la relación PN/PA < 1.2, los jales se consideran generadores potenciales de drenaje ácido.

Es importante aclarar que las pruebas señaladas en la normatividad ambiental mexicana para valorar la generación potencial de acides en jales tienen un fundamento científico muy sólido pero de alcance limitado debido a:

1. La prueba de extracción: Es una prueba de tipo indicativo que determina la solubilidad de metales y metaloides bajo las condiciones actuales de pH que tiene el residuo y los componentes fácilmente solubles que se pueden dispersar en el ambiente pero no permite hacer la valoración para el futuro; lo que es una debilidad muy grande, si se toma en cuenta que el fenómeno del DAM puede durar décadas y a veces hasta siglos (Holmstrom et al. 2001).
2. La prueba de balance ácido-base solamente permite valorar el papel de los compuestos alcalinos en el proceso de neutralización, pero no toma en cuenta otros minerales alcalinos que pueden contribuir a este proceso de neutralización como los aluminosilicatos, que tienen una cinética lenta para reaccionar. Así mismo, esta prueba solamente permite valorar el papel de la pirita en la generación de acidez y no toma en cuenta el papel de los otros sulfuros metálicos como galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>) y arsenopirita (FeAsS), que se encuentran comúnmente en los jales de yacimientos polimetálicos (Morales Arredondo, 2001).

## IV METODOLOGÍA

### 4.1 Selección de muestras de jales

A partir del estudio ambiental realizado en los jales de Tizapa y Charcas (Martínez Soriano, 2011 y Luna Celis, 2008) véase sección 2.2.8 y 2.3.8 de este documento, se llegó a la conclusión que los jales de Tizapa son generadores potenciales de drenaje ácido de minas (DAM); mientras que los jales de Charcas no.

Con el fin de realizar pruebas cinéticas para confirmar el potencial de generación de DAM y predecir la calidad de agua del drenaje de los jales de Tizapa y Charcas, se seleccionaron 7 muestras, basados en los resultados obtenidos en estudios anteriores realizados por Martínez Soriano (2011) y Luna Celis (2008).

#### 4.1.1 Muestras de los jales de Tizapa

Se seleccionaron las muestras de la presa de jales de Tizapa JTZ1, JTZ6 y JTZ11 (Fig. 4.1), que son jales inalterados de color gris con valores de pH varían entre 5.1 y 6.4, los cuales indican que actualmente, en estos jales, no hay generación de drenaje ácido de minas. Sin embargo, los resultados de las pruebas de balance ácido-base, en estas tres muestras, permiten pronosticar que los jales de Tizapa serán generadores de acidez cuando se oxiden, debido a que tienen un alto potencial de acidez (PA varía entre 502.56 y 589.86 kgCaCO<sub>3</sub>/t) y bajo potencial de neutralización (PN varía entre 12.34 y 25.53 kg CaCO<sub>3</sub>/ton), (véase sección 2.2.8, Tabla 2.1) lo que indica que no tienen suficiente cantidad de minerales neutralizadores para consumir la acidez generada.

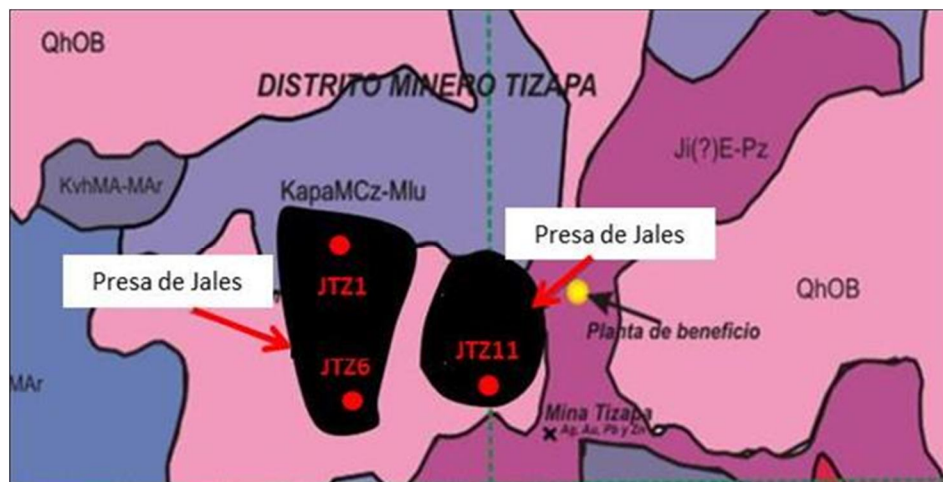


Figura 4.1 Ubicación de muestras de jales de Tizapa (Fuente: Martínez-Serano, 2011)

#### 4.1.2 Muestras de los jales de Charcas

Se seleccionaron las siguientes muestras de las presas de jales de Charcas: a) Muestras de jales inalterados de color gris JCHIII, JCHVII, JCHX y b) Muestras de jales oxidados de color café-rojizo JCHVB. Los valores de pH de estas muestras de jales varían entre 7.2 y 8.4, lo que indica que actualmente, en estos jales, no hay generación de drenaje ácido de minas.

La ubicación de estas muestras se puede observar en la Figura 4.2.

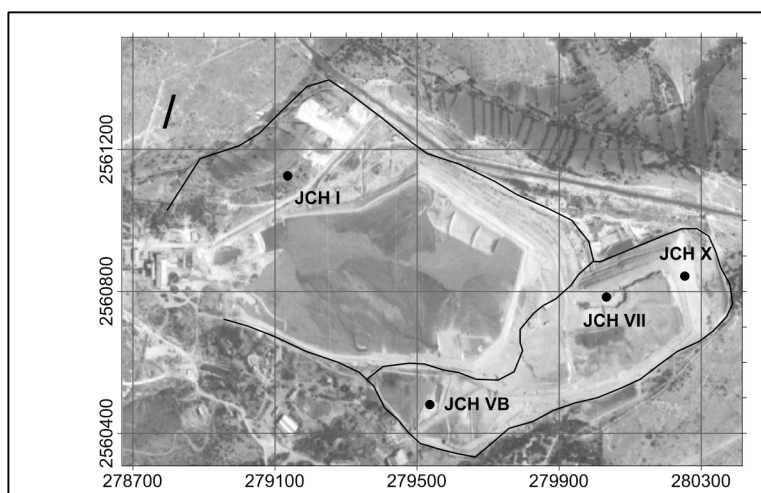


Figura 4.2 Ubicación de muestras de jales de Charcas  
(Fuente: Luna-Celis, 2008)

## 4.2 Pruebas cinéticas

### 4.2.1 Diseño experimental de las celdas

Para el diseño de las celdas de humedad se consideraron varios tipos, debido al material disponible y a la cantidad de muestra se optó por el diseño de celdas de humedad para jales de Morin y Hutt (1997). Consiste en elaborar un sistema en el cual se deberá suministrar aire seco y húmedo a las celdas durante un periodo de 20 semanas en condiciones controladas para simular el intemperismo que sufrirían a lo largo del tiempo.

Para esto se escogieron materiales inertes como tubos de PVC, mangueras de plástico para las conexiones y acrílico para las celdas.

Se utilizó una mesa especial que tiene el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la UNAM, ya que es una mesa con orificios circulares donde se pueden poner las celdas y a través de las cavidades se puede poner una llave de salida para recolectar el lixiviado de la celda.



Se construye el sistema de aire, que consiste en armar tubos de PVC con 7 salidas y conectar las mangueras de hule a cada celda, para que distribuyera el aire seco y húmedo a todas las celdas, 3 de Tizapa y 4 de Charcas (Figura 4.3), quedando una celda separada del sistema ya que sería nuestra celda de blanco, la cual es el control que se lleva para garantizar que los materiales utilizados no influyan en los lixiviados, el sistema terminado se conecta al suministro de aire comprimido del Laboratorio.

La celda consiste en un cilindro de acrílico con medidas de 20 cm de alto por 10 cm de diámetro, en la parte inferior tiene una tapa con una salida donde se conecta la llave de paso para recolectar el lixiviado, en un costado tiene otra entrada para conectar el sistema de aire y pueda oxidar el jal, en la parte superior tiene una salida para dejar escapar el aire suministrado así como para suministrar el agua destilada para el lavado, se implementó un cilindro interno de PVC en la celda para poder darle altura a la muestra, debido a la cantidad que se estaba manejando y para que sostuviera el soporte de acrílico donde descansaría el jal, también se incluyó una cama de fibra de vidrio para que no hubiera fuga de material al momento del lavado.



Figura 4.3 Fotografía del sistema de celdas de humedad.

#### 4.2.2 Armado de las celdas de humedad

Se tomó el tubo de acrílico y se selló por la parte inferior con teflón para que no haya fuga, se inserta un tubo de PVC de 10 cm para darle "altura" a la muestra, encima de esto se pone un disco de acrílico con orificios para que pueda pasar el lixiviado y sea la base de la celda, encima de esto se pone una "cama" de fibra de vidrio para que detuviera las partículas más finas del jal, actuando como un filtro y evitar las pérdidas del jal al momento de hacer el lavado. Después se colocan 300 gramos de jales dentro de la

celda y con eso queda completada la celda de humedad y esta lista para conectarse al sistema de aire comprimido. (Figura 4.4 ).

También se arma una celda de “blanco”, la cual consiste en la misma estructura que la celda de humedad, con la única diferencia de que esta no lleva jal, el objetivo es comprobar que el sistema es inerte y no afectará químicamente al lixiviado obtenido.



Figura 4.4 Fotografía de celda de humedad armada.

#### 4.2.3 Comienzo del proceso de 20 semanas de las celdas de humedad.

Una vez armado el sistema completo, celdas y la conexión al suministro de aire, se procede a iniciar con el proceso de 20 semanas de operación (Figura 4.6).

Se lleva una bitácora del experimento donde se anotaron las características de cada muestra de jal así como cualquier observación a lo largo del experimento.

Se inicia con un primer lavado que denominamos “Semana cero”, consiste en añadir a todas las celdas 300 ml de agua destilada por la parte superior para que atraviese todo el sistema y el lixiviado obtenido se recupera por la parte inferior, previamente se midieron el pH y conductividad eléctrica del agua utilizada y se anotaron sus valores en la bitácora del experimento.

Realizado este proceso en las todas las celdas, concluye la semana cero, a partir de ahí, comenzaran los ciclos semanales de operación, cada semana se divide en 3 partes, los 3 primeros días, las celdas serán sometidas a aire seco solamente, durante este tiempo circulará el aire seco ininterrumpidamente en el interior de las celdas.

Los siguientes 3 días, de igual manera, se les proporciona aire húmedo ininterrumpidamente a todas las celdas.

El séptimo día será el del lavado, que consiste en introducir 300 ml de agua destilada por la parte superior a todas las celdas, dejando que atraviese el jal y se recolecta el lixiviado por la parte inferior.

Se abre la llave de paso del fondo de las celdas para dejar pasar el lixiviado y se recolecta en un vaso de precipitado de 250 ml, se toman las lecturas de pH y conductividad eléctrica con los instrumentos previamente calibrados, se filtra y se deposita en un bote de plástico de 125 ml con tapa, se refrigera para su posterior análisis de cromatografía e ICP, el mismo proceso es para la celda de blanco.

También se toma una muestra del agua destilada utilizada en el lavado para practicarle los mismos análisis que a los lixiviados y a la celda de blanco.

En total se recolectan 9 muestras semanalmente, 3 de Tizapa, 4 de Charcas, 1 del blanco y 1 del agua destilada empleada, las cuales serán sometidas al análisis de sus componentes. (Figura 4.5)

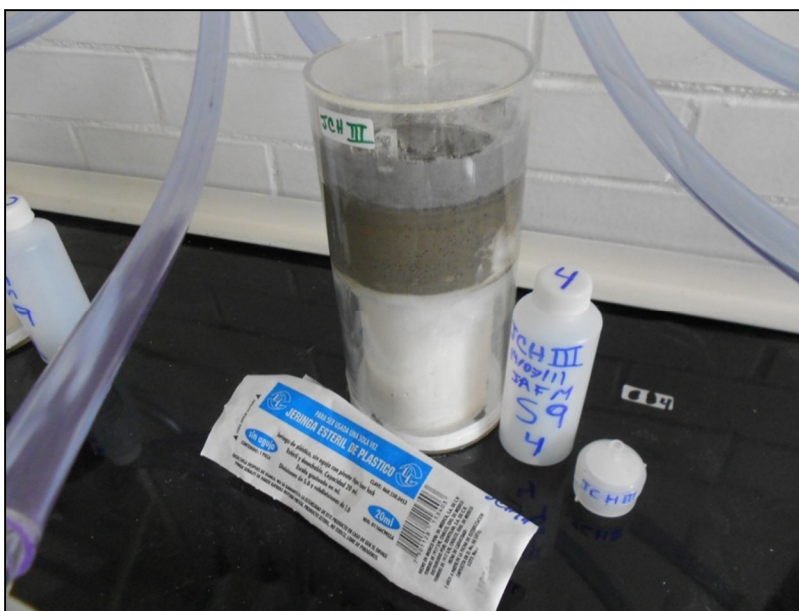


Figura 4.5 Fotografía de la recolección del lixiviado de la celda.

Este proceso se llevara a cabo a lo largo de 20 semanas hasta recolectar 189 muestras, 9 por cada semana, con esto concluye la parte de las celdas, quedándose pendiente los análisis practicados a los lixiviados obtenidos de las celdas.

#### 4.3 Análisis de lixiviados de las celdas de humedad

Los lixiviados colectados en la "semana cero" y en las 20 semanas, que dura la prueba, se filtraron usando un filtro de 0.45 micrómetros y posteriormente analizados para determinar

los parámetros generales (pH y conductividad eléctrica), iones mayoritarios y elementos potencialmente tóxicos. Cabe mencionar que los mismos análisis se realizaron tanto para el agua destilada empleada en el lavado como en el lixiviado de la celda de blanco.

Los valores de pH se determinaron utilizando un potenciómetro Hanna modelo HI 98185 pH/ORP/ISE. La conductividad eléctrica se determinó utilizando un Medidor de conductividad eléctrica marca Hanna modelo HI 99301, EC/TDS/Temperature.

Las concentraciones de iones mayoritarios ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) se determinaron utilizando la técnica de cromatografía iónica (Cromatógrafo Modelo 883 Basic IC Plus). Además, se cuantificaron las concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$  por titulación. Los análisis de los iones mayores fueron reportados con un balance de carga  $\leq 7\%$ .

En muestras seleccionadas (lixiviados de las semanas 0, 5, 10, 15 y 20) se determinaron las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) utilizando la técnica de Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-EOS-Perkin Elmer, Optima 4300 DV). Los EPT analizados fueron: As, Ba, Cd, Ag, Pb, Se, Cu, Zn, Fe, Al y Si. Se seleccionaron estos EPT porque hay información de contenido total de éstos en los jales de estudio (ver Tablas 2.1 y 2.3 del capítulo II). Para evaluar exactitud de los análisis, fueron utilizados estándares Perkin Elmer.



Figura 4.6 Sistema de celdas de humedad armado con las muestras de jales de Charcas y Tizapa.

## V RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Jales de Tizapa

#### 5.1.1 Celda JTZ1

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados obtenidos, durante las 20 semanas de prueba, en los lixiviados de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ1.

#### A) Parámetros generales: pH y Conductividad Eléctrica (CE)

En todo el periodo de la prueba, se puede observar que los valores de pH disminuyen de 6.4 (semana 0) hasta llegar a un mínimo de 2.9 (semana 20), lo que indica que ha ocurrido la generación de drenaje ácido (Fig. 5.1.A).

A medida que se genera acidez, con el subsecuente descenso de los valores de pH, se puede observar un aumento en los valores de conductividad eléctrica (CE), lo que es una indicación indirecta que a medida que disminuye el pH se disuelven sales que liberan al medio acuoso sus iones respectivos. En la Fig. 5.1.B, se puede observar una tendencia clara hacia el aumento a medida que aumenta el tiempo del experimento. Al inicio de la prueba (semana 0), los valores de CE fueron de 0.33 mS/cm y aumentan hasta 2.67 mS/cm, en la semana 7. A partir de la semana 8, y hasta el fin de la prueba (20 semanas), los valores de CE muestran una tendencia a estabilizarse y varían entre 1.87 y 2.76 mS/cm.

#### B) Iones mayoritarios: Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Sodio ( $\text{Na}^+$ ), Potasio ( $\text{K}^+$ ), Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{1-}$ ) y cloruros ( $\text{Cl}^{-1}$ )

En la Fig. 5.2.A, se puede observar un comportamiento similar de las concentraciones de los cationes mayores  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ .

b.1) Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  de 1.61 mg/L, las que van aumentando, a medida que disminuyen los valores de pH, hasta alcanzar un máximo de 453.3 mg/L, en la semana 9. A partir de la semana 10, y hasta el fin de la prueba (20 semanas), los valores de  $\text{Ca}^{2+}$  muestran una tendencia a estabilizarse y varían entre 221 y 380 mg/L.

b.2) Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones de  $\text{Mg}^{2+}$  de 0.2 mg/L, las que van aumentando, a medida que disminuyen los valores de pH, hasta alcanzar un máximo de 451.66 mg/L, en la semana 8. A partir de la semana 9, y hasta el fin de la prueba, los valores de  $\text{Mg}^{2+}$  muestran una tendencia a estabilizarse y varían entre 83.23 y 313.79 mg/L.

En la misma Fig. 5.2.A, se puede observar un comportamiento similar de las concentraciones de los cationes mayores  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ .

b.3) Sodio ( $\text{Na}^+$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones de  $\text{Na}^+$  de 0.32 mg/L, las que van aumentando, a medida que disminuyen los valores de pH, hasta alcanzar concentraciones que varían entre 59.19 y 86.77 mg/L, en el transcurso de las semanas 7 y 10. En la semana 8 se observa un valor anómalo de 9.91 mg/L de  $\text{Na}^+$ . A partir de la semana 11 y hasta el final del experimento se observa una clara disminución de las concentraciones de  $\text{Na}^+$  en los lixiviados (entre 3.00 y 20.06 mg/L).

JTZ 1	pH	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>
		mS/cm	mg/L						
Semana 0	6.4	0.33	1.16	0.2	0.32	0.04	226.47	31.33	30.2
Semana 1	6.08	0.74	95.91	58.45	8.48	0.49	517.06	bld	3.4
Semana 2	5.05	1.22	134.47	172.14	13.53	3.29	1105.29	bld	7.2
Semana 3	5.1	1.43	bld	bld	14.49	1.69	1325.88	bld	5.7
Semana 4	4.61	1.6	132.34	295.34	17.29	3.23	1454.34	bld	23
Semana 5	4.39	2.33	253.61	410.16	14.29	1.15	2641.18	bld	7.2
Semana 6	4.22	2.16	336.84	191.76	59.19	26.98	2420	bld	40.4
Semana 7	4.07	2.65	363.2	279.21	86.77	10.89	2653.53	bld	24.9
Semana 8	4.09	2.67	328.77	451.66	9.91	2.31	2794.12	bld	2.3
Semana 9	3.76	2.41	453.37	177.38	65.59	16.81	2707.06	bld	6.8
Semana 10	3.55	2.32	408.46	128.44	75.65	13.81	2275.88	bld	12.1
Semana 11	3.81	2.29	380.29	208.1	6.02	17.38	2108.24	bld	6
Semana 12	3.56	2.1	366.82	210.73	5.3	3	2125.29	bld	17.4
Semana 13	3.42	2.62	372.58	246.93	6.46	3.69	2491.18	bld	46.8
Semana 14	3.48	2.76	345.14	313.79	8.76	2.08	2693.53	bld	5.3
Semana 15	3.14	2.7	328.77	298.68	7.61	3	2404.71	bld	bld
Semana 16	3.21	2.5	323.01	229.86	4.15	2.54	2357.06	bld	33.6
Semana 17	3.41	2.13	266.52	194.36	4.38	3.23	1680	bld	10.6
Semana 18	3.17	2.07	220.87	108.82	3	1.84	1680	bld	10.6
Semana 19	3.08	1.87	231.25	83.23	20.06	5.99	892.35	bld	3.4
Semana 20	2.92	2.17	248.54	102.37	10.38	5.53	892.35	bld	3.4

Tabla 5.1 Valores de pH, conductividad eléctrica (CE) y concentraciones de los iones mayoritarios en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ1; bld: debajo de los límites de detección.

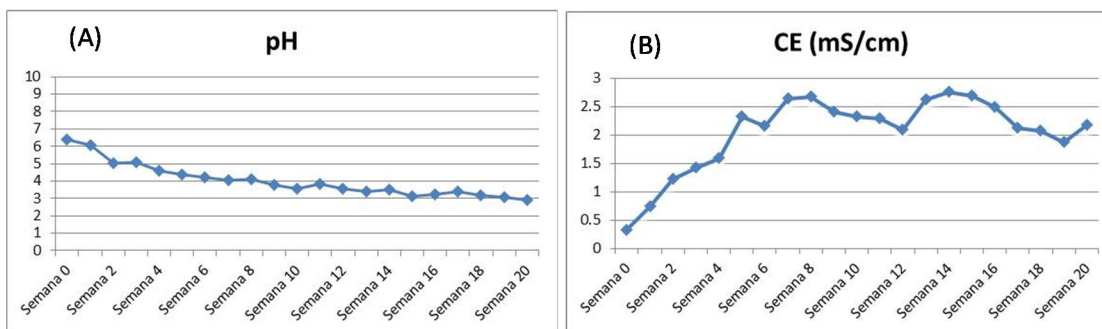


Figura 5.1 Comportamiento de los valores de pH (A) y conductividad eléctrica (B) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 1.

b.4) Potasio ( $K^+$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones de  $K^+$  de 0.04 mg/L, las que van aumentando, a medida que disminuyen los valores de pH, hasta alcanzar concentraciones que varían entre 10.89 y 26.98 mg/L, en el transcurso de las semanas 6 y 11. En la semana 8 se observa un valor anómalo de 2.31 mg/L de  $K^+$ . A partir de la semana 12 y hasta el final del experimento se observa una clara disminución de las concentraciones de  $K^+$  en los lixiviados (entre 2.08 y 5.99 mg/L).

En la Fig. 5.2.B, se puede observar que el comportamiento de las concentraciones de los aniones mayores ( $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^{1-}$ ,  $Cl^{1-}$ ) es muy diferente:

b.5) Sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones de  $SO_4^{2-}$  de 226 mg/L, las que van aumentando, a medida que disminuyen los valores de pH, hasta alcanzar un máximo de 2794 mg/L, en la semana 8. A partir de la semana 10 y hasta la semana 16, los valores de  $SO_4^{2-}$  muestran una tendencia a estabilizarse y varían entre 2357 y 2707 mg/L. A partir de la semana 17 y hasta la semana 20, se observa una tendencia hacia la disminución en las concentraciones de sulfatos en los lixiviados (entre 1680 y 890 mg/L).

b.6) Bicarbonatos ( $HCO_3^{1-}$ ): Al inicio de la prueba (semana 0) se registró una relativamente baja concentración de  $HCO_3^{1-}$  de 31.33 mg/L. A partir de la semana 1 y hasta la semana 20, en los lixiviados de estos jales no se detectaron concentraciones de  $HCO_3^{1-}$ .

b.7) Cloruros ( $Cl^{1-}$ ): El comportamiento de las concentraciones de  $Cl^{1-}$  es muy diferente al de los otros iones mayoritarios; ya que no es posible identificar una tendencia clara. A partir de la semana 1 y hasta la semana 20, las concentraciones de  $Cl^{1-}$  varían desde un mínimo de 3.4 mg/L (semanas 1, 19 y 20) hasta un máximo de 46.8 mg/L (semana 13). En el periodo de la prueba, las concentraciones de  $Cl^{1-}$  experimentan aumentos y disminuciones de manera intermitente.

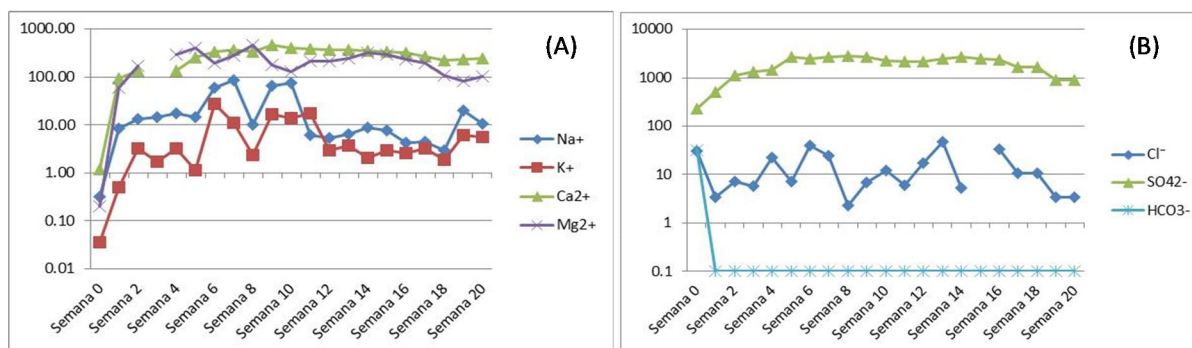


Figura 5.2 Comportamiento de las concentraciones de iones mayoritarios: (A) cationes mayoritarios (calcio  $Ca^{2+}$ , magnesio  $Mg^{2+}$ , sodio  $Na^+$  y potasio  $K^+$ ) y B) aniones mayoritarios (sulfatos  $SO_4^{2-}$ , bicarbonatos  $HCO_3^{1-}$ , cloruros  $Cl^{1-}$ ) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 1 (Escala logarítmica en el eje Y).

### C) Elementos potencialmente tóxicos: As, Ba, Cd, Ag, Pb, Se, Cu, Zn, Fe, Al y Si

Los resultados presentados en la Tabla 5.2 indican un comportamiento similar de las concentraciones de bario (Ba), plata (Ag) y selenio (Se). Al inicio del experimento (semana 0), y durante las 20 semanas de la prueba, no se detectaron concentraciones de estos elementos potencialmente tóxicos (EPT) o fueron relativamente muy bajas.

En la Fig. 5.3.A, se puede observar un comportamiento similar de las concentraciones de As, Cu, Fe y Al:

c.1) Arsénico (As): En la semana 0, se registraron concentraciones muy bajas de As (0.03 mg/L), las que van aumentando a medida que disminuye el pH de los lixiviados, hasta alcanzar un máximo de 0.43 y 0.34 mg/L de As en la semana 15 y 10, respectivamente.

c.2) Cadmio (Cd): En la semana 0, se registraron concentraciones bajas de Cd (0.15 mg/L), las que van aumentando hasta un máximo de 2.83 mg/L en la semana 5 y después experimenta una ligera disminución hasta 1.23 mg/L en la semana 10; para volver a aumentar a 2.13 mg/L en la semana 15 y luego volver a disminuir hasta 1.24 mg/L en la semana 20.

c.3) Plomo (Pb): En la semana 0, se registraron concentraciones bajas de Pb (0.23 mg/L), las que van aumentando a medida que disminuye el pH de los lixiviados, hasta alcanzar un máximo de 2.73 mg/L en la semana 10 y después disminuir hasta 1.24 mg/L en la semana 20.

c.4) Cobre (Cu): En la semana 0, se registraron concentraciones muy bajas de Cu (0.18 mg/L), las que van aumentando a medida que disminuye el pH de los lixiviados, hasta alcanzar un máximo de 16.02 mg/L en la semana 15, para después disminuir ligeramente a 12.76 mg/L, en la semana 20.

En la Fig. 5.3.B, se puede observar un comportamiento similar de las concentraciones de Cd y Zn y de Pb y Si.

c.5) Zinc (Zn): En la semana 0, se registraron concentraciones bajas de Zn (19.72 mg/L), las que van aumentando hasta un máximo de 260.5 mg/L en la semana 5 y después experimenta una ligera disminución hasta 142.43 mg/L en la semana 10, para volver a aumentar a 231.84 mg/L en la semana 15 y luego volver a disminuir hasta 147.04 mg/L en la semana 20.

c.6) Hierro (Fe): En la semana 0, no se detectaron concentraciones de Fe (bld); pero a medida que disminuye el pH de los lixiviados se observa un aumento de las concentraciones de Fe hasta alcanzar un máximo de 128.49 mg/L en la semana 20.

c.7) Aluminio (Al): En la semana 0, no se detectaron concentraciones de Al (bld); pero a medida que disminuye el pH de los lixiviados se observa un aumento de las concentraciones de Al hasta alcanzar un máximo de 2,46 y 2.42 mg/L en las semanas 15 y 20, respectivamente.

c.8) Silicio (Si): En la semana 0, se registraron concentraciones bajas de Si (2.79 mg/L), las que van aumentando a medida que disminuye el pH de los lixiviados, hasta alcanzar un máximo de 5.74 mg/L en la semana 15 y después disminuir ligeramente hasta 3.97 mg/L en semana 20.



JTZ 1	Elementos traza							Elementos mayores			
	mg/L										
	As	Ba	Cd	Ag	Pb	Se	Cu	Zn	Fe	Al	Si
Semana 0	bld	bld	0.15	bld	0.23	bld	0.18	19.72	bld	bld	2.79
Semana 5	0.16	bld	2.83	bld	1.58	bld	2.08	260.50	7.31	0.20	3.80
Semana 10	0.23	bld	1.32	bld	2.73	bld	14.68	142.43	46.71	1.34	1.05
Semana 15	0.43	bld	2.13	bld	1.30	bld	16.02	231.84	81.06	2.46	5.34
Semana 20	0.34	bld	1.24	bld	1.24	bld	12.76	147.04	128.49	2.42	3.97

Límites de detección (mg/L): As =0.1; Ba = 0.1; Cd = 0.1; Ag = 0.1; Pb = 0.5; Se = 0.5; Cu = 0.1, Zn = 0.5; Al = 0.5, Fe = 0.5, Si = 0.5 . bld: debajo de los límites de detección.

Tabla 5.2 Concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 1.

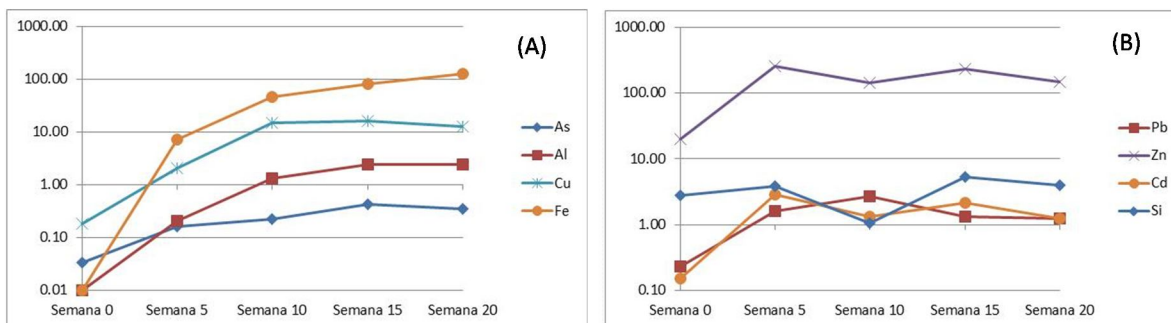


Figura 5.3 Comportamiento de las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 6: (A) arsénico (As), aluminio (Al), cobre (Cu), hierro (Fe). (B) plomo (Pb), zinc (Zn), cadmio (Cd) y silicio (Si) (Escala logarítmica en el eje Y).

### 5.1.2 Celda JTZ 6

En la Tabla 5.3 se muestran los resultados obtenidos, durante las 20 semanas de prueba, en los lixiviados de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 6.

#### A) Parámetros generales: pH y Conductividad Eléctrica (CE)

Durante todo el periodo de prueba, los valores de pH mostraron la tendencia a disminuir paulatinamente conforme pasa el tiempo (Figura 5.4 A), desde 6.36 hasta 3.92, que indica la generación de acidez y es un comportamiento parecido a la muestra JTZ 1.

La conductividad eléctrica (CE) por su parte, respondiendo a la generación de acidez, tiende al aumento desde 0.47 mS/cm (semana 0) hasta 1.29 mS/cm (semana 2). Después

de la semana 2, los valores de CE experimentan aumentos y disminuciones periódicas alcanzando máximos de 1.59 mS/cm (semana 7) y mínimos de 0.64 mS/cm (semana 11). Al final del experimento (semana 20) se registró una CE igual a 1.18 mS/cm.

**B) Iones mayoritarios: Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Sodio ( $\text{Na}^+$ ), Potasio ( $\text{K}^+$ ), Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{1-}$ ) y cloruros ( $\text{Cl}^{-1}$ )**

En la Tabla 5.3 y Fig. 5.5A, se muestran los valores y comportamiento de las concentraciones de los cationes mayores  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ .

b.1) Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ): En la semana 0, se registran concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  de 13.25 mg/L, que va aumentando hasta alcanzar un máximo de 485.36 mg/L (semana 3). A partir de la semana 4 se observa una disminución (19.83 mg/L) y una tendencia a la estabilización a partir de la semana 5 con concentraciones que varían entre 100 y 300 mg/L.

b.2) Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ): Se determinaron valores muy bajos en las primeras tres semanas (que no fueron detectados por la técnica de análisis hasta 14.29 mg/L). En la semana 4 se registra un aumento sustancial de 213.96 mg/L (el más alto durante todo el experimento). Entre la semana 5 y 20, las concentraciones de  $\text{Mg}^{2+}$  experimentan aumentos y disminuciones periódicas con mínimos de 15.7 mg/L y máximos de 150 mg/L.

b.3) Sodio ( $\text{Na}^+$ ): En la semana 0 se registran valores de 0.96 mg/L, que va aumentando a medida que avanza el experimento, para la semana 10, alcanza un máximo de 105.97 mg/L, de ahí comienza a disminuir sus valores y en la semana 18 llega 3.23 mg/L quedando finalmente en la semana 20 con 27.21 mg/L.

b.4) Potasio ( $\text{K}^+$ ): En la semana 0 se registran valores de 0.07 mg/L. A partir de la semana 1 se observa una tendencia hacia el aumento alcanzando un máximo de 41.29 mg/L, en la semana 10. Después de la semana 11 se observa una disminución de las concentraciones de  $\text{K}^+$  y finalmente a partir de la semana 16 se observa una tendencia a la estabilización con concentraciones entre 3.23 y 3.92 mg/L.

En la Tabla 5.3 y Fig. 5.5B, se muestran los valores y comportamiento de las concentraciones de los aniones mayores ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^{1-}$ ,  $\text{Cl}^{-1}$ ).

b.5) Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ): La concentración inicial, en esta muestra, fue de 564 mg/L ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Se observa un aumento de las concentraciones a partir de la semana 1 (1578 mg/L). A partir de la semana 2 y hasta el final del experimento se observan aumentos y disminuciones periódicas de las concentraciones de este anión. A partir de la semana 17 se observa una tendencia a la estabilización de las concentraciones de sulfatos, que varían entre 657 y 698.8 mg/L.

b.6) Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{1-}$ ): Al comenzar la prueba, semana 0, el lixiviado tuvo un valor de 274.17 mg/L, que disminuye a medida que avanza el experimento (15 mg/L y 122 mg/L en las semanas 2 y 3, respectivamente). A partir de la semana 3 y hasta el final del experimento no se detectaron concentraciones de  $\text{HCO}_3^{1-}$ .

b.7) Cloruros ( $\text{Cl}^{-1}$ ): El comportamiento de las concentraciones de  $\text{Cl}^{-1}$  es muy diferente al de los otros iones mayoritarios; ya que no es posible identificar una tendencia clara. En la semana 0 se registra una concentración de 16.98 mg/L, y a partir de la semana 1 y hasta la semana 20, las concentraciones de  $\text{Cl}^{-1}$  experimentan disminuciones y aumentos periódicos con máximos de 46.77 mg/L y mínimos de 4.91 mg/L.

JTZ 6	pH	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>
		mS/cm	mg/L						
Semana 0	6.36	0.47	13.25	2.38	0.96	0.07	564.00	274.17	16.98
Semana 1	5.97	0.99	483.25	0.46	24.9	3.69	1578.24	15	12.83
Semana 2	5.23	1.29	485.36	14.29	21.67	5.11	1561.76	122	9.81
Semana 3	5.91	1.23	185.93	bld	15.38	0.85	1062.35	bld	7.17
Semana 4	5.1	1.23	19.83	213.96	19.37	4.15	972.45	bld	46.77
Semana 5	5	1.21	97.76	144.33	9.91	1.38	1048.24	bld	6.79
Semana 6	4.81	0.94	112.49	75.54	50.62	8.28	758.82	bld	12.83
Semana 7	4.57	1.59	223.41	128.86	64.14	8.36	1241.18	bld	7.92
Semana 8	4.66	0.87	135.34	61.56	4.84	1.61	600	bld	3.02
Semana 9	4.39	1.08	224	36.61	76.52	17.14	835.29	bld	11.32
Semana 10	4.24	0.74	154.12	20.02	105.97	41.29	1547.06	bld	17.36
Semana 11	4.38	0.64	101.98	30.66	58.77	9.02	452.35	bld	2.64
Semana 12	4.32	0.7	113.89	49.57	6.69	2.77	461.18	bld	1.89
Semana 13	4.11	1.01	151.94	147.09	9.68	6.92	712.35	bld	28.3
Semana 14	4.01	1.09	145.71	125.65	17.98	5.99	743.53	bld	4.15
Semana 15	4.01	1.3	184.91	137.87	8.53	5.07	950	bld	1.51
Semana 16	3.97	1.38	209.81	150.09	6.23	3	1002.35	bld	3.77
Semana 17	4.01	1.21	175.68	120.35	6.69	3.46	698.82	bld	11.7
Semana 18	4.05	1.09	151.94	60.41	3.23	3.23	698.82	bld	11.7
Semana 19	3.92	0.9	138.33	43.81	4.38	3.92	657.06	bld	4.91
Semana 20	4.01	1.18	328.08	15.68	27.21	3.23	657.06	bld	4.91

Tabla 5.3 Valores de pH, conductividad eléctrica (CE) y concentraciones de los iones mayoritarios en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 6; bld: debajo de los límites de detección.

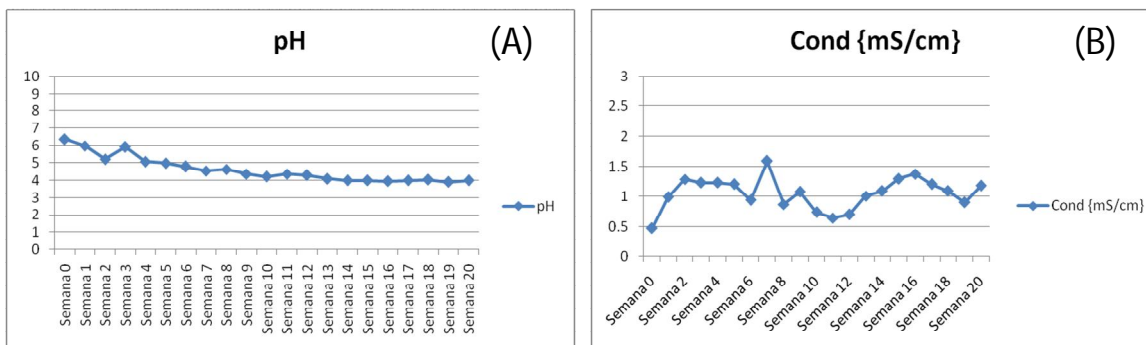


Figura 5.4 Comportamiento de los valores de pH (A) y conductividad eléctrica (B) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 6.

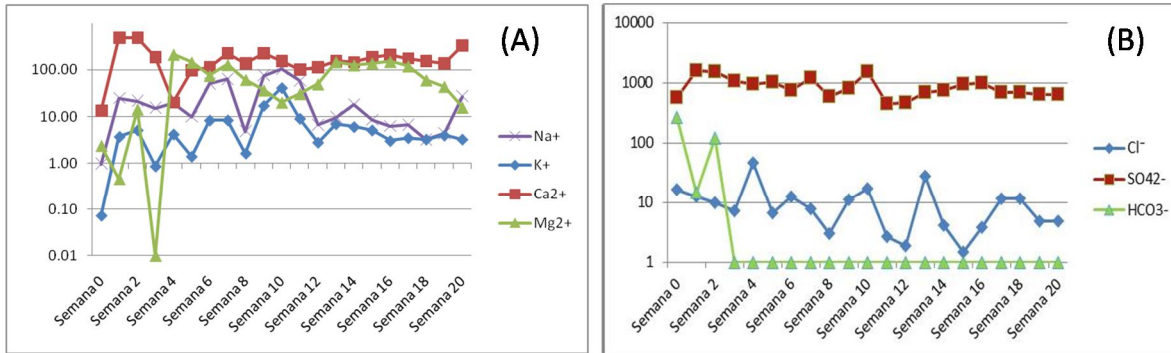


Figura 5.5 Comportamiento de las concentraciones de iones mayoritarios: (A) cationes mayoritarios (calcio  $\text{Ca}^{2+}$ , magnesio  $\text{Mg}^{2+}$ , sodio  $\text{Na}^+$  y potasio  $\text{K}^+$ ) y B) aniones mayoritarios (sulfatos  $\text{SO}_4^{2-}$ , bicarbonatos  $\text{HCO}_3^{1-}$ , cloruros  $\text{Cl}^{1-}$ ) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 6 (Escala logarítmica en el eje Y).

### C) Elementos potencialmente tóxicos: As, Ba, Cd, Ag, Pb, Se, Cu, Zn, Fe, Al y Si

En la Tabla 5.4, se muestran los resultados de las concentraciones de estos EPT.

Para el caso del arsénico (As), bario (Ba), plata (Ag), selenio (Se) y aluminio (Al), durante todo el tiempo del experimento, sus concentraciones fueron muy bajas o no detectadas por la técnica de análisis.

En la Fig. 5.6.A y 5.6.B se puede observar el comportamiento de las concentraciones de Cd, Pb, Cu, Zn, Fe y Si:

c.1) Cadmio (Cd): El valor inicial del Cd en los lixiviados (semana 0) fue 0.19 mg/L. Las concentraciones de Cd alcanzan un máximo de 0.9 mg/L en la semana 5, que disminuyen hasta valores entre 0.3 mg/L (semana 15) y 0.22 mg/L (semana 20).

c.2) Plomo (Pb): El valor inicial del Pb en los lixiviados (semana 0) fue 0.34 mg/L. Las concentraciones de Pb alcanzan un máximo de 2.58 mg/L en la semana 10, que disminuyen hasta valores entre 0.54 mg/L, en la semana 20.

c.3) Cobre (Cu): El valor inicial del Cu en los lixiviados (semana 0) fue 0.19 mg/L. Se registró un aumento paulatino a medida que avanzó el experimento hasta alcanzar un valor máximo de 0.28 mg/L, en la semana 20.

c.4) Zinc (Zn): El valor inicial del Zn en los lixiviados (semana 0) fue 21.44 mg/L. Las concentraciones de Zn alcanzan un máximo de 85.57 mg/L en la semana 5, que disminuyen hasta valores entre 33.55 mg/L (semana 15) y 24.92 mg/L (semana 20).

c.5) Hierro (Fe): En el lixiviado inicial (semana 0) el Fe no fue detectado. A medida que avanzó el experimento, se registró un aumento paulatino hasta alcanzar un valor máximo de 2.9 mg/L (semana 15) y 2.43 mg/L (semana 20).

c.6) Silicio (Si): En el lixiviado inicial (semana 0) la concentración de Si fue de 2.7 mg/L, que aumenta ligeramente a 3.41 mg/L en la semana 5. En la semana 10 no se detectó Si y después se registra un aumento hasta 3.53 mg/L (semana 15) y 3.27 mg/L (semana 20).

JTZ 6	Elementos traza							Elementos mayores			
	mg/L										
	As	Ba	Cd	Ag	Pb	Se	Cu	Zn	Fe	Al	Si
Semana 0	bld	bld	0.19	bld	0.34	bld	0.19	21.44	bld	bld	2.7
Semana 5	bld	bld	0.9	bld	1.79	bld	0.16	85.57	0.75	bld	3.41
Semana 10	bld	bld	0.24	bld	2.58	bld	0.22	24.88	1.46	bld	bld
Semana 15	0.13	bld	0.3	bld	0.61	bld	0.26	33.55	2.9	bld	3.53
Semana 20	bld	bld	0.22	bld	0.54	bld	0.28	24.92	2.43	bld	3.27

Limites de detección (mg/L): As =0.1; Ba = 0.1; Cd = 0.1; Ag = 0.1; Pb = 0.5; Se = 0.5; Cu = 0.1, Zn = 0.5; Al = 0.5, Fe = 0.5, Si = 0.5

Tabla 5.4 Concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 6 ; bld: debajo de los límites de detección.

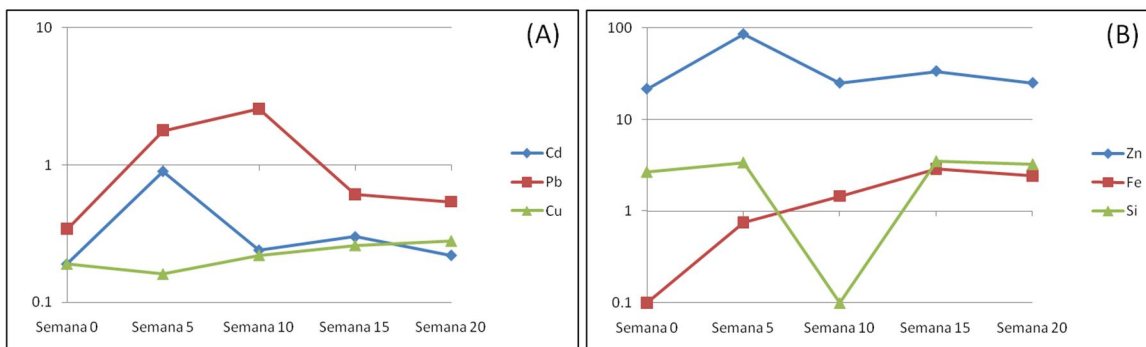


Figura 5.6 Comportamiento de las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 6: (A), cadmio (Cd), plomo (Pb) y cobre (Cu). (B) zinc (Zn), hierro (Fe) y silicio (Si); (Escala logarítmica en el eje Y).

### 5.1.3 Celda JTZ 11

En la Tabla 5.5 se muestran los resultados obtenidos, durante las 20 semanas de prueba, en los lixiviados de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 11.

#### A) Parámetros generales: pH y Conductividad Eléctrica (CE)

Durante las 20 semanas, que dura la prueba, se puede observar que los valores de pH se mantienen ligeramente básicos. Al inicio de la prueba el valor de pH fue de 7.7 y se mantiene entre 7.63 y 8.61 hasta el final, lo que indica que no ha ocurrido la generación de drenaje ácido.

Los valores de la conductividad eléctrica (CE) en el lixiviado inicial fue relativamente alto (2.50 mS/cm). A partir de la semana 1 y hasta la semana 20 los valores de CE disminuyen, pero se mantiene relativamente altos y muestran una tendencia hacia la estabilidad variando entre 1.55 y 1.83 mS/cm. Estos valores de CE relativamente altos sugieren que bajo las condiciones neutras del medio se disuelven sales que liberan sus respectivos iones al medio acuoso.

#### B) Iones mayoritarios: Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Potasio ( $\text{K}^+$ ), Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{1-}$ ) y cloruros ( $\text{Cl}^{-1}$ )

En la Fig. 5.8.A, se puede observar un comportamiento similar de las concentraciones de los cationes mayores  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , que muestran una tendencia general al aumento.

b.1) Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ): En el lixiviado inicial la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  fue de 79.4 mg/L. Se registró un aumento paulatino de las concentraciones que variaron entre 118.74 y 522.52 mg/L. El valor máximo se registró en la semana 6 con 522.52 mg/L. En las últimas semanas del experimento las concentraciones variaron entre 350.9 y 386.64 mg/L.

b.2) Sodio ( $\text{Na}^+$ ): En la semana 0 se registró un valor de 12.39 mg/L, el cual va aumentando hasta valores entre 18.91 y 100.2 mg/L. El valor máximo se determinó en la semana 10. A partir de la semana 11, las concentraciones de  $\text{Na}^+$  disminuyen sustancialmente hasta llegar al valor mínimo de 3.92 mg/L en la semana 20.

b.3) Potasio ( $\text{K}^+$ ): En la semana 0 se registró un valor de 0.41 mg/L, el cual va aumentando hasta 18.28 mg/L, el cual fue su valor máximo para la semana 9. A partir de la semana 10 las concentraciones de  $\text{K}^+$  disminuyen sustancialmente hasta llegar a 7.38 mg/L en la semana 20.

b.4) Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ): De manera general, se puede afirmar que las concentraciones de este catión muestran una tendencia al aumento; pero muestran un comportamiento algo diferente a los otros cationes mayores. El lixiviado inicial la concentración de  $\text{Mg}^{2+}$  fue de 13 mg/L y aumenta hasta un máximo de 130.49 mg/L en la semana 1. A partir de la semana 2 y 3 las concentraciones disminuyen por debajo de los límites de detección y a partir de la semana 4 y hasta el final del experimento las concentraciones varían entre 14.06 y 29.51 mg/L con unos mínimos de 0.46 y 1.15 mg/L en las semanas 15 y 16, respectivamente.

JTZ 11	pH	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>
		mS/cm	mg/L						
Semana 0	7.71	2.5	79.4	13	12.39	0.41	318.24	15.67	10.57
Semana 1	8.21	1.76	118.74	130.49	18.91	1.38	748.24	bld	6.42
Semana 2	7.63	1.62	501.03	bld	24.28	2.33	1248.24	bld	9.81
Semana 3	8.45	1.61	465.28	bld	25.23	1.53	1462.35	165	18.49
Semana 4	8.59	1.56	466.19	25.36	31.36	5.07	1313.62	130	38.72
Semana 5	8.59	1.57	434.6	23.98	23.06	2.31	1367.65	bld	6.79
Semana 6	8.61	1.65	522.52	15.64	68.24	6.69	1536.47	bld	9.06
Semana 7	8.56	1.63	465.54	16.45	98.74	13.87	1209.41	bld	11.7
Semana 8	8.51	1.66	479.38	29.51	53.06	2.08	1481.76	bld	5.66
Semana 9	8.08	1.58	476.32	16.68	90.99	18.28	1441.76	bld	14.72
Semana 10	8.53	1.67	513.84	15.02	100.22	17.77	1553.53	bld	12.08
Semana 11	8.57	1.65	474.07	15.1	84.68	16.75	1460.59	bld	3.4
Semana 12	8.54	1.55	417.08	28.82	42.19	5.53	1294.12	bld	3.4
Semana 13	8.56	1.72	418	21.67	29.97	3.23	1461.76	105	35.47
Semana 14	8.14	1.7	393.33	27.67	35.74	6.23	1405.29	75	8.68
Semana 15	8.48	1.83	458.58	0.46	35.97	3.23	1371.18	113	1.51
Semana 16	8.43	1.68	384.8	1.15	29.97	2.31	1415.88	42	3.77
Semana 17	8.45	1.66	405.78	23.52	31.36	3.46	1121.18	30	8.68
Semana 18	8.37	1.57	350.91	16.37	26.05	5.76	1121.18	42	8.68
Semana 19	8.35	1.61	386.64	15.68	31.13	4.84	965.88	55	20.75
Semana 20	8.34	1.56	363.13	14.06	3.92	7.38	965.88	bld	20.75

Tabla 5.5 Valores de pH, conductividad eléctrica (CE) y concentraciones de los iones mayoritarios en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 11 bld: debajo de los límites de detección.

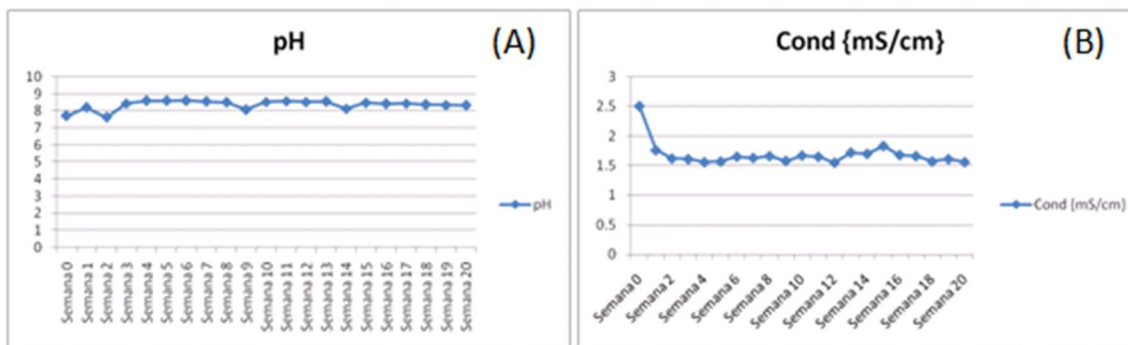


Figura 5.7 Comportamiento de los valores de pH (A) y conductividad eléctrica (B) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 11.

En la Fig. 5.8.B, se puede observar que el comportamiento de las concentraciones de los aniones mayores ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^{1-}$ ,  $\text{Cl}^{1-}$ ) es muy diferente:

b.5) Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  de 318.24 mg/L. A partir de la semana 1 y hasta la semana 20 se observa una tendencia al aumento con concentraciones que varían entre 748.24 y 1553.5 mg/L.

b.6) Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{1-}$ ): Al inicio de la prueba, semana 0, registró un valor relativamente bajo de 15.67 mg/L. En las semanas 1 y 2, no se detectaron  $\text{HCO}_3^{1-}$ ; pero en las semanas 3 y 4, se registraron concentraciones máximas de este anión (165 y 130 mg/L). A partir de la semana 5 y hasta la semana 12 tampoco se detectaron concentraciones de  $\text{HCO}_3^{1-}$  y a partir de la semana 13 y hasta la 19 se registraron valores entre 30 y 113 mg/L.

b.7) Cloruros ( $\text{Cl}^{1-}$ ): El comportamiento de las concentraciones de  $\text{Cl}^{1-}$  no presenta una tendencia clara. A partir de la semana 1 y hasta la semana 20, las concentraciones de  $\text{Cl}^{1-}$  varían desde un mínimo de 1.51 mg/L hasta un máximo de 38.72 mg/L. En el periodo de la prueba, las concentraciones de  $\text{Cl}^{1-}$  experimentan aumentos y disminuciones de manera intermitente.

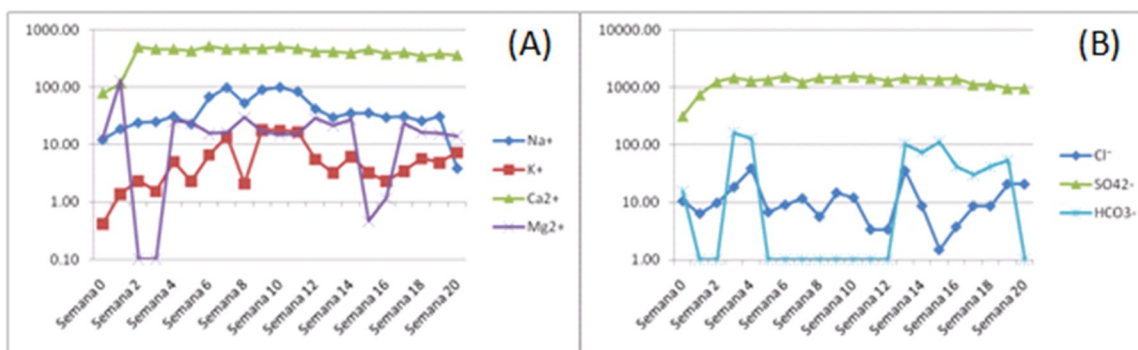


Figura 5.8 Comportamiento de las concentraciones de iones mayoritarios: (A) cationes mayoritarios (calcio  $\text{Ca}^{2+}$ , magnesio  $\text{Mg}^{2+}$ , sodio  $\text{Na}^+$  y potasio  $\text{K}^+$ ) y B) aniones mayoritarios (sulfatos  $\text{SO}_4^{2-}$ , bicarbonatos  $\text{HCO}_3^{1-}$ , cloruros  $\text{Cl}^{1-}$ ) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 11 (Escala logarítmica en el eje Y).

### C) Elementos potencialmente tóxicos: As, Ba, Cd, Ag, Pb, Se, Cu, Zn, Fe, Al y Si

Los resultados presentados en la Tabla 5.5 indican que con excepción de Zn y el Si, las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos analizados (As, Ba, Cd, Ag, Pb, Se, Cu, Fe y Al) fueron muy bajas o simplemente no fueron detectadas por la técnica de análisis, lo que es congruente con los valores ligeramente básicos del medio que limitan la liberación de estos contaminantes hacia la fase acuosa.

c.1) Zinc (Zn): En la semana 0, se registró una concentración relativamente baja de 0.05 mg/L, las que van aumentando hasta valores entre 0.12 y 0.19 mg/L en las semanas 5, 10 y 15. Finalmente en la semana 20 se observa una disminución hasta 0.02 mg/L.

c.2) Silicio (Si): En la semana 0 se registró una concentración de 9.49 mg/L, la cual va aumentando hasta valores entre 12.99 y 20 mg/L.



JTZ 11	Elementos traza							Elementos mayores			
	mg/L										
	As	Ba	Cd	Ag	Pb	Se	Cu	Zn	Fe	Al	Si
Semana 0	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	9.49
Semana 5	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	0.19	bld	bld	12.99
Semana 10	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	0.12	bld	bld	13.24
Semana 15	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	0.17	bld	bld	20
Semana 20	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	0.02	bld	bld	15.31

Limites de detección (mg/L): As = 0.1; Ba = 0.1; Cd = 0.1; Ag = 0.1; Pb = 0.5; Se = 0.5; Cu = 0.1, Zn = 0.5; Al = 0.5, Fe = 0.5, Si = 0.5

Tabla 5.6 Concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 11; bld: debajo de los límites de detección.

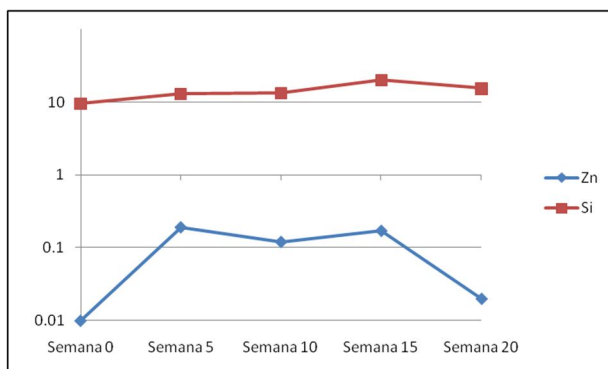


Figura 5.6 Comportamiento de las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JTZ 6: zinc (Zn) y silicio (Si); (Escala logarítmica en el eje Y).

#### 5.1.4 Discusión de los resultados de las pruebas cinéticas de celdas húmedas en los jales Tizapa

##### a) Pruebas estáticas versus pruebas cinéticas

El estudio previo realizado por Martínez Soriano (2011) en los jales de Tizapa indica que los resultados de las pruebas estáticas de balance ácido-base permiten pronosticar que serán generadores de acidez cuando se oxiden, debido a que tienen un alto potencial de acidez (PA) y bajo potencial de neutralización (PN):

- En la muestra JTZ1 reportan un "PA" = 586.25 de  $\text{kgCaCO}_3/\text{t}$  y un PN de 12.34  $\text{kgCaCO}_3/\text{t}$ , lo que permite calcular una relación PA/PN igual a 0.021
- En la muestra JTZ6 reportan un "PA" = 589.86 de  $\text{kgCaCO}_3/\text{t}$  y un PN de 17.38  $\text{kgCaCO}_3/\text{t}$ , lo que permite calculara una relación PA/PN igual a 0.029
- En la muestra JTZ11 reportan un "PA" = 502.56 de  $\text{kgCaCO}_3/\text{t}$  y un PN de 25.23  $\text{kgCaCO}_3/\text{t}$ , lo que permite calculara una relación PA/PN igual a 0.051

Para las tres muestras de los jales de Tizapa, la relación de PN/PA varía entre 0.021 y 0.051, lo que permite clasificarlos como PELIGROSOS” por su capacidad para la generación potencial de drenaje ácido, de acuerdo a los criterios de la NOM-141-SEMARNAT-2004 ya que indica textualmente "... cuando la relación de PN/PA < 1.2, los jales se deben de ser clasificados peligrosos por su capacidad potencial para la generación de drenaje ácido”.

Los resultados de las pruebas cinéticas de celdas húmedas en los jales de Tizapa corroboran los resultados de las pruebas estáticas de balance ácido-base (BAB) solamente en las muestras de jales JTZ1 y JTZ6, ya que los valores de pH al inicio de la prueba en la muestra JTZ1, disminuyeron de 6.4 hasta 2.9 al final de la misma; y en la muestras JTZ6 disminuyeron de 6.36 (semana 0) hasta 3.92 (semana 20).

Sin embargo, en la muestra JT11 no se corrobora el resultado de la prueba estática de BAB, ya que los jales de esta muestra no son generadores de drenaje ácido como lo indica los valores de pH: Al inicio de la prueba el pH de estos jales fue de 7.63 y durante las 20 semana de pruebas se mantuvieron las condiciones cercanas a la neutralidad e incluso aumentaron ligeramente hasta alcanzar un pH de 8.33 al final de la prueba.

Los resultados de las pruebas cinéticas indican que las pruebas estáticas de (BAB) no son suficientes para la valoración de la peligrosidad de los jales que provienen de yacimientos del tipo sulfuros masivos, lo que se debe a que la prueba BAB solo considera el papel de los carbonatos para el potencial de neutralización (ver sección 3.4.2 de este documento), lo que es insuficiente cuando en las muestra existen otros minerales alcalinos en cantidad suficiente para consumir la acidez generada como es el caso de la muestra JTZ11, donde la plagioclasa juega el papel principal como mineral neutralizador (Campbell C. David 2006), como lo demuestran los resultados de las pruebas cinéticas de celdas húmedas que se discuten a continuación.

#### **b) Prueba cinética, de celdas húmedas, para la predicción de la capacidad potencial de generación de drenaje ácido en los jales de Tizapa**

La generación de acidez (liberación de H<sup>+</sup>) registrada, durante la prueba cinética de celdas húmedas, en las muestras de jales JTZ1 y JTZ6 ocurre debido a la oxidación de la pirita (FeS<sub>2</sub>) que es un mineral que fue debidamente identificado, por DRX, en estudios previos (ver tabla 2.1 del capítulo 2). La pirita (FeS<sub>2</sub>) es el sulfuro metálico más importante que al oxidarse puede generar drenaje ácido (Balistrieri, et al., 1999, Dold, B., Fontbote 2001).

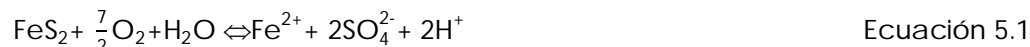
Los jales de Tizapa provienen de la explotación de un yacimiento polimetálico (Zn-Pb-Cu) de sulfuros masivos de tipo vulcano-sedimentario (ver sección 2.2.6 de este documento). De acuerdo al contenido de hierro (Fe) y azufre (S) reportado para estos jales (ver sección 2.2.8 de este documento), se estima que el contenido de pirita (FeS<sub>2</sub>) en estos jales pueden variar entre un 30 y 40%, lo que se pudo corroborar al observar con lupa binocular la abundante presencia de este mineral.

En la misma sección 2.2.8 de este documento se puede observar que en las muestras JTZ1 y JTZ6, además de la pirita (FeS<sub>2</sub>), que es el mineral predominante en los jales de Tizapa, se reporta la presencia de cuarzo SiO<sub>2</sub>, clorita Mg<sub>5</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>, moscovita KAl<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> y yeso (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O).

## b.1) Oxidación de la pirita y control de los productos que se generan durante este proceso geoquímico.

### b.1.1) Generación de acidez en la muestras de jales JTZ1 y JTZ6

La oxidación de la pirita ocurre a través de la ecuación 5.1 y 5.2, que han sido ampliamente reportadas en la literatura especializada (Zhixun Lin, 1997).



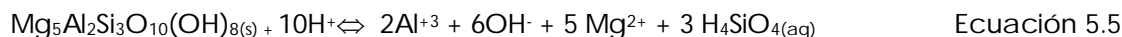
### Comportamiento de las concentraciones de $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ y $\text{SO}_4^{2-}$ en los lixiviados de los jales JTZ1 y JTZ6

Como puede observarse en las ecuaciones 5.1 y 5.2, además de la acidez liberada ( $\text{H}^+$ ), que es la causa de los valores bajos de pH en las muestras JTZ 1 y JTZ 6, la oxidación de la pirita libera, al medio acuoso, sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , lo que explica la tendencia al aumento de los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Fe}_{\text{total}}$  ( $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$ ), registrados en los lixiviados obtenidos durante la prueba de celdas húmedas de estas dos muestras de jales.

Es importante aclarar que las relativamente altas concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  en los lixiviados iniciales se debe a la presencia de reactivos residuales (sulfato de cobre y sulfato de zinc), que son sales solubles utilizadas en el proceso de flotación que generan los jales o bien por la disolución de yeso identificado en estas muestras de jales (McGregor et al., 1998, Romero et al. 2007), al momento de preparar los lixiviados iniciales para la prueba de celdas húmedas.

### Comportamiento de las concentraciones de $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , Si ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) y Al en los lixiviados de los jales JTZ1 y JTZ6

Así mismo, la tendencia general de aumento en las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , Si ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) y Al, en los lixiviados de las pruebas de las muestras JTZ1 y JTZ6 se puede explicar por la disolución/alteración de los minerales que contienen a estos elementos y que fueron identificados en estos jales: Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), Clorita  $\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  y Moscovita  $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ . Faure (1980) reporta que estos minerales se disuelven/alteran bajo condiciones acidas con la subsecuente liberación al medio acuoso de los elementos que contienen, de acuerdo a las siguientes reacciones:



Los resultados indican que estos jales (JTZ1 y JTZ6) no tienen suficiente cantidad de minerales consumidores de acidez, ya que la disolución/alteración de la clorita y moscovita no fue suficiente para consumir todos los protones ( $\text{H}^+$ ) generados por la

oxidación de la pirita, lo que derivó en los bajos valores de pH en los lixiviados de las muestras JTZ1 y JTZ6 al final de la prueba cinética de celdas húmedas.

### **Comportamiento de las concentraciones de As, Ba, Cd, Ag, Pb, Cu y Zn en los lixiviados de los jales JTZ1 y JTZ6**

Por otro lado, como ya se mencionó en la sección 2.2.8 de este documento, los jales de Tizapa (JTZ1 y JTZ6) se caracterizan por las altas concentraciones totales de As (1666 – 2013 mg/kg), Cd (63 – 108 mg/kg), Cu (941 – 927 mg/kg), Pb (2170 – 2378 mg/kg) y Zn (12081 – 18577 mg/kg); que en el medio ácido, que se alcanza durante las pruebas de celda húmeda, pueden liberarse al medio acuoso; lo que explicaría las concentraciones disueltas de estos contaminantes, determinadas en los lixiviados obtenidos durante la prueba de celda húmeda. Estos resultados son congruentes con los reportado por Romero et al., (2010), acerca de que en el medio ácido se favorece la disolución de los compuestos que contienen elementos potencialmente tóxicos, lo que explica que en los lixiviados acuosos mineros ácidos, por lo general, se caracterizan por las relativamente altas concentraciones disueltas de EPT.

#### **b.1.2) Consumo de acidez en la muestra de jales JTZ11**

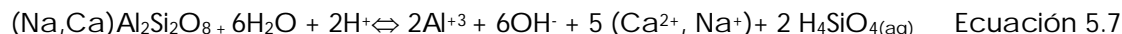
En el caso de la muestra JTZ11, a pesar de contener pirita ( $\text{FeS}_2$ ), como mineral predominante, al igual que las muestras JTZ1 y JTZ6, la prueba de celda húmeda indica que no son generadores potenciales de drenaje ácido.

En la sección 2.2.8 de este documento se puede observar que, en la muestras JTZ11, además de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) se reporta la presencia de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), plagioclasa ( $(\text{Na,Ca})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) y jarosita ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ).

La oxidación de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) ocurre a través de las ecuaciones 5.1 y 5.2, lo que, como ya se mencionó, libera acidez ( $\text{H}^+$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ),  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ .

Durante las 20 semanas, que dura la prueba, se puede observar que hay consumo de la acidez liberada ( $\text{H}^+$ ) ya que los valores de pH se mantienen ligeramente básicos. Al inicio de la prueba el valor de pH fue de 7.7 y se mantiene entre 7.6 y 8.6 hasta el final de la misma; lo que podría ser explicado debido a la presencia de suficiente cantidad de plagioclasa ( $(\text{Na,Ca})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), que es un aluminosilicato que al alterarse/disolverse, consumen los protones ( $\text{H}^+$ ) generados por la oxidación de la pirita.

La alteración/disolución de la plagioclasa [ $(\text{Na,Ca})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ], bajo condiciones ácidas, con la subsecuente liberación al medio acuoso de los elementos que contienen, ocurre de acuerdo a la siguiente ecuación, que ha sido reportada por Faure (1980):



### **Comportamiento de las concentraciones de $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ y $\text{SO}_4^{2-}$ en los lixiviados de los jales JTZ11**

El Fe liberado durante la oxidación de la pirita (Ecuaciones 5.1 y 5.2), precipita bajo las condiciones neutras del medio a través de la ecuación 5.8 y 5.9, que han sido reportada por diferentes autores (Lin, 1997 y McGregor et al, 2000); lo que explicaría la ausencia de Fe disuelto en los lixiviados obtenidos durante la prueba de celdas húmedas.



Ha sido ampliamente reportado en la literatura que los Fe-oxihidróxidos juegan un papel significativo en los procesos de retención de arsénico y metales pesados debido a fenómenos de sorción (Zhixun Lin, 1997; McGregor et al., 1998, Romero et al., 2007).

Por otro lado, de acuerdo a los resultados de celdas húmedas en la muestra JTZ11, los  $\text{SO}_4^{2-}$ , que es el otro producto de oxidación de la pirita, muestran una tendencia al aumento, lo que sugiere que este anión se mantiene disuelto bajo las condiciones neutras que prevalecen en el sistema. Estos resultados son congruentes con los reportado por Romero et al., (2011), acerca de que bajo las condiciones neutras, la precipitación parcial del yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) es posible pero no suficiente para la remoción de los sulfatos disueltos del medio acuso, por lo que es común encontrar concentraciones disueltas de  $\text{SO}_4^{2-}$  en lixiviados neutros de minas.

Es importante aclarar que las relativamente altas concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el lixiviado iniciales se debe a la presencia de reactivos residuales (sulfato de cobre y sulfato de zinc), que son sales solubles que se utilizan en el proceso de flotación que generan los jales o bien por la disolución de yeso identificado en estas muestras de jales (McGregor et al., 1998, Romero et al. 2007), al momento de preparar los lixiviados iniciales para la prueba de celdas húmedas.

### **Comportamiento de las concentraciones de Al, $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ , Si ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{K}^+$ y $\text{HCO}_3^-$ en los lixiviados de los jales JTZ11**

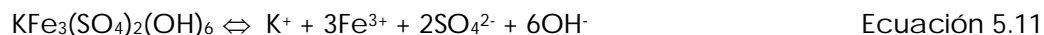
Como puede observarse en la Ecuación 5.7, la alteración/disolución de la plagioclasa libera al ambiente Al ( $\text{Al}^{+3}$ ), Ca ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Na ( $\text{Na}^+$ ) y Si ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ); lo que podría explicar la tendencia al aumentos de las concentraciones disueltas del Ca y Si durante la prueba de celda húmeda en la muestra JTZ11.

En el caso del Al, los resultados muestran que este elemento no fue detectado en los lixiviados de la prueba, lo que indica que ha sido retenido en la fase sólida, posiblemente debido a la precipitación del hidróxido de aluminio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) como se muestra en la ecuación 5.10 :



Estudios previos no reportan minerales que contengan Mg, en eta muestra JTZ11. Sin embargo, la presencia de pequeñas cantidades de clorita ( $\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ), que posiblemente no detectadas en los estudios previos, debido a la técnica de análisis utilizada (DRX) y su posible alteración/disolución de acuerdo a la ecuación 5.2, podría explicar las relativamente bajas concentraciones disueltas de Mg, determinadas en los lixiviados obtenidos durante la prueba de celda húmedas de la muestra JTZ11.

La tendencia al aumento de las concentraciones de K en los lixiviados obtenidos durante la prueba de celda húmeda, podría explicarse por la disolución del mineral jarosita  $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ , en el medio neutro, a través de la siguiente reacción reportada por Faure (1980).



El  $Fe^{3+}$  liberado durante la disolución de la jarosita, bajo las condiciones neutras del medio, precipita como hidróxido férrico ( $Fe(OH)_3$ ) a través de la ecuación 5.9; lo que corrobora la ausencia de Fe disuelto en los lixiviados obtenidos durante la prueba de celdas húmedas.

En el caso de bicarbonatos ( $HCO_3^{1-}$ ), se observó que en algunas semanas se determinaron concentraciones de este anión en los lixiviados obtenidos durante la prueba de celda húmeda. Estas concentraciones de  $HCO_3^{1-}$ , bajo las condiciones ligeramente básicas del experimento, podrían explicarse por la presencia de  $CO_2$  en el aire inyectado a la celda (ver metodología sección 2.2.8 de este documento), que en medio acuoso con valores de pH neutros y ligeramente básicos, se transforman en iones  $HCO_3^{1-}$ , de acuerdo a las siguientes reacciones reportadas por White (2013).



### **Comportamiento de las concentraciones de As, Ba, Cd, Ag, Pb, Cu y Zn en los lixiviados de los jales JTZ 11**

Por otro lado, como ya se mencionó en la sección 2.2.8 de este documento, los jales JTZ11 se caracterizan por las definitivamente altas concentraciones totales de elementos potencialmente tóxicos como As (746 mg/kg), Cu (154 mg/kg), Pb (1048 mg/kg) y Zn (4359 mg/kg) y la prácticamente ausencia de Ba, Cd, Ag y Se, que no fueron detectados.

Los elementos potencialmente tóxicos detectados no se liberan al ambiente y permanecen en la fase sólida (con excepción del Zn) debido al pH neutro del medio acuoso, que se alcanza durante las pruebas de celda húmeda; lo que explica las muy bajas o no detectadas concentraciones disueltas de estos contaminantes en los lixiviados obtenidos durante la prueba de celda húmeda de la muestra JTZ11.

Estos resultados son congruentes con los reportados por Romero et al., (2010), acerca de que bajo las condiciones neutras y ligeramente básicas no se favorece la disolución de los minerales que contienen elementos tóxicos, lo que explica que en los lixiviados acuosos mineros neutros, por lo general, se caracterizan por la ausencia de EPT disueltas.

En el caso del Zn, el aumento de las concentraciones se puede explicar debido al hecho de que el Zn es uno de los pocos metales pesados que se puede liberar de la fase sólida y pasar a la fase acuosa en ambientes neutros y básicos (Nuttal y Younger, 2000; Romero et al., 2011), que son las condiciones del medio.

## 5.2 Jales de Charcas

### 5.2.1 Celda JCH III

En la Tabla 5.7 se muestran los resultados obtenidos, durante las 20 semanas de prueba, en los lixiviados de la celda húmeda de la muestra de jales JCH III.

#### A) Parámetros generales: pH y Conductividad Eléctrica (CE)

Durante las 20 semanas, que dura la prueba, se puede observar que los valores de pH se mantienen ligeramente básicos (Fig. 5.10 A). Al inicio de la prueba el valor de pH fue de 8.3 y aumenta hasta alcanzar valores de 9.0. Estos valores indican que no ha ocurrido la generación de drenaje ácido.

Los valores de la conductividad eléctrica (CE) en el lixiviado inicial fue relativamente alto (1.65 mS/cm). A partir de la semana 1 muestra una clara tendencia a disminuir conforme aumentan los valores de pH (Figura 5.10.B) hasta llegar a un valor mínimo de 0.18 mS/cm, en la semana 20.

#### B) Iones mayoritarios: Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Potasio ( $\text{K}^+$ ), Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{1-}$ ) y cloruros ( $\text{Cl}^{-1}$ )

En la Fig. 5.11A y 5.11B se puede observar el comportamiento de los iones mayoritarios en los lixiviados obtenidos de la prueba cinética de celdas húmedas.

b.1) Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ): En la semana 0, se registró una concentración relativamente baja de 11.17 mg/L, que se incrementa sustancialmente en la semana 1 y 2 con una hasta 420 y 494 mg/L, respectivamente. A partir de la semana 3, las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  muestran una clara tendencia a la disminución hasta alcanzar un valor de 16.6 mg/L al final de la prueba (semana 20).

b.2) Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ): En la semana 0, se registró una concentración relativamente baja de 0.91 mg/L, que se incrementa sustancialmente en la semana 1 hasta alcanzar una concentración de 26.98 mg/L. A partir de la semana 2 las concentraciones de  $\text{Mg}^{2+}$  muestran una clara tendencia a la disminución hasta alcanzar un valor mínimo de 0.46 mg/L en la semana 6; y finalmente una concentración de 6.23 mg/L al final de la prueba.

b.3) Sodio ( $\text{Na}^+$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones relativamente bajas de 1.30 mg/L, que se incrementa paulatinamente hasta alcanzar un máximo de 94.99 mg/L en la semana 7. A partir de la semana 8 se observa una tendencia hacia la disminución hasta llegar a los 28.59 mg/L en el final de la prueba.

b.4) Potasio ( $\text{K}^+$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones relativamente bajas de 0.30 mg/L, que se incrementa paulatinamente hasta alcanzar un máximo de 21.85 mg/L en la semana 11. A partir de la semana 12 se observa una tendencia hacia la disminución hasta llegar a los 4.84 mg/L en el final de la prueba. En la semana 14 se registró un valor anómalo de 0.23 mg/L.

JCH III	pH	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>
		mS/cm	mg/L						
Semana 0	8.01	1.65	11.17	0.91	1.3	0.3	1734.12	174.94	30.19
Semana 1	8.22	1.11	420.07	26.98	21.21	7.61	1472.35	60	26.04
Semana 2	8.14	1.06	494.4	15.18	13.58	7.67	1661.76	105	4.53
Semana 3	8.41	0.87	195.61	11.63	22.31	4.55	608.24	165	5.66
Semana 4	8.1	0.78	176.61	10.61	20.52	7.38	311.99	235	39.98
Semana 5	8.31	0.71	133.72	11.76	23.98	4.38	436.47	158	8.68
Semana 6	8.57	0.52	104.99	4.22	59.74	3.37	297.06	153	4.91
Semana 7	8.49	0.42	69.12	5.36	94.99	10.62	177.65	185	5.28
Semana 8	8.58	0.31	91.99	11.07	22.83	3.69	108.24	218	2.64
Semana 9	8.26	0.29	40.29	3.78	97.14	21.59	112.35	221	13.58
Semana 10	8.29	0.57	108.22	6.7	70.62	16.07	290.59	246	4.15
Semana 11	8.45	0.51	81.98	5.72	87.34	21.85	267.65	155	5.28
Semana 12	8.49	0.36	47.96	1.61	34.58	3.23	123.53	288	4.91
Semana 13	8.79	0.3	28.82	0.46	37.35	4.84	113.53	216	30.94
Semana 14	8.75	0.23	20.06	7.84	40.35	0.23	57.06	221	3.77
Semana 15	8.73	0.21	17.75	0.69	38.5	3.92	21.18	306	2.64
Semana 16	8.91	0.24	12.68	0.69	35.97	5.3	30	195	5.28
Semana 17	9.01	0.27	14.76	9.45	50.26	5.07	20.59	106	17.74
Semana 18	8.51	0.34	25.82	1.61	31.36	8.3	20.59	157	17.74
Semana 19	8.43	0.2	23.29	9.91	25.59	4.38	11.76	111	4.91
Semana 20	8.82	0.18	16.6	6.23	28.59	4.84	11.76	300	4.91

Tabla 5.7 Valores de pH, conductividad eléctrica (CE) y concentraciones de los iones mayoritarios en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH III.

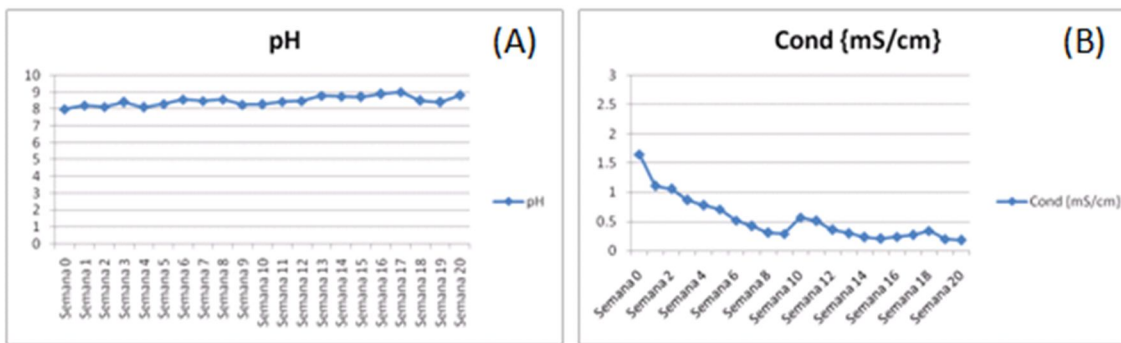


Figura 5.10 Comportamiento de los valores de pH (A) y conductividad eléctrica (B) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH III.



b.5) Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones relativamente altas de 1734.12 mg/L, que disminuyen ligeramente hasta 1472.35 y 1661.76 mg/L en las semanas 1 y 2, respectivamente. A partir de la semana 3 se observa una disminución sustancial paulatina hasta llegar a valores mínimos (11.76 mg/L) al final de la prueba.

b.6) Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{1-}$ ): Al inicio de la prueba (semana 0) se registró una concentración de 174.94 mg/L, que disminuye sustancialmente hasta 60 mg/L en la semana 1. A partir de la semana 2 se observa una tendencia constante hacia el aumento de las concentraciones hasta alcanzar un máximo de 306 mg/L en la semana 15. Finalmente en la semana 20 se alcanza una concentración de 300 mg/L.

b.7) Cloruros ( $\text{Cl}^{-1}$ ): Al inicio de la prueba (semana 0) se registró una concentración de 30.19 mg/L. A partir de la semana 1 se observa una tendencia generalizada hacia la disminución. Al final de la prueba se registraron valores de 4.91 mg/L. Así mismo, se observa que durante el periodo de la prueba las concentraciones de  $\text{Cl}^{-1}$  experimentan aumentos y disminuciones de manera intermitente.

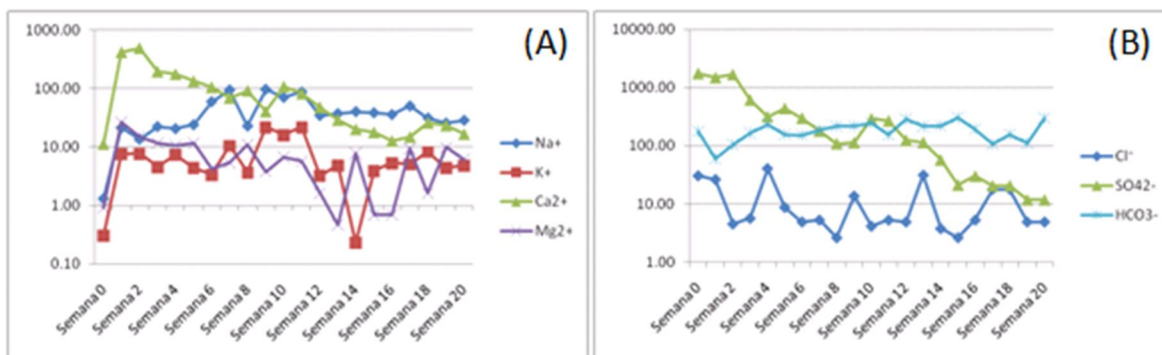


Figura 5.11 Comportamiento de las concentraciones de iones mayoritarios: (A) cationes mayoritarios (calcio  $\text{Ca}^{2+}$ , magnesio  $\text{Mg}^{2+}$ , sodio  $\text{Na}^+$  y potasio  $\text{K}^+$ ) y B) aniones mayoritarios (sulfatos  $\text{SO}_4^{2-}$ , bicarbonatos  $\text{HCO}_3^{1-}$ , cloruros  $\text{Cl}^{-1}$ ) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH III (Escala logarítmica en el eje Y).

### C) Elementos potencialmente tóxicos: As, Ba, Cd, Ag, Pb, Se, Cu, Zn, Fe, Al y Si

Los resultados presentados en la Tabla 5.8 indican que con excepción del Si, las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos analizados (As, Ba, Cd, Ag, Pb, Se, Cu, Zn, Fe y Al) fueron muy bajas o simplemente no fueron detectadas por la técnica de análisis, lo que es congruente con los valores ligeramente básicos del medio que limitan la liberación de estos contaminantes hacia la fase acuosa.

c.1) Silicio (Si): En la semana 0 se registró una concentración de 6.75 mg/L, las que van aumentando hasta alcanzar valores de 32.2 mg/L, en la semana 20. (Figura 5.12)

JCH III	Elementos traza								Elementos mayores		
	mg/L										
	As	Ba	Cd	Ag	Pb	Se	Cu	Zn	Fe	Al	Si
Semana 0	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	6.5
Semana 5	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	15.03
Semana 10	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	23.64
Semana 15	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	30.11
Semana 20	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	32.2

Limites de detección (mg/L): As = 0.1; Ba = 0.1; Cd = 0.1; Ag = 0.1; Pb = 0.5; Se = 0.5; Cu = 0.1, Zn = 0.5; Al = 0.5, Fe = 0.5, Si = 0.5

Tabla 5.8 Concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH III; bld: debajo de los límites de detección.

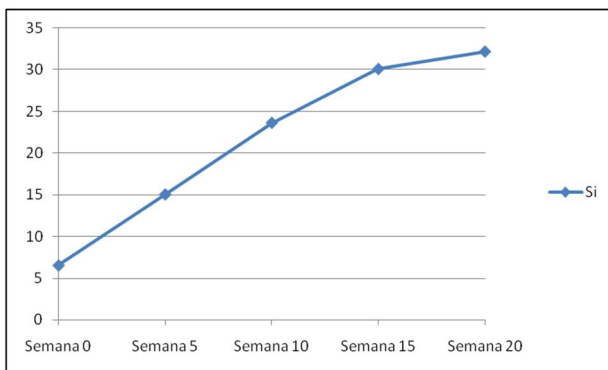


Figura 5.12 Comportamiento de las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH II: silicio (Si); (mg/L en el eje Y).

### 5.2.2 Celda JCH VII

En la Tabla 5.9 se muestran los resultados obtenidos, durante las 20 semanas de prueba, en los lixiviados de la celda húmeda de la muestra de jales JCH VII.

#### A) Parámetros generales: pH y Conductividad Eléctrica (CE)

Durante las 20 semanas, que dura la prueba, se puede observar que los valores de pH se mantienen ligeramente básicos (Fig. 5.13A). Al inicio de la prueba el valor de pH fue de 7.61. Durante todo el tiempo de la prueba los valores de pH variaron entre 7.56 y 7.95, que indican que no ha ocurrido la generación de drenaje ácido.

Los valores de la conductividad eléctrica (CE) en el lixiviado inicial fue relativamente alto (2.13 mS/cm). A partir de la semana 1 muestra una clara tendencia a disminuir conforme aumentan los valores de pH (Figura 5.13.B) hasta llegar a un valor mínimo de 1.16 mS/cm, en la semana 20.

#### B) Iones mayoritarios: Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Potasio ( $\text{K}^+$ ), Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{1-}$ ) y cloruros ( $\text{Cl}^{-1}$ )

En la Fig. 5.14A y 5.14B se pudo observar el comportamiento de los iones mayoritarios en los lixiviados obtenidos de la prueba cinética de celdas húmedas.

b.1) Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ): En la semana 0, se registró una concentración relativamente baja de 7.26 mg/L, que se incrementa sustancialmente en las primeras semanas hasta alcanzar una concentración máxima de 494.34 mg/L en la semana 3. A partir de la semana 4 las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  muestran una clara tendencia a la disminución hasta alcanzar un valor mínimo de 247.85 mg/L en la semana 18. Al final de la prueba se registró una concentración de 267.45 mg/L.

b.2) Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ): En la semana 0, se registró una concentración relativamente baja de 1.0 mg/L, que se incrementa sustancialmente en la semana 1 hasta alcanzar una concentración de 32.72 mg/L. A partir de la semana 2 las concentraciones de  $\text{Mg}^{2+}$  muestran una clara tendencia a la disminución hasta alcanzar un valor mínimo de 0.46 mg/L en la semana 18. Se observa un incremento de las concentraciones al final de la prueba con 5.99 y 16.14 mg/L en las semanas 19 y 20, respectivamente.

b.3) Sodio ( $\text{Na}^+$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones relativamente bajas de 2.08 mg/L, que se incrementa bruscamente hasta 24.66 mg/L en la semana 1. A partir de la semana 2 se observan aumentos y disminuciones periódicas, alcanzando valores máximos en la semana 9 (142.48 mg/L) y mínimos en la semana 18 (5.3 mg/L). Al final de la prueba se registró una concentración de 18.68 mg/L.

b.4) Potasio ( $\text{K}^+$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones relativamente bajas de 0.2 mg/L, que se incrementan paulatinamente hasta alcanzar un máximo de 110.61 mg/L en la semana 9. A partir de la semana 10 se observa una tendencia hacia la disminución hasta llegar a valores de 2.08 mg/L, en la semana 20.

JCH VII	pH	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>
		mS/cm	mg/L						
Semana 0	7.61	2.13	7.26	1	2.08	0.2	1112.35	198.44	69.43
Semana 1	7.83	1.56	261.03	32.72	24.66	5.3	857.06	150	9.06
Semana 2	7.72	1.63	256.12	17.98	23.49	5.49	870	137	9.06
Semana 3	7.82	1.65	494.34	11.78	10.17	6.32	1349.41	140	5.66
Semana 4	7.81	1.55	479.1	12.68	11.07	8.99	1288.9	112	18.61
Semana 5	7.87	1.47	422.61	11.53	5.99	4.84	1292.35	95	3.4
Semana 6	7.91	1.31	400.11	4.02	49.64	5.14	1116.47	82	5.28
Semana 7	7.64	1.26	365.21	3.81	83.54	12.63	957.65	92	8.68
Semana 8	7.81	1.25	306.41	6.46	5.3	3.23	957.06	98	2.64
Semana 9	7.56	1.36	414.34	6.46	142.48	110.61	1142.94	90	76.98
Semana 10	7.82	1.49	458.72	4.91	82.02	34.75	1284.71	118	24.15
Semana 11	7.66	1.39	389.23	4.6	70.04	22.56	1101.18	113	5.28
Semana 12	7.67	1.27	345.37	2.08	7.15	4.84	872.35	100	3.02
Semana 13	7.85	1.51	381.11	4.84	6.23	6.69	1172.35	103	32.08
Semana 14	7.72	1.45	361.74	15.45	17.52	5.99	1156.47	95	32.08
Semana 15	7.87	1.42	328.77	0.69	6.92	5.76	895.29	140	0.75
Semana 16	7.95	1.46	342.84	0.46	9.68	7.84	1056.47	52	3.77
Semana 17	7.75	1.38	312.17	0.69	6.46	8.3	827.65	35	7.55
Semana 18	7.82	1.26	247.85	0.46	5.3	4.61	827.65	43	7.55
Semana 19	7.85	1.29	314.48	5.99	10.14	5.53	600.59	55	15.47
Semana 20	7.71	1.16	267.45	16.14	18.68	2.08	600.59	107	15.47

Tabla 5.9 Valores de pH, conductividad eléctrica (CE) y concentraciones de los iones mayoritarios en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH VII.

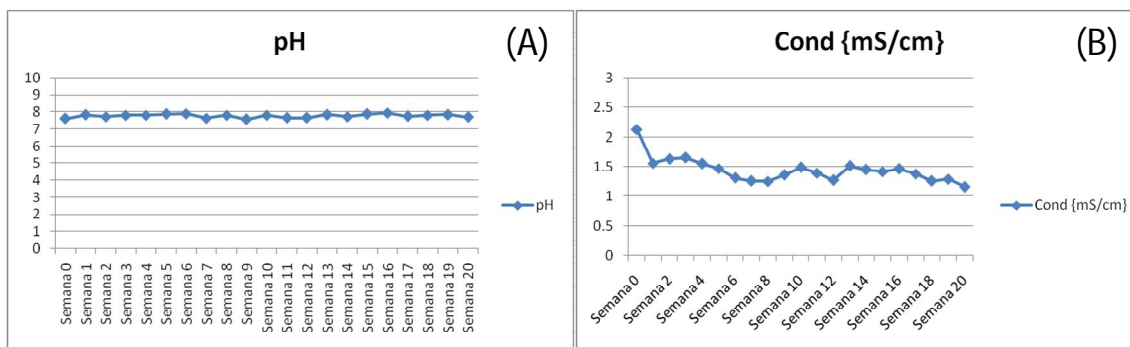


Figura 5.13 Comportamiento de los valores de pH (A) y conductividad eléctrica (B) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH VII.

b.5) Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones relativamente altas de 1112.35 mg/L, que disminuyen hasta 857.06 mg/L y 870 mg/L en las semanas 1 y 2, respectivamente. En la semana 3 se alcanza un valor máximo de 1349.41 mg/L, que disminuye paulatinamente hasta una concentración de 600.59 mg/L, al final de la prueba.

b.6) Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{1-}$ ): Al inicio de la prueba (semana 0) se registró una concentración de 198.44 mg/L, que disminuye paulatinamente hasta 35 mg/L, registrada en la semana 17. A partir de la semana 18 se observa un incremento hasta valores de 107 mg/L, registrado en la semana 20.

b.7) Cloruros ( $\text{Cl}^{1-}$ ): Al inicio de la prueba (semana 0) se registró una concentración de 69.43 mg/L. A partir de la semana 1 y hasta la semana 8 se observa una disminución hasta valores de 2.64 mg/L. En la semana 9 se registra un máximo de 76.98 mg/L que disminuye paulatinamente hasta mínimos de 0.75 mg/L en la semana 15. A partir de la semana 16 se observa un incremento hasta alcanzar valores de 15.47 mg/L en la semana 20.

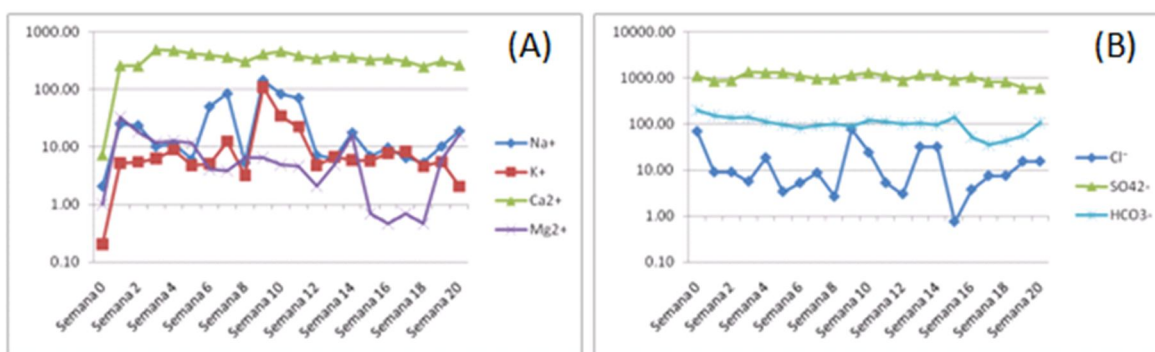


Figura 5.14 Comportamiento de las concentraciones de iones mayoritarios: (A) cationes mayoritarios (calcio  $\text{Ca}^{2+}$ , magnesio  $\text{Mg}^{2+}$ , sodio  $\text{Na}^+$  y potasio  $\text{K}^+$ ) y B) aniones mayoritarios (sulfatos  $\text{SO}_4^{2-}$ , bicarbonatos  $\text{HCO}_3^{1-}$ , cloruros  $\text{Cl}^{1-}$ ) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH VII (Escala logarítmica en el eje Y).

### C) Elementos potencialmente tóxicos: As, Ba, Cd, Ag, Pb, Se, Cu, Zn, Fe, Al y Si

Los resultados presentados en la Tabla 5.10 indican que con excepción del Cd, Zn y Si, (Figura 5.15) las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos analizados (As, Ba, Ag, Pb, Se, Cu, Fe y Al) fueron muy bajas o simplemente no fueron detectadas por la técnica de análisis, lo que es congruente con los valores ligeramente básicos del medio que limitan la liberación de estos contaminantes hacia la fase acuosa.

c.1) Cadmio (Cd): En la semana 0, se registraron concentraciones de 0.35 mg/L, que disminuyen hasta 0.05 mg/L al final de la prueba.

c.2) Zinc (Zn): En la semana 0, se registraron concentraciones de 4.33 mg/L, que disminuyen hasta 0.25 mg/L al final de la prueba.

c.3) Silicio (Si): En la semana 0, se registraron concentraciones de 5.23 mg/L, que disminuyen ligeramente hasta valores mínimo de 3.3 mg/L, en la semana 5. En las siguientes semanas se observa un ligero incremento hasta valores de 4.64 mg/L, en la semana 20.

JCH VII	Elementos traza							Elementos mayores			
	mg/L										
	As	Ba	Cd	Ag	Pb	Se	Cu	Zn	Fe	Al	Si
Semana 0	bld	bld	0.35	bld	bld	bld	bld	4.33	bld	bld	5.23
Semana 5	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	0.81	bld	bld	3.3
Semana 10	bld	bld	0.14	bld	bld	bld	bld	1.75	bld	bld	4.73
Semana 15	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	0.91	bld	bld	5.11
Semana 20	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	0.25	bld	bld	4.64

Limites de detección (mg/L): As = 0.1; Ba = 0.1; Cd = 0.1; Ag = 0.1; Pb = 0.5; Se = 0.5; Cu = 0.1, Zn = 0.5; Al = 0.5, Fe = 0.5, Si = 0.5

Tabla 5.10 Concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH VII; bld: debajo de los límites de detección.

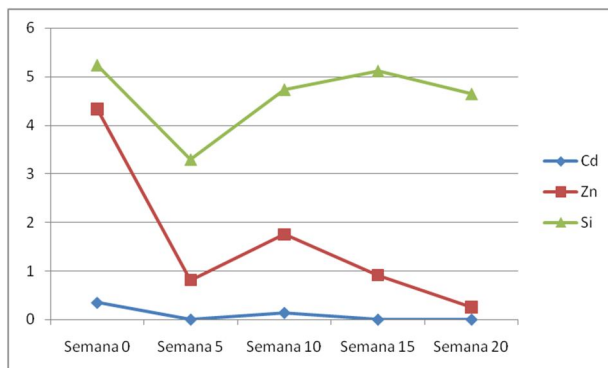


Figura 5.15 Comportamiento de las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (Cd, Zn y Si) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH VII (mg/L en el eje Y).

### 5.2.3 Celda JCH X

En la Tabla 5.11 se muestran los resultados obtenidos, durante las 20 semanas de prueba, en los lixiviados de la celda húmeda de la muestra de jales JCH X.

#### A) Parámetros generales: pH y Conductividad Eléctrica (CE)

Durante las 20 semanas, que dura la prueba, se puede observar que los valores de pH se mantienen ligeramente básicos (Fig. 5.16A). Al inicio de la prueba el valor de pH fue de 8.12. Durante todo el tiempo de la prueba los valores de pH variaron entre 7.87 y 8.61, que indican que no ha ocurrido la generación de drenaje ácido.

Los valores de la conductividad eléctrica (CE) en el lixiviado inicial fue relativamente alto (1.92 mS/cm). A partir de la semana 1 muestra una clara tendencia a disminuir conforme aumentan los valores de pH (Figura 5.16.B) hasta llegar a un valor mínimo de 0.61 mS/cm, en la semana 20.

#### D) Iones mayoritarios: Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Potasio ( $\text{K}^+$ ), Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{1-}$ ) y cloruros ( $\text{Cl}^{-1}$ )

En la Fig. 5.17A y 5.17B se pudo observar el comportamiento de los iones mayoritarios en los lixiviados obtenidos de la prueba cinética de celdas húmedas.

b.1) Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ): En la semana 0, se registró una concentración relativamente baja de 9.17 mg/L, que se incrementa sustancialmente en la semana 1 hasta alcanzar una concentración máxima de 532.35 mg/L. A partir de la semana 2, las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  muestran una clara tendencia a la disminución hasta alcanzar valores de 121.5 mg/L en la semana 20. En las semanas 3 y 5 se registraron valores anómalos de 8.39 y 44.21 mg/L, respectivamente.

b.2) Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ): En la semana 0, se registró una concentración relativamente baja de 0.04 mg/L, que se incrementa sustancialmente hasta alcanzar un máximo de 18.68 mg/L en la semana 4. A partir de la semana 5, las concentraciones de  $\text{Mg}^{2+}$  muestran una clara tendencia a la disminución hasta alcanzar un valor mínimo de 0.92 mg/L en la semana 12. En las semanas 13, 14 y 15 se observan incrementos (6.23 – 15.91 mg/L) y a partir de la semana 16 se observa una tendencia a la disminución, hasta valores de 0.69 mg/L, en el final de la prueba.

b.3) Sodio ( $\text{Na}^+$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones relativamente bajas de 0.42 mg/L, que se incrementan y estabilizan paulatinamente en las primeras semanas hasta alcanzar un máximo de 85.15 mg/L en la semana 11. A partir de esa semana, se observa una tendencia hacia la disminución y en la semana 20 se registró una concentración de 31.13 mg/L.

b.4) Potasio ( $\text{K}^+$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones relativamente bajas de 0.14 mg/L, que se incrementan paulatinamente hasta alcanzar un máximo de 21.89 mg/L en la semana 11. A partir de la semana 12 se observa una tendencia hacia a disminución hasta llegar a 1.84 mg/L, en la semana 20.

JCH X	pH	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>
		mS/cm	mg/L						
Semana 0	8.12	1.92	9.17	0.04	0.42	0.14	1395.29	78.33	86.04
Semana 1	8.04	1.54	532.35	2.77	10.84	1.61	1566.47	32	58.49
Semana 2	8.02	1.41	495.47	0.36	9.92	1.18	1554.71	40	29.81
Semana 3	8.25	1.5	8.39	3.69	41.56	8.92	1361.18	137	3.02
Semana 4	8.13	1.29	365.2	18.68	17.75	5.07	943.46	90	19.11
Semana 5	8.25	1.27	44.21	6.69	36.65	11.49	1092.94	108	12.45
Semana 6	8.24	1.24	360.89	3.8	65.97	7.48	1037.65	87	7.92
Semana 7	8.26	1.29	363.06	4.5	83.19	17.25	897.65	95	10.57
Semana 8	8.21	1.16	263.06	4.5	73.19	17.25	641.76	115	2.64
Semana 9	7.87	1.06	296.38	4.02	63.93	16.91	821.76	108	6.79
Semana 10	8.26	0.94	245.41	3.69	76.29	13.13	658.82	113	8.3
Semana 11	8.35	0.87	223.1	4.13	85.15	21.89	622.35	103	15.85
Semana 12	8.12	0.91	220.18	0.92	11.3	3.92	614.12	110	5.66
Semana 13	8.44	0.82	172.69	6.23	18.91	6.69	541.18	125	26.79
Semana 14	8.21	0.87	180.99	15.91	26.51	4.15	618.82	85	30.94
Semana 15	8.55	0.79	163.46	6.23	16.6	2.31	445.88	100	1.51
Semana 16	8.39	0.85	170.38	0.46	18.91	6.23	503.53	50	3.4
Semana 17	8.38	0.8	164.16	6.23	19.37	4.84	390	38	7.55
Semana 18	8.53	0.73	134.88	0.46	15.91	2.77	390	47	7.55
Semana 19	8.5	0.68	137.64	4.38	17.52	4.15	11.76	46	11.32
Semana 20	8.61	0.61	121.5	0.69	31.13	1.84	11.76	137	11.32

Tabla 5.11 Valores de pH, conductividad eléctrica (CE) y concentraciones de los iones mayoritarios en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH X.

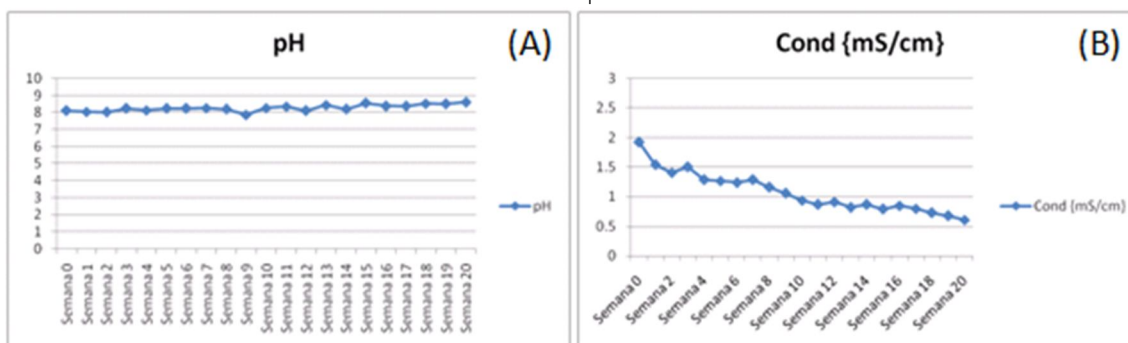


Figura 5.16 Comportamiento de los valores de pH (A) y conductividad eléctrica (B) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH X.



b.5) Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones relativamente altas de 1395.29 mg/L, que aumentan en las semanas 2 y 3 hasta concentraciones de 1566.47 mg/L y 1554.71 mg/L, respectivamente. A partir de la semana 3 se observa una tendencia hacia la disminución de las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  hasta valores de 390 mg/L en la semana 18. En las semanas 19 y 20 se observa una disminución drástica de 11.76 mg/L.

b.6) Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{1-}$ ): Al inicio de la prueba (semana 0) se registró una concentración de 78.33 mg/L, que disminuye hasta un mínimo de 32 mg/L, en las semana 1. En la semana 3 se observa un incremento de hasta 107 mg/L y a partir de la semana 4 se observa una disminución paulatina hasta 46 mg/L en la semana 19. Al final de la prueba se registró una concentración de 137 mg/L.

b.7) Cloruros ( $\text{Cl}^{1-}$ ): Al inicio de la prueba (semana 0) se registró una concentración de 86.4 mg/L. A partir de la semana 1 y hasta la semana 20 las concentraciones de  $\text{Cl}^{1-}$  varían desde un mínimo de 1.51 mg/L (semanas 15) hasta un máximo de 30.94 mg/L (semana 14). En el periodo de la prueba, las concentraciones de  $\text{Cl}^{1-}$  experimentan aumentos y disminuciones de manera intermitente.

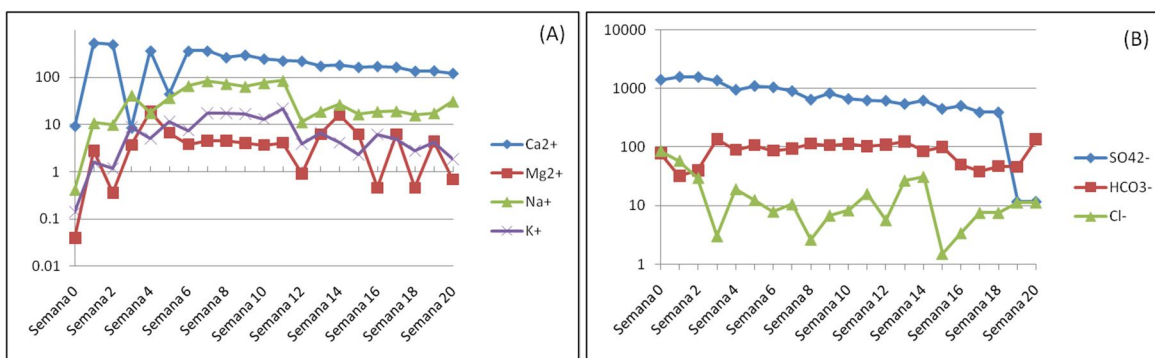


Figura 5.17 Comportamiento de las concentraciones de iones mayoritarios: (A) cationes mayoritarios (calcio  $\text{Ca}^{2+}$ , magnesio  $\text{Mg}^{2+}$ , sodio  $\text{Na}^+$  y potasio  $\text{K}^+$ ) y B) aniones mayoritarios (sulfatos  $\text{SO}_4^{2-}$ , bicarbonatos  $\text{HCO}_3^{1-}$ , cloruros  $\text{Cl}^{1-}$ ) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH X (Escala logarítmica en el eje Y).

### C) Elementos potencialmente tóxicos: As, Ba, Cd, Ag, Pb, Se, Cu, Zn, Fe, Al y Si

Los resultados presentados en la Tabla 5.12 indican que con excepción del Se, Zn y Si, las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos analizados (As, Ba, Cd, Ag, Pb, Cu, Fe y Al) fueron muy bajas o simplemente no fueron detectadas por la técnica de análisis, lo que es congruente con los valores ligeramente básicos del medio que limitan la liberación de estos contaminantes hacia la fase acuosa.

c.1) Selenio (Se): En la semana 0, se registraron concentraciones de 1.65 mg/L, que disminuyen hasta 0.1 y 0.12 mg/L en la semana 15 y 20, respectivamente.

c.2) Zinc (Zn): En la semana 0, se registraron concentraciones de 0.15 mg/L, que disminuyen hasta 0.02 mg/L al final de la prueba.

c.3) Silicio (Si): En la semana 0, se registraron concentraciones de Si (3.99 mg/L), y comienza a incrementar sus valores, en la semana 5 llega a 6.56 mg/L, disminuye un poco para la semana 10 y tiene un valor de 5.75 mg/L, después, aumenta su concentración nuevamente y llega a 10.46 mg/L, para terminar finalmente en la semana 20 con 13.13 mg/L.

JCH X	Elementos traza								Elementos mayores			
	mg/L											
	As	Ba	Cd	Ag	Pb	Se	Cu	Zn	Fe	Al	Si	
Semana 0	bld	bld	bld	bld	bld	1.61	bld	0.15	bld	bld	3.99	
Semana 5	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	0.12	bld	bld	6.56	
Semana 10	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	0.16	bld	bld	5.75	
Semana 15	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	0.06	bld	bld	10.46	
Semana 20	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	0.02	bld	bld	13.13	

Limites de detección (mg/L): As = 0.1; Ba = 0.1; Cd = 0.1; Ag = 0.1; Pb = 0.5; Se = 0.5; Cu = 0.1, Zn = 0.5; Al = 0.5, Fe = 0.5, Si = 0.5

Tabla 5.12 Concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH X; bld: debajo de los límites de detección.

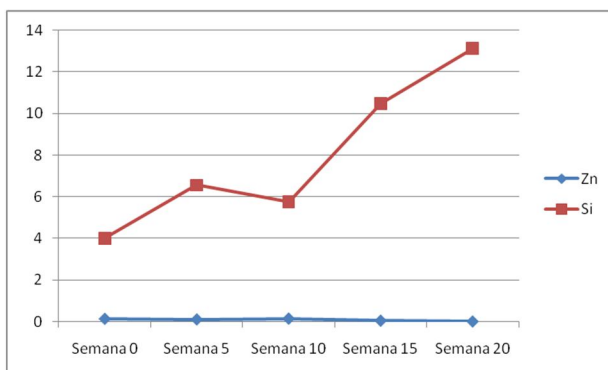


Figura 5.18 Comportamiento de las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH X: zinc (Zn) y silicio (Si); (mg/L en el eje Y).

#### 5.2.4 Celda JCH VB

En la Tabla 5.13 se muestran los resultados obtenidos, durante las 20 semanas de prueba, en los lixiviados de la celda húmeda de la muestra de jales JCH VB.

##### A) Parámetros generales: pH y Conductividad Eléctrica (CE)

Durante las 20 semanas, que dura la prueba, se puede observar que los valores de pH se mantienen prácticamente neutros y ligeramente básicos (Fig. 5.19A). Al inicio de la prueba el valor de pH fue de 6.58. Durante todo el tiempo de la prueba los valores de pH variaron entre 6.85 y 7.56, que indican que no ha ocurrido la generación de drenaje ácido.

Los valores de la conductividad eléctrica (CE) en el lixiviado inicial fue relativamente alto (1.61 mS/cm). A partir de la semana 1 y hasta la semana 12 los valores de CE son prácticamente constantes y varía entre 1.62 y 1.68 mS/cm. A partir de la semana 13 se observa un incremento (1.84 mS/cm) que permanece prácticamente constante hasta el fin de la prueba y que varía entre 1.81 y 1.85 mS/cm. En la semana 14 se observa un máximo de 1.95 mS/cm.

##### B) Iones mayoritarios: Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Potasio ( $\text{K}^+$ ), Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{-1}$ ) y cloruros ( $\text{Cl}^{-1}$ )

En la Fig. 5.20A y 5.20B se puede observar el comportamiento de los iones mayoritarios en los lixiviados obtenidos de la prueba cinética de celdas húmedas.

b.1) Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ): En la semana 0, se registró una concentración relativamente baja de 11.81 mg/L, que se incrementa sustancialmente en las primeras semanas hasta alcanzar una concentración máxima de 378.11 mg/L y 403.82 mg/L en las semanas 1 y 2, respectivamente. En las semanas 3 y 4 no hubo registro de las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$ . En la semana 4 se registran concentraciones de 506.76 mg/L. A partir de la semana 4 y hasta el fin de la prueba (semana 20), se observa una tendencia a la estabilización y las concentraciones de calcio varían entre 412.93 y 556.84 mg/L.

b.2) Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ): En la semana 0, se registró una concentración relativamente baja de 0.69 mg/L, que se incrementa sustancialmente en la semana 1 hasta alcanzar una concentración máxima de 40.35 mg/L. A partir de la semana 2 las concentraciones de  $\text{Mg}^{2+}$  muestran una clara tendencia a la disminución y al final de la prueba se registra una concentración de 2.08 mg/L.

b.3) Sodio ( $\text{Na}^+$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones relativamente bajas de 0.73 mg/L, que se incrementa paulatinamente hasta valores de 104.74 mg/L en la semana 11; con excepción de la semana 5 cuando se registró un valor anómalo de 6.92 mg/L. En la semana 12 se observa una disminución drástica de 5.53 mg/L que continúa disminuyendo hasta 3.23 mg/L en la semana 18. En las semanas 19 y 20 se registraron concentraciones de 13.6 mg/L y 11.7 mg/L, respectivamente.

b.4) Potasio ( $\text{K}^+$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones relativamente bajas de 0.5 mg/L, que se incrementa paulatinamente hasta alcanzar un máximo de 18.47 mg/L en la semana 10. A partir de la semana 10 se observa una tendencia hacia a disminución hasta llegar a valores de 0.92 mg/L, en la semana 20.

JCH VB	pH	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>
		mS/cm	mg/L						
Semana 0	6.58	1.61	11.81	0.69	0.73	0.5	1646.47	216.72	23.02
Semana 1	6.98	1.68	378.11	40.35	15.91	7.15	1399.41	110	5.66
Semana 2	7.23	1.62	403.82	21.79	14.79	5.37	1358.82	102	7.55
Semana 3	7.17	1.65	454.63	14.43	13.84	3.47	1580	32	22.26
Semana 4	7.45	1.66	489.71	1.15	15.45	2.77	1449.29	40	123.94
Semana 5	7.52	1.68	506.76	3.69	6.92	2.54	1642.94	47	11.7
Semana 6	7.51	1.68	544.55	1.95	58.62	4.69	1592.94	77	12.83
Semana 7	7.24	1.69	553.78	3.01	85.79	9.92	1458.82	37	8.68
Semana 8	7.49	1.66	513.78	3.01	88.79	9.92	1286.47	55	6.42
Semana 9	7.29	1.66	556.84	2.67	78.83	18.08	1610	307	9.81
Semana 10	7.21	1.67	523.57	1.51	76.61	18.47	1480	65	13.96
Semana 11	7.53	1.66	552.67	3.41	104.74	17.7	1608.24	32	19.25
Semana 12	7.54	1.68	505.38	0.46	5.53	2.54	1509.41	67	3.4
Semana 13	7.56	1.84	499.62	0.69	7.38	6.69	1612.94	40	27.55
Semana 14	7.46	1.95	496.85	1.38	3.92	16.83	1581.18	100	54.34
Semana 15	7.55	1.84	486.7	0.23	4.61	3.46	1423.53	50	1.89
Semana 16	7.01	1.82	491.55	0.92	3.23	3.92	1550.59	15	5.66
Semana 17	6.91	1.81	497.31	1.15	3.23	4.38	1607.06	18	6.04
Semana 18	7.54	1.85	412.93	1.38	3.23	2.54	1607.06	49	6.04
Semana 19	7.29	1.84	533.28	2.54	13.6	6.92	1145.88	51	7.92
Semana 20	6.85	1.87	510.22	2.08	11.07	0.92	1145.88	57	7.92

Tabla 5.13 Valores de pH, conductividad eléctrica (CE) y concentraciones de los iones mayoritarios en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH VB.

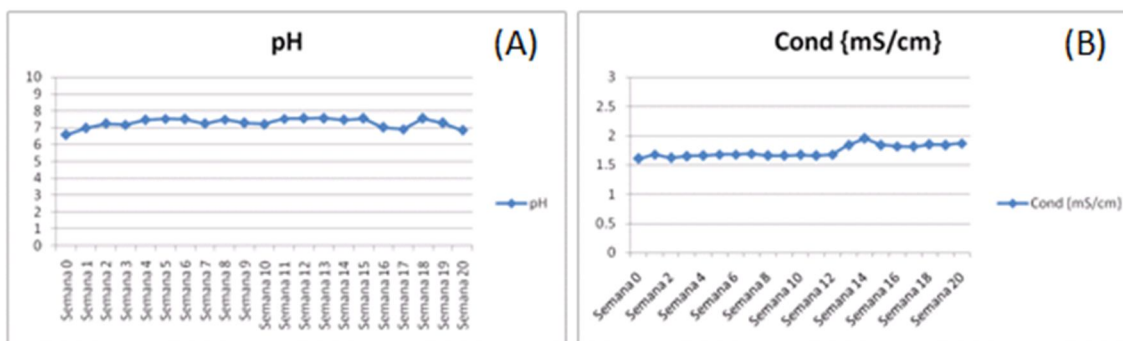


Figura 5.19 Comportamiento de los valores de pH (A) y conductividad eléctrica (B) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH VB.

b.5) Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ): En la semana 0, se registraron concentraciones relativamente altas de 1646.47 mg/L, que disminuyen paulatinamente hasta 1145.88 mg/L al final de la prueba, en la semana 20.

b.6) Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{1-}$ ): Al inicio de la prueba (semana 0) se registró una concentración de 216.72 mg/L, que disminuye sustancialmente en las semanas 1 y 2 hasta 110 y 102 mg/L, respectivamente. A partir de la semana 3, se observa una tendencia general a la disminución y las concentraciones varían entre 15 y 77 mg/L, con valores anómalos de 307 mg/L (semana 9) y 100 mg/L (semana 14).

b.7) Cloruros ( $\text{Cl}^{1-}$ ): Al inicio de la prueba (semana 0) se registró una concentración de 23.02 mg/L, que disminuye drásticamente en la semana 1 y 2 con concentraciones de 5.66 y 7.55 mg/L, respectivamente. Se observa un aumento en las concentraciones hasta alcanzar un máximo de 123.94 mg/L, en la semana 4. A partir de la semana 5 se observa una tendencia general a la disminución hasta llegar a 7.92 mg/L en la semana 20. En las semanas 13 y 14 se registraron valores relativamente altos: 27.55 y 54.34 mg/L.

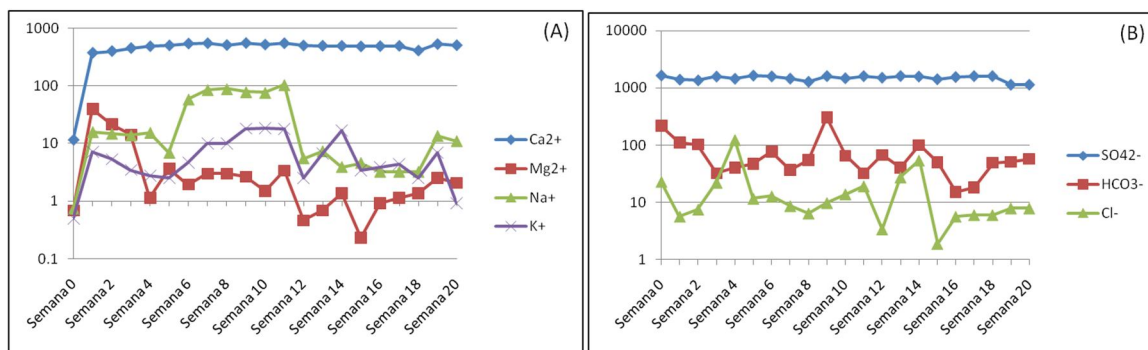


Figura 5.20 Comportamiento de las concentraciones de iones mayoritarios: (A) cationes mayoritarios (calcio  $\text{Ca}^{2+}$ , magnesio  $\text{Mg}^{2+}$ , sodio  $\text{Na}^{+}$  y potasio  $\text{K}^{+}$ ) y B) aniones mayoritarios (sulfatos  $\text{SO}_4^{2-}$ , bicarbonatos  $\text{HCO}_3^{1-}$ , cloruros  $\text{Cl}^{1-}$ ) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH VB (Escala logarítmica en el eje Y).

### C) Elementos potencialmente tóxicos: As, Ba, Cd, Ag, Pb, Se, Cu, Zn, Fe, Al y Si

Los resultados presentados en la Tabla 5.14 indican que con excepción del Cd, Pb, Zn y Si, las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos analizados (As, Ba, Ag, Se, Cu, Fe y Al) fueron muy bajas o simplemente no fueron detectadas por la técnica de análisis, lo que es congruente con los valores ligeramente básicos del medio que limitan la liberación de estos contaminantes hacia la fase acuosa.

c.1) Cadmio (Cd): En la semana 0, se registraron concentraciones de 2.83 mg/L, que disminuyen hasta 0.56 mg/L (semana 15) y 0.62 mg/L (semana 20).

c.2) Plomo (Pb): En la semana 0, se registraron concentraciones de 0.04 mg/L, que aumentan hasta 0.12 mg/L al final de la prueba (semana 20).

c.3) Zinc (Zn): En la semana 0, se registraron concentraciones de 17.44 mg/L, que disminuyen hasta 1.01 mg/L (semana 15) y 1.14 mg/L (semana 20).

c.4) Silicio (Si): En la semana 0, se registraron concentraciones de 19.72 mg/L, que aumenta hasta un máximo de 31.59 mg/L (semana 5). A partir de la semana 10 se observa la disminución de las concentraciones hasta 28.14 mg/L en la semana 20.

JCH VB	Elementos traza							Elementos mayores			
	mg/L										
	As	Ba	Cd	Ag	Pb	Se	Cu	Zn	Fe	Al	Si
Semana 0	bld	bld	2.83	bld	bld	bld	bld	17.44	bld	bld	7.62
Semana 5	bld	bld	0.86	bld	bld	bld	bld	2.08	bld	bld	31.59
Semana 10	bld	bld	0.73	bld	bld	bld	bld	1.64	bld	bld	25.04
Semana 15	bld	bld	0.56	bld	bld	bld	bld	1.01	bld	bld	27.62
Semana 20	bld	bld	0.62	bld	bld	bld	bld	1.14	bld	bld	28.14

Límites de detección (mg/L): As = 0.1; Ba = 0.1; Cd = 0.1; Ag = 0.1; Pb = 0.5; Se = 0.5; Cu = 0.1, Zn = 0.5; Al = 0.5, Fe = 0.5, Si = 0.5

Tabla 5.14 Concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH VB; bld: debajo de los límites de detección.

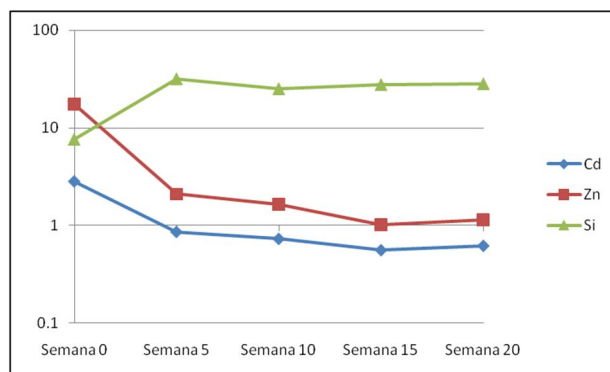


Figura 5.21 Comportamiento de las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (cadmio (Cd), zinc (Zn) y silicio (Si)) en los lixiviados obtenidos de la celda húmeda de la muestra de jales JCH VB: (Escala logarítmica en el eje Y).

## 5.2.5 Discusión de los resultados de las pruebas cinéticas de celdas húmedas en los jales Charcas

### a) Pruebas estáticas versus pruebas cinéticas

El estudio previo realizado por Luna Celis (2008), en los jales de Charcas, indica que los resultados de las pruebas estáticas de balance ácido-base (BAB) permiten pronosticar que estos jales NO serán generadores de acidez, en el futuro, cuando se oxiden, debido a que tienen un bajo potencial de acidez (PA) y alto potencial de neutralización (PN):

- En la muestra JCHIII reportan un "PA" 78.4 de  $\text{kgCaCO}_3/\text{t}$  y un PN de 485.34  $\text{kgCaCO}_3/\text{t}$ , lo que permite calcular una relación PA/PN igual a 6.2 .
- En la muestra JCHVII reportan un "PA" 55.5 de  $\text{kgCaCO}_3/\text{t}$  y un PN de 512.25  $\text{kgCaCO}_3/\text{t}$ , lo que permite calculara una relación PA/PN igual a 9.3 .
- En la muestra JCHX reportan un "PA" 104.1 de  $\text{kgCaCO}_3/\text{t}$  y un PN de 359.47  $\text{kgCaCO}_3/\text{t}$ , lo que permite calculara una relación PA/PN igual a 3.5 .
- En la muestra JCHVB reportan un "PA" 126.2 de  $\text{kgCaCO}_3/\text{t}$  y un PN de 97.51  $\text{kgCaCO}_3/\text{t}$ , lo que permite calculara una relación PA/PN igual a 2.4 .

Para las cuatro muestras de los jales de Charcas, la relación de PN/PA varía entre 2.4 y 9.3, lo que permite clasificarlos como "NO PELIGROSOS" porque no tienen capacidad para la generación potencial de drenaje ácido, de acuerdo a los criterios de la NOM-141-SEMARNAT-2004.

Los resultados de las pruebas cinéticas de celdas húmedas, de este estudio, en los jales de Charcas corroboran los resultados de las pruebas estáticas de BAB, ya que los valores de pH en todas las muestras, durante las 20 semanas que dura el experimento, se mantienen prácticamente neutros o son ligeramente básicos:

- En la muestra JCHIII, al inicio de la prueba el valor de pH fue de 8.3 y desde el inicio y hasta el final de la prueba se mantiene entre 8.1 y 9.01 .
- En la muestra JCHVII, al inicio de la prueba el valor de pH fue de 7.61 y desde el inicio y hasta el final de la prueba se mantiene entre 7.56 y 7.95 .
- En la muestra JCHX, al inicio de la prueba el valor de pH fue de 7.61. Durante todo el tiempo de la prueba los valores d pH variaron entre 7.87 y 8.61 .
- En la muestra JCHVB, al inicio de la prueba el valor de pH fue de 6.58. Durante todo el tiempo de la prueba los valores d pH variaron entre 6.85 y 7.56 .

Los resultados de las pruebas cinéticas son insuficientes ya que solamente miden la cantidad de minerales carbonatados, por lo tanto se utilizan las celdas húmedas para corroborar que por las características neutralizadoras del yacimiento y los jales, no generarán DAM en el futuro.

## **b) Prueba cinética, de celdas húmedas, para la predicción de la capacidad potencial de generación de drenaje ácido en los jales de Charcas**

### **b.1) Oxidación de la pirita y control de los productos que se generan durante este proceso geoquímico.**

Como ya se mencionó en la sección 2.3.8, de este documento, los estudios previos (Luna-Celis, 2008) reportan que los análisis de difracción de rayos X (DRX) indican que las muestras de jales inalterados de color gris (JCHIII, JCHVII, JCHX) se caracterizan por la presencia de pirita  $\text{FeS}_2$ , cuarzo  $\text{SiO}_2$ , calcita  $\text{CaCO}_3$  y yeso  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Así mismo, se reporta que los análisis de DRX, en la muestra de los jales oxidados (JCHVB), indican que se caracterizan por la presencia de cuarzo  $\text{SiO}_2$ , jarosita  $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ , yeso  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , hematita  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , wollastonita  $\text{CaSiO}_3$  y celestita  $\text{SrSO}_4$ . Adicionalmente, se reporta la presencia de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), identificada por microscopía óptica, pero rodeada de por una costra de Fe-oxihidróxidos.

La pirita ( $\text{FeS}_2$ ), es el sulfuro metálico más importante que al oxidarse puede generar drenaje ácido, su oxidación estuvo presente en todas las muestras de los jales de Charcas, ocurre a través de las ecuaciones 5.1 y 5.2 (ver sección 5.1.4 b.1), lo que implica la liberación de acidez ( $\text{H}^+$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ),  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ .

A continuación se discuten los procesos involucrados que podrían explicar el comportamiento de los productos de oxidación de la pirita, durante la prueba de celdas húmedas:

#### **b.1.1) Consumo de acidez ( $\text{H}^+$ )**

Durante las 20 semanas que dura la prueba, se puede observar que hay consumo de la acidez liberada ( $\text{H}^+$ ) por la oxidación de la pirita, ya que los valores de pH, en las cuatro muestras de jales de Charcas, se mantienen neutros y ligeramente básicos con valores que varían entre 6.58 y 9.01.

En las muestras de jales inalterados de color gris, el consumo de acidez ( $\text{H}^+$ ) podría ser explicado por la disolución de la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) que es un mineral que fue debidamente identificado en las muestras JCIII, JCHVII y JCHX. La disolución de la calcita ocurre a través de la siguiente ecuación 5.14, que indica que además de contribuir a la neutralización, libera iones de  $\text{Ca}^{2+}$  al medio acuoso.



En el caso de la muestra de jales oxidados (JCHVB), no fue identificada la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) en su composición mineralógica, por lo que el consumo de acidez no puede ser atribuido a su disolución. Sin embargo, se identificó el mineral denominado wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ), cuya disolución puede ser la causa del consumo de acidez ( $\text{H}^+$ ) en esta muestra de jales. La disolución de la wollastonita ocurre a través de la siguiente ecuación 5.15, reportada por Fernández-Caliani et al., (2008), que indica que además de contribuir a la neutralización, libera Si ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) al medio acuoso.



Por otro lado, como ya fue reportado en la sección 5.1.4.b.1, la disolución del cuarzo  $\text{SiO}_2$  (identificado en todas las muestras), en el medio ácido (Ecuación 5.5) también podría estar contribuyendo al proceso de neutralización, con la subsecuente liberación al medio acuoso de Si en forma disuelta ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ).

#### **b.1.2) Comportamiento de las concentraciones de $\text{Fe}^{2+}$ y $\text{Fe}^{3+}$ .**

En el caso del Fe liberado ( $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ ), durante la oxidación de la pirita, ha sido reportado que el Fe disuelto puede precipitar en forma de Fe-oxihidróxidos bajo condiciones neutras y



básicas del medio. Las reacciones de precipitación, reportadas, de estos Fe-oxihiróxidos se pueden consultar en la sección 5.4.1 b.2 de este documento (Ecuaciones 5.8 y 5.9).

La precipitación de los Fe-oxihiróxidos, bajo las condiciones neutras y ligeramente básicas del medio, explicaría la ausencia de Fe disuelto en los lixiviados obtenidos durante la prueba de celdas húmedas en los jales de Charcas.

Ha sido ampliamente reportado en la literatura que los Fe-oxihiróxidos juegan un papel significativo en los procesos de retención de arsénico y metales pesados debido a fenómenos de sorción (Lin, 1997; McGregor et al., 1998, Romero et al., 2007).

### **b.1.3) Comportamiento de las concentraciones de sulfatos $\text{SO}_4^{2-}$**

En los lixiviados iniciales de las cuatro muestras de Charcas, las concentraciones de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) fueron relativamente altas y variaron entre 857.1 y 1646.5 mg/L, lo que probablemente se deba a la presencia de reactivos residuales (sulfato de cobre y sulfato de zinc), que son sales solubles y que se utilizan en el proceso de flotación que generan los jales o bien por la disolución de yeso identificado en estas muestras de residuos (McGregor et al., 1998, Romero et al. 2007), al momento de preparar los lixiviados iniciales para la prueba de celdas húmedas.

En las 4 muestras de jales se observa que después de 20 semanas que dura la prueba de celdas húmedas las concentraciones de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) disminuyeron sustancialmente:

- En la muestra JCHIII, al inicio de la prueba la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  fue de 1734.12 mg/L y al final de la prueba fue de 11.76 mg/L.
- En la muestra JCHVII, al inicio de la prueba la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  fue de 1112.35 mg/L y al final de la prueba fue de 600.59 mg/L.
- En la muestra JCHX, al inicio de la prueba la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  fue de 1395.29 mg/L y al final de la prueba fue de 11.76 mg/L.
- En la muestra JCHVB, al inicio de la prueba la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  fue de 1646.47 mg/L y al final de la prueba fue de 1145.88 mg/L.

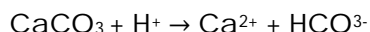
Como se puede observar, los resultados indican una disminución variable de la concentración de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). En las muestras JCHIII y JCHX se observan las mayores disminuciones en las concentraciones de sulfatos (~ 99% de disminución), seguido de la muestras JCHVII (~ 46% de disminución). Finalmente la menor disminución de la concentración de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) se observó en la muestra JCHVB (~ 30% de disminución).

De acuerdo a las observaciones, la disminución en las concentraciones de sulfatos es dependiente de los valores de pH:

- En las muestras (JCHIII y JCHX) donde se observó una disminución de los sulfatos de ~ 99%, se registraron valores más altos de pH: JCHIII, pH = 8.1 – 9.01 y JCHX, pH = 7.87 – 8.61).

- En la muestra (JCH VII) donde la disminución de fue de ~ 46% lo valores de pH variaron entre 7.56 y 7.95
- Finalmente en la muestra con menor disminución de la concentración de sulfatos (~ 30%), se registraron los valores más bajos de pH: 6.85 y 7.56

La disminución de las concentraciones de sulfatos en las celdas húmedas podría explicarse debido a la precipitación de yeso, que ocurre a través de la ecuación 5.16, reportada por Fernández-Caliani et al., (2008).



Ecuación 5.16

Como podemos observar, la precipitación del yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) no ha sido suficiente para la remoción de los sulfatos disueltos del medio acuoso; sin embargo, los resultados indican que entre más básico es el medio ( $\text{pH} < 7.46$ ), la precipitación del yeso garantiza la remoción más eficiente de los sulfatos disueltos en los lixiviados.

## **b.2) Comportamiento de las concentraciones de $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{HCO}_3^-$ y $\text{Cl}^-$**

### **• Calcio**

En las cuatro muestras la concentración inicial de  $\text{Ca}^{2+}$  es relativamente baja (entre 7.26 y 11.81 mg/L) y experimenta un aumento sustancial en las primeras 2 o 3 semanas de la prueba hasta alcanzar concentraciones que varían entre 494 y 403.82 mg/L.

Este aumento de las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  se puede explicar por la liberación de este catión divalente a partir de la reacción de disolución de la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) en las muestras JCHIII, JCHVII y JCHX, y de la wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ) en la muestra JCHVB; que al disolverse consumen acidez, pero liberan  $\text{Ca}^{2+}$  al medio acuoso (Ecuaciones 5.14 y 5.15).

A partir de la semana 3 o 4, las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  disminuyen paulatinamente. La disminución de las concentraciones de calcio es dependiente del pH, de tal manera que las disminuciones más importantes se registraron en las muestras donde se alcanzaron los valores más altos de pH:

- i) En la muestra JCHIII ( $\text{pH} = 8.1$  y  $9.01$ ), se registró una disminución de la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  desde 494 mg/L (semana 2) hasta 16.6 mg/L (semana 20).
- ii) En la muestra JCHX ( $\text{pH} = 7.87$  y  $8.61$ ) las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  disminuyeron desde 532.35 mg/L (semana 1) hasta 121.5 mg/L (semana 20).
- iii) En la muestra JCVII ( $\text{pH} = 7.56$  y  $7.95$ ) las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  disminuyeron desde 494.34 mg/L (semana 3) hasta 267.47 mg/L (semana 20).

La disminución de las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$ , en estas tres muestras, se puede explicar debido a la precipitación del yeso, que ocurre a través de la ecuación 5.16, y que, según nuestros resultados, se favorece en medios con pH relativamente altos como es el caso de estas tres muestras de jales ( $\text{pH} = 7.56 - 9.01$ ).

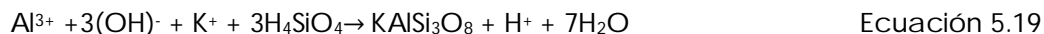
En el caso de la muestra JCHVB (pH = 6.85 y 7.56), las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  aumentan desde la semana 1 (378.11 mg/L) y alcanzan un máximo de hasta 556.84 mg/L, en la semana 9; y no se observa ninguna disminución sustancial y las concentraciones permanecen prácticamente constantes hasta la semana 20 con 510.2 mg/L; este fenómeno se debe probablemente a que la precipitación del yeso (Ecuación 5.16) no se favorece a valores de pH inferiores a 7.56 .

- **Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Sodio ( $\text{Na}^+$ ) y Potasio ( $\text{K}^+$ )**

En las cuatro muestras, las concentraciones iniciales de  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  son relativamente bajas y experimentan un aumento sustancial en las primeras semanas de la prueba. Sin embargo, en las últimas semanas de la prueba se observa una marcada tendencia hacia la disminución.

Los estudios previos no identificaron minerales que contengan estos cationes, pero la caracterización química indica concentraciones relativamente bajas de Mg (0.24 – 1.66% como MgO), Na (0.20 – 1.97% como  $\text{Na}_2\text{O}$ ) y K (0.19 – 0.51% como  $\text{K}_2\text{O}$ ), que podrán estar asociados a minerales aluminosilicatos no identificados debido a su baja concentración; pero que en el medio ácido se pueden disolver liberando al medio acuoso los respectivos iones de  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ; lo que explicaría el incremento de las concentraciones de estos cationes durante la primeras semanas de la prueba cinética de celdas húmedas.

Con el aumento del pH a medida que avanza el experimento, hacia las últimas semanas, la disminución de las concentraciones de estos cationes se puede deber a la precipitación con otras especies disueltas del medio ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), a través de las siguientes reacciones reportadas en la literatura (Faure, 1980).



- **Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ )**

En las cuatro muestras la concentración inicial de  $\text{HCO}_3^-$  es relativamente alta (entre 78.3 y 216.8 mg/L) y experimenta una disminución sustancial en las primeras 2 semanas de la prueba hasta alcanzar concentraciones que varían entre 32 y 150 mg/L; lo que puede considerarse como un fenómeno anómalo.

En las muestras JCHIII y JCHX donde se identificó calcita  $\text{CaCO}_3$  (ver tabla 4.2 de la sección 2.3.8 de este documento) y los valores de pH más altos (JCHII = 8.1 - 9.01; JCHX = 7.87 - 8.61), se observa un aumento desde la semana 2 y se mantiene hasta la semana 20, lo que se podría explicar por la disolución de la calcita, que al consumir la acidez ( $\text{H}^+$ ) generada por la oxidación de la pirita (Ecuación 5.14), libera al medio acuoso  $\text{HCO}_3^-$ .

En la muestra JCHVII y JCHVB con los valores de pH más bajos (JCHVII = 7.56 - 7.95; JCHVB = 6.58 y 7.56), se mantienen la tendencia hacia la disminución de las concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$ , durante el periodo de la prueba.

En el caso de la muestra JCVB, el comportamiento de las concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$  se puede explicar debido a que en esta muestra no se identificaron minerales carbonatados como la calcita  $\text{CaCO}_3$  (ver tabla 2.3 de la sección 2.3.8 de este documento), que al disolverse pudieran liberar a este anión al medio acuoso.

Sin embargo, en la muestra JCHVII si se identificó calcita  $\text{CaCO}_3$ , lo que no permite explicar el hecho de la disminución de las concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$  durante la prueba de celdas húmedas y nos lleva a afirmar que en esta muestra se observa un fenómeno anómalo relacionado con el comportamiento de las concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$ .

La situación anómala relacionada con comportamiento de las concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$  podrá estar relacionada con el hecho de que en los lixiviados neutros y ligeramente básicos obtenidos durante las pruebas de celdas húmedas, el  $\text{CO}_2$  en el aire inyectado a la celda (ver metodología sección 4.2 de este documento), se transforma en iones  $\text{HCO}_3^{1-}$  de acuerdo a las ecuaciones 5.12 y 5.13, ya reportadas en este documento en la sección 5.1.4.b.2.

### **b.3) Comportamiento de las concentraciones de As, Ba, Cd, Ag, Pb, Cu, Zn, Al y Si**

Como ya se mencionó en la sección 2.3.8 de este documento, los jales de Charcas se caracterizan por las definitivamente altas concentraciones totales (mg/kg) de As (231.5 – 1493.1), Ba (12.7 – 115.1), Cd (33.8 – 1716.4), Ag (18.2 – 56.4), Pb (532 – 26824), Cu (231 – 6376), Zn (2425 – 80072), Al (3.36 – 4.05 % como  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Si (29.04 – 37.07% como  $\text{SiO}_2$ ) que en el medio neutro y básico, que se alcanza durante las pruebas de celda húmeda, no se liberan al ambiente y permanecen en la fase sólida (con excepción del Zn), lo que explica las muy bajas o no detectadas concentraciones disueltas de estos contaminantes en los lixiviados obtenidos durante la prueba de celda húmeda de las muestras de Charcas.

Estos resultados son congruentes con los reportados por Romero et al., (2010), acerca de que bajo las condiciones neutras y ligeramente básicas no se favorece la disolución de los minerales que contienen elementos tóxicos, lo que explica que en los lixiviados acuosos mineros neutros, por lo general, se caracterizan por la ausencia de EPT disueltas.

En el caso del Zn, el aumento de las concentraciones se puede explicar debido al hecho de que el Zn es uno de los pocos metales pesados que se puede liberar de la fase sólida y pasar a la fase acuosa en ambientes neutros y básicos (Nuttal y Younger, 2000; Romero et al., 2011), que son las condiciones del medio.

En el caso del Si, la posible disolución del cuarzo  $\text{SiO}_2$  (Ecuación 5.4) y wollastonita  $\text{CaSiO}_3$  (Ecuación 5.15) durante las reacciones de neutralización (consumo de  $\text{H}^+$ ) pudo haber liberado Si ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ). Los resultados indican que bajo las condiciones de pH neutro y ligeramente básico, que se alcanzan en los lixiviados obtenidos de las celdas húmedas, puede permanecer parcialmente en forma disuelta, lo que explica que en todas las muestras de los lixiviados se detectaron concentraciones de Si disuelto ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ).

### **b.3) Resultados de los análisis de agua destilada y celda de blanco**

El agua destilada utilizada, tuvo valores de pH entre 6 y 7, conductividad nula todo el tiempo, lo cual garantiza que no interviene en los resultados del lixiviado, por su parte, la celda de blanco, tampoco afectó en los resultados del análisis del lixiviado obtenido.

## VI CONCLUSIONES

Partiendo de los 2 estudios previos realizados por Martínez Soriano, Tizapa 2011 y Luna Celis, Charcas 2007, debido a sus características contrastantes de los yacimientos, se decidió aplicar las pruebas de celdas húmedas con las siguientes conclusiones:

1. Las pruebas cinéticas (celdas húmedas), con una duración de 20 semanas, que se aplicaron a los jales seleccionados, permitieron corroborar los resultados de las pruebas de BAB; en 2 de las muestras de jales de Tizapa y en las 4 muestras de los jales de Charcas.

1.1 De acuerdo a los resultados de la prueba estática de BAB, en las 2 muestras de jales de Tizapa, los valores de la relación PA/PN son muy inferiores a 1 (PA/PN varió entre 0.021 y 0.029) lo que indica que el potencial de acidez es mucho mayor que el de neutralización; lo que fue corroborado con los resultados de la prueba cinética, ya que en el periodo de 20 semanas de prueba, los valores de pH en las muestras disminuyeron de 6.4 hasta 2.9 (muestra JTZ1) y de 6.36 hasta 3.92 (muestra JTZ6).

1.2 En las 4 muestras de los jales de Charcas los valores de la relación PA/PN fueron superiores a 1 (PA/PN varió entre 2.4 y 9.3); lo que indica que el potencial de acidez es mucho menor que el de neutralización; lo que fue corroborado con los resultados de la prueba cinética, ya que desde el inicio de la prueba y hasta el final de la misma, los valores de pH en estas muestras se mantuvieron prácticamente neutros y ligeramente básicos (pH entre 6.85 y 9.01).

2. Solamente en 1 de las muestras de jales de Tizapa (JT11), los resultados de celdas húmedas no corroboran los resultados de BAB. De acuerdo a los resultados de la prueba de BAB, la relación PA/PN es muy inferior a 1 (PA/PN = 0.051) que indica que el potencial de acidez es mucho mayor que el de neutralización.

Sin embargo, los resultados de celdas húmedas indican lo contrario; ya al inicio de la prueba los valores de pH son prácticamente neutros (pH = 7.63) y durante las 20 semanas de pruebas se mantuvieron las condiciones cercana a la neutralidad e incluso aumentaron ligeramente hasta alcanzar un pH, al final de la prueba, de 8.33.

3. La generación de acidez registrada, durante la prueba cinética de celdas húmedas, en las muestras de jales de Tizapa y Charcas ocurre debido a la oxidación de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) que es un mineral que fue debidamente identificado, por DRX, en estudios previos, y que es el sulfuro metálico más importante, que ha sido ampliamente reportado en la literatura especializada, que al oxidarse puede generar drenaje ácido.

4. En las muestras de jales de Charcas (JCHIII, JCHVII, JCHX y JCHVB) y Tizapa (JTZ11), la acidez liberada por la oxidación de la pirita fue consumida por la disolución/alteración de los minerales alcalinos presentes en la muestras y que fueron identificados debidamente por DRX; lo que explica los valores de pH prácticamente neutros y ligeramente básicos en los lixiviados durante las 20 semanas de la prueba de celda húmeda.

4.1 En las muestras de jales de Charcas (JCHIII, JCHVII y JCHX), el consumo de acidez se debió, principalmente la disolución calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) que fue debidamente identificado por DRX en estas muestras y que es el mineral alcalino que ha sido más ampliamente reportado como el más importante en los procesos de neutralización del drenaje ácido de minas.

4.2 En el caso de una de las muestras de jales de Charcas (JCHVB), no fue identificada la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) en su composición mineralógica, por lo que el consumo de acidez no puede ser atribuido a su disolución. Sin embargo, se identificó el mineral denominado wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ), cuya importancia también ha sido valorada y reportada en los procesos de neutralización del drenaje ácido de minas.

4.3 En el caso de una de las muestras de jales de Tizapa (JTZ11), no fue identificada la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) en su composición mineralógica, por lo que el consumo de acidez no puede ser atribuido a su disolución. Sin embargo, se identificó el mineral denominado plagioclasa  $[(\text{Na,Ca})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ , cuya importancia ha sido poco valorada y reportada en los procesos de neutralización del drenaje ácido de minas; lo que sería un aporte interesante y novedoso de este trabajo de tesis.

5. En 2 muestras de jales de Tizapa (JTZ1 y JTZ6), los resultados indican que no tienen suficiente cantidad de minerales consumidores de acidez, ya que la disolución/alteración de la clorita y moscovita (minerales debidamente identificados por DRX) no fue suficiente para consumir todos los protones ( $\text{H}^+$ ) generados por la oxidación de la pirita, lo que derivó en los bajos valores de pH en los lixiviados de las muestras JTZ1 y JTZ6 al final de la prueba cinética de celdas húmedas.

6. En los jales que no serán generadores de drenaje ácido (Charcas: JCHIII, JCHVII, JCHX, JCHVB y Tizapa: JTZ11), los resultados indican que en el medio neutro y básico, que se alcanza durante las pruebas de celda húmeda, los elementos potencialmente tóxicos no se liberan al ambiente y permanecen en la fase sólida (con excepción del Zn, Si y ocasionalmente Cd), lo que explica las muy bajas o no detectadas concentraciones disueltas de los contaminantes en los lixiviados obtenidos durante la prueba de celdas húmedas de la muestra JTZ11.

En el caso del Zn y el Cd, el aumento de las concentraciones se puede explicar debido al hecho de que éstos son de los pocos metales pesados se puede liberar de la fase sólida y pasar a la fase acuosa en ambientes neutros y básicos, según ha sido reportado en la literatura especializada.

En el caso del Si, nuestros resultados indican que bajo las condiciones de pH neutro y ligeramente básico, que se alcanzan en los lixiviados obtenidos de las celdas húmedas, puede permanecer parcialmente en forma disuelta, lo que explica que en todas las muestras de los lixiviados se detectaron concentraciones de Si disuelto ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ).

7. En los jales que serán generadores de drenaje ácido (Tizapa: JTZ1 y JTZ6), los resultados indican que en el medio ácido, que se alcanza durante las pruebas de celda húmeda, los elementos potencialmente tóxicos se liberan al ambiente y permanecen en forma disuelta en la fase líquida; lo que explicaría las relativamente altas concentraciones disueltas, de estos contaminantes, determinadas en los lixiviados obtenidos durante la

prueba de celda húmeda, lo que permitiría clasificarlos como peligrosos para el ambiente, ya que si no se toma medidas de control podrían contaminar cuerpos de aguas superficiales y subterráneos.

8. Podemos concluir que los resultados de las pruebas cinéticas de celdas húmedas indican que las pruebas estáticas de balance ácido-base (BAB) no son suficientes para la valoración de la peligrosidad de los jales que provienen de yacimientos del tipo sulfuros masivos, lo que se debe a que la prueba BAB solo considera el papel de los carbonatos para el potencial de neutralización, lo que es insuficiente cuando en la muestra existen otros minerales alcalinos en cantidad suficiente para consumir la acidez generada como es el caso de la muestra JTZ11, donde la plagioclasa juega el papel principal como mineral neutralizador, como lo demostraron los resultados de las pruebas cinéticas de celdas húmedas realizadas.

9. Se puede sugerir a las empresas hacer este tipo de pruebas cinéticas con jales ya antiguos y recientes para poder pronosticar un tiempo estimado en el que se pueda presentar DAM y liberación de EPT.

10. Finalmente se podría recomendar a la SEMARNAT que se incluyera este experimento como un apartado de la NOM 141 para complementarla y tener un rango más amplio de detección en el DAM así como su posible detección a tiempo para evitar las afectaciones al medio ambiente y poder planear una estrategia de remediación en el caso de que sea inevitable.

## VII BIBLIOGRAFÍA

- American Society for Testing and Materials. ASTM D3987 Modified test for shake extraction of solid waste with water. ASTM Volume 11.04 Waste Management 2012.
- Balistrieri, Laurie S., Box, Stephen E., Bookstrom, A.A., Ikramuddin, M. Washington, DC, United States, 1999. Assessing the Influence of Reacting Pyrite and Carbonate Minerals on the Geochemistry of Drainage in the Coeur d'Alene Mining District.
- Campbell C. David Manejo de Material Estéril Proyecto Óxidos, Potencial Generación de Drenajes Ácidos. Calama 2006
- Cravotta, C.A., III, and Trahan, M.K., Limestone drains to increase pH and remove dissolved metals from acidic mine drainage. *Applied Geochemistry*, v. 14, 1999
- Dold Bernhard, Fontboté Lluís. Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. *Journal of Geochemical Exploration* Volume 74, Issues 1–3, December 2001.
- Evangelou VP, Zhang, YL (1995) A Review: Pyrite Oxidation Mechanisms and Acid Mine Drainage Prevention. *Environ Sci Tech* 25 (2): 141-199.
- Faure, Gunter. Principles and applications of Inorganic Geochemistry. Macmillan Publishing Company, 1991.
- Fernández-Caliani J.C., Barba-Brioso C., Pérez-López R., Long-term interaction of wollastonite with acid mine water and effects on arsenic and metal removal, *Applied Geochemistry*, Volume 23, Issue 5, May 2008.
- Holmström H, Salmon U. J., Carlsson, Erik, Petrov P., Öhlander B., Geochemical investigations of sulfide-bearing tailings at Kristineberg, northern Sweden, a few years after remediation, *Science of The Total Environment*, Volume 273, Issues 1–3, 12 June 2001
- Lawrence, R.W., Predicting the impact of the disposal of mining and processing wastes. Proc. 4th Western Regional Conference on Precious Metals and the Environment, Lead, S. Dakota, Sept 19-22, 1-12, 1990.
- Luna Celis, Leonel. Mineralogía y Geoquímica de los jales de la Unidad Minera Charcas, San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería, UNAM 2007 Tesis de Licenciatura.
- Martínez Soriano Crescencio. Evaluación de la peligrosidad de jales y lixiviados de una mina de sulfuros masivos del estado de México. Facultad de Ingeniería, UNAM 2011 Tesis de Licenciatura.



- Méndez, M., Armienta, M. A.. Arsenic phase distribution in Zimapán mine tailings, Mexico 2003.
- Morin Kevin A. and Hutt Nora M. Environmental geochemistry of minesite drainage: Practical theory and case studies. MDAG Publishing, Vancouver, B.C., Can. 1997.
- Nuttall Charlotte A., Younger Paul L. Assessment and experimental passive treatment of zinc-rich net alkaline minewaters, Nent Valley, UK. Department of Civil Engineering, University of Newcastle upon Tyne, 2000.
- R.G, McGregor, Blowes D.W, Jambor J.L, Robertson W.D, The solid-phase controls on the mobility of heavy metals at the Copper Cliff tailings area, Sudbury, Ontario, Canada, Journal of Contaminant Hydrology, Volume 33, Issues 3–4, October 1998.
- República del Perú, Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros. Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas 1994.
- Romero FM, Núñez-Alvarez L, Gutiérrez ME, Armienta MA, Ceniceros A. Evaluation of the potential of indigenous calcareous shale for neutralization and removal of arsenic and heavy metals from acid mine drainage in the Taxco mining area, Mexico. Archives of Environmental Contamination and Toxicology 2011.
- Romero FM, Gutiérrez ME. Problemática ambiental asociada a jales en dos zonas mineras localizadas en el centro y sur de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 2010.
- Servicio Geológico Mexicano. Monografía Geológico-Minera del Estado de México. Servicio Geológico Mexicano (SGM), Pachuca Hidalgo. Edición 2008 y Monografía Geológico-Minera del Estado de San Luis Potosí. Servicio Geológico Mexicano (SGM), Pachuca Hidalgo. Edición 2008.
- Steffen, Robertson and Kirsten (B.C.) Inc. in association with Norecol Environmental Consultants and Gormely Process Engineering. Draft Acid Rock Drainage Technical Guide. Province of B. C., Ministry of Energy Mines and Petroleum Resources 1989.
- U.S. Geological Survey. Method EPA 1312 Synthetic Precipitation Leaching Procedure 1994.
- Vick, S.G. 1990. Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. BiTech Publishers Ltd
- White William M. Geochemistry. Wiley-Blackwell; 1 edition 2013.
- Zhixun Lin. Mobilization and retention of heavy metals in mill-tailings from Garpenberg sulfide mines, Sweden. Science of The Total Environment, Volume 198, Issue 1. Environmental Geology, Institute of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden 1997.

## Páginas de Internet

Cristina Cortinas de Nava. Manejo ambiental de los relaves o jales mineros. Instituto Nacional de Ecología.

<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/gacetas/155/cortinas.html>

San Luis Potosí, México.

[http://www.charcas.com.mx/web/index.php?option=com\\_content&task=view&id=23&Itemid=46](http://www.charcas.com.mx/web/index.php?option=com_content&task=view&id=23&Itemid=46)

Secretaría de medio ambiente y recursos naturales.

<http://www.semarnat.gob.mx>

Zacazonapan, Estado de México.

<http://www.estadodemexico.com.mx/portal/zacazonapan/index.php?id=4>

## NORMAS OFICIALES MEXICANAS

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) 2005, NOM 52 Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. México, D.F., Diario Oficial de la Federación, 23 de junio de 2006.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) 1993, NOM 53 NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-053-ECOL-1993, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Diario Oficial de la Federación, 22 de octubre de 1993.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) 1993, NOM 54 Norma Oficial Mexicana NOM-054-SEMARNAT-1993, que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la norma oficial mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993. Diario Oficial de la Federación, 22 de octubre de 1993.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) 2003, NOM 141 Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. México, D.F., Diario Oficial de la Federación, 13 de septiembre de 2004.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que contribuyeron en la realización de este trabajo, que sin su apoyo incondicional no hubiera sido posible este proyecto:

- Al Dr. Francisco Martín Romero del Instituto de Geología de la UNAM, por haber sido mi director de tesis y tenerme la paciencia del mundo para realizar este trabajo de investigación.
- Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología de la UNAM, Q.F.B. Fabiola Vega García, Químico Industrial Inés Ramos Bautista
- Laboratorio de Aguas del Instituto de Geología de la UNAM, Dra. Olivia Zamora Martínez
- Laboratorio de Bioquímica Ambiental de la Facultad de Química de la UNAM, Dr. Ciro Márquez Herrera
- Laboratorio de Difracción de Rayos X del Instituto de Geología de la UNAM, Dra. Teresa Pi I Puig
- Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X, Ing. Químico Rufino Lozano SantaCruz
- Dra. Rosa María Prol Ledesma del Instituto de Geofísica de la UNAM y su proyecto de CONACyT-SEMARNAT-2004-01-350 "Análisis Comparativo de Desechos Mineros para su Manejo Ambiental Sustentable", por todo el apoyo incondicional y motivación que me brindó desde el primer día y hasta la fecha, muchas gracias.
- Al Ing. Eduardo Guerrero Leyva (D.E.P), por todas sus enseñanzas.
- A mis hermanos Hatziri Flores Mendoza y José Luis Flores Mendoza por su apoyo que me han dado toda la vida incondicionalmente.
- A José Manuel Campaña Bejarano por la sana competencia que me impulso a terminar este trabajo.
- A Adrián Valverde Arreguín por estar en los momentos buenos y malos siempre dentro y fuera de la Facultad.
- A mis compañeros de la Facultad durante mi estancia que de alguna u otra forma nos apoyábamos siempre para seguir y salir adelante.
- A la Facultad de Ingeniería en general por haberme dado la oportunidad de estudiar las Ciencias de la Tierra y enseñarnos esa parte Humana de las Ciencias Sociales que es tan vital para la formación de un Ingeniero.
- A Giselle Somuano Soto por apoyarme siempre en todo momento.