



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación de la peligrosidad de jales
mineros por su capacidad para generar
drenaje ácido en una mina de hierro**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Elí Nathanael Rivera Moreno

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Francisco Martín Romero



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Agradecimientos

Agradezco:

A Dios por todo lo que me ha dado.

Al pueblo de México ya que este logro es gracias a él.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por todas las puertas que me ha abierto, porque por “tan solo 20 centavos” de inscripción anual obtuve una educación envidiable y aun cuando no estoy de acuerdo con todo, no puedo negar que es para mí un orgullo ser egresado de la Máxima Casa de Estudios.

A la Facultad de Ingeniería por todas las oportunidades que brinda y que supe aprovechar, a todos mis profesores les agradezco por dotarme de conocimiento, agradezco en especial a aquellos que se preocuparon por formar seres humanos de calidad antes que buenos ingenieros, siempre los voy a respetar y admirar.

A mi director de tesis el Dr. Francisco Martín Romero, por todas las facilidades y apoyo brindado durante la realización del servicio social y esta tesis.

Al Dr. Gerardo Martínez por todo el apoyo y paciencia que me tuvo durante este ciclo.

A la Maestra Ana Alejandrina Castro Rodríguez, al Maestro José Enrique Santos Jallath y al Maestro José de Jesús Huevo Casillas les agradezco enormemente todo el apoyo, confianza y facilidades que me dieron para poder culminar este ciclo.

A todo el personal del LGA (Alicia, Astrid, Daniel, Fabiola e Inés y a mis compañeros de servicio social) por su ayuda y amistad.

Al Dr. Daniel Moncada le agradezco su amistad y apoyo, gracias a él tuve la oportunidad de realizar un viaje que pocos han emprendido.

A mi familia en especial a mis padres Laila y Raúl que siempre estuvieron ahí para mí, siendo un pilar, apoyándome con su forma poco convencional de ser, pero sincera. A mis hermanos, Nidia gracias por todo el apoyo otorgado y gracias Raúl por todo, por todo tu apoyo y tus enseñanzas eres un ser admirable prometo no *olvidar a donde pertenezco y de que lado estoy*. A mi sobrina Emilia que, aunque eres muy pequeña para comprender ciertas cosas eres muy inteligente y tienes que saber y no olvidar eres una luz en nuestro camino.

Los amo familia, sin ustedes este logro no hubiera sido posible.

A todos mis amigos:

Los de la primera generación: José Luis agradezco por todos estos años de amistad, siempre apoyándome en todo, sé que siempre vas a estar ahí, y yo estaré ahí carnalazo, Fernando te agradezco por todos los años de amistad, especialmente porque la motivación directa o indirecta que me orillo a estudiar esta carrera y sin saber, lo volviste a hacer amigo (verás que todo es para bien).

A los de la segunda generación: mis amigos de la “prepa y más”: Edmundo, Borrás, Héctor, Rodrigo, Anaid, JP, Emzo, Pai, Juan CM, Omar García, Abril y a todos los que me faltan, les agradezco tantos ratos de diversión, motivación y por sus consejos.

A los de la tercera generación: Arody, Escudero, Paquito, Ashanti, MaFer, Danilo, Michael, Cloro, Lazca, Edgar, Brig, Adrián, Juan y especialmente a mi carnal Jaime y al camarada Alfredo gracias por todo amigos, y bueno también a los que se me escapan, les agradezco por tantos buenos momentos y consejos. Que nunca se acabe Zihuatán 6.

A la M.C. Eliana Rosas Verdugo le agradezco por realizar la primera revisión a este trabajo y por ser la motivación ideal, por ser la estrella que me guío hacia el norte, por ser esa motivación que me llevo a dar el siguiente paso en mi formación académica.

Los quiero mucho amigos.

Quisiera ser más puntual, detenerme y agradecer a cada uno como realmente se merece, ser más extenso, pero al final escribiría más palabras que las que tiene la propia tesis.

No me queda mucho por decir, solo: Espere la segunda ronda de agradecimientos, fecha tentativa 2k20.

ÍNDICE

RESUMEN	VII
ABSTRACT.....	IX
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Yacimientos minerales en México.....	3
2.2. Drenaje ácido de mina y residuos mineros	5
2.3. Procesos geoquímicos asociados a los jales.....	8
2.4. Pruebas utilizadas para valorar y predecir el comportamiento de los jales mineros.	11
2.5. Peligrosidad de los jales de acuerdo a la Normatividad Mexicana	16
2.6. Omisiones en la evaluación de la capacidad para generar drenaje ácido.....	19
CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES	21
3.1. La minería en México	21
3.2. Problemas ambientales asociados a la minería.....	22
3.3. Peligrosidad de los jales de la mina de estudio	23
CAPÍTULO 4. MARCO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO Y SOCIOECONÓMICO	23
4.1. Localización del área de estudio	23
4.2. Proceso de explotación en la mina de estudio.....	24
4.3. Geología regional	25
4.4. Geología local.....	25
4.5. Geología estructural	27
4.6. Descripción del yacimiento mineral.....	28
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA	30
5.1. Campaña de muestreo	30
5.2. Prueba Modificada Balance Acido-Base	31
5.3. Alternativa para la evaluación del potencial de generación de drenaje ácido de mina. ...	36
5.4. Identificación de las fases cristalinas	41
5.5. Validación a través del intemperismo acelerado.....	48
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48

6.1. Prueba Modificada de Balance Acido-Base (PM-ABA).....	48
6.2. Evaluación de la peligrosidad a través de la Fluorescencia de Rayos X (FRX).....	52
6.3. Identificación de las fases cristalinas	55
6.4. Validación a través del intemperismo acelerado.....	58
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
7.1. Peligrosidad de los jales en las muestras originales.....	59
7.2. Comparación entre los tres balances.....	61
7.3. Validación a través del intemperismo acelerado.....	62
7.4. Recomendaciones.....	63
BIBLIOGRAFÍA	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 límites máximos permisibles de concentraciones de EPT que hacen de los jales peligrosos por su toxicidad (NOM-052-SEMARNAT-2005)	17
Tabla 2. Agrupación de minerales según su capacidad de neutralización tomada de (Kwong Y. J., 1993)	20
Tabla 3. Cálculo de volumen de HCl para determinar el PN (NOM 141-SEMARNAT 2003).....	33
Tabla 4. Masas atómicas y molar de los elementos y compuestos involucrados en el PN.	37
Tabla 5 Masas atómicas y molares de los elementos involucrados en el PA.	39
Tabla 6. Minerales identificados a través de la técnica de DRX, su fórmula química correspondiente y grado de reactividad para los elementos neutralizantes.....	42
Tabla 7. Mineralogía determinada a partir de DRX para la muestra compuesta 1.	43
Tabla 8. Minerales que contienen calcio en la muestra compuesta 1.	44
Tabla 9. Porcentaje normalizado de los minerales que contienen calcio para la muestra compuesta 1.....	44
Tabla 10. Porcentaje de calcio aportado por cada mineral que interviene el proceso de neutralización para la muestra compuesta 1.....	45
Tabla 11. Porcentaje relativo de clorita en relación a los piroxenos para la muestra compuesta 1.	45
Tabla 12. Aporte a la neutralización de la clorita para la muestra compuesta 1	46
Tabla 13. Porcentaje ajustado de neutralización en la muestra compuesta 1	46
Tabla 14. Valores de pH para las muestras compuestas.	59
Tabla 15 Matriz de correlación entre los tres balances calculados para las 127 muestras.	62
Anexo B Tabla 16 con los resultados de PM-ABA.....	69
Anexo C Tabla 17 Resultados del balance catiónico.....	73
Anexo D Tabla 18 Resultados de la Difracción de Rayos X (DRX).....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Participación en la producción minera de mineral de hierro en México para el 2017 (11.7 millones de toneladas)	1
Figura 2. Distribución de las franjas mineralizadas en México (Clark Kenneth, Foster C, & Damon Paul, 1982)	4
Figura 3. Yacimientos de hierro en la franja paralela a la costa pacífica en México (SW) (Trilla, Jordi; et al., 2003)	5
Figura 4 Mapa de localización del yacimiento mineral. (Corona-Esquivel et al., 2009)	24
Figura 5 Mapa geológico del yacimiento de Peña Colorada, Colima. (Corona-Esquivel y Henríquez, 2004).	27
Figura 6 Columna estratigráfica del área Minatitlán-Peña Colorada. (Corona-Esquivel & Henríquez, 2004)	30
Figura 7. Mapa de la presa de jales Guásimas donde se observa la ubicación de los diferentes tipos de muestras.	31
Figura 8. Difractograma comparativo de las muestras compuestas o grupos. El eje x representa el ángulo de difracción mientras que el eje y representa la intensidad de la difracción observada.	42
Figura 9. Valores de PN para las 127 muestras simples, no es clara una tendencia de acuerdo a la zona.	49
Figura 10 Valores de Potencial de Acides (PA) de acuerdo a la Prueba Modificada de Balance Acido – Base para las 127 muestras.	49
Figura 11. Valores de Potencial de Neutralización Neto para las 127 muestras de acuerdo a la Prueba Modificada de Balance Acido-Base (PM-ABA)	50
Figura 12. Porcentaje de azufre presente como sulfuro en las muestras contra el PNN de las mismas.	51
Figura 13. Sobre la imagen de la presa de jales se ha colocado la interpolación de los valores del PNN.	51
Figura 14 Valores de Potencial de Neutralización que se obtiene a través del análisis de Fluorescencia de Rayos x (PN_{FRX}). Obsérvese que el valor mínimo en el eje y es 90.	52
Figura 15. Valores del PA calculado a partir de la FRX. Obsérvese que el valor mínimo para esta grafica en el eje y es igual a 200.	53
Figura 16 valores de PNN obtenidos de FRX	53
Figura 17 valores del porcentaje de sulfuro estimado de la pirita calculado a partir del porcentaje de Fe determinado por FRX contra los valores del PNN que se obtiene de hacer el balance PN_{FRX}/PA_{FRX} . Nótese que ninguno de los dos ejes comienza en 0.	54
Figura 18 Presa de jales Guásimas y sobre esta la interpolación de los valores de PNN_{FRX}	55
Figura 19. Valores de PNN para las 6 muestras compuestas. Se pueden observar las tres determinaciones.	56

Figura 20. Valores de los diferentes tipos de balance acido-base para las 6 muestras compuestas	56
Figura 21. Mapa de la presa de Jales Guásimas, se ha sobrepuesto la interpolación de los valores de PNN (PM-ABA) y sobre esta se colocaron las muestras a partir de las cuales se han generado las muestras de compuestas, el valor que es visible en sobre cada punto representa el valor de $PN_{DRX/PA}$ para cada muestra.....	57
Figura 22 Interpolación de los valores del balance híbrido, sobre esta los valores de PNN de la PM-ABA	58
Figura 23. Gráfica de PNN: FRX vs PM-ABA	60
Figura 24. Gráfica que se obtienen de hacer el bance de los valores de PN_{FRX} ajustado sobre el PA de la PM-ABA contra el PNN de PM-ABA	61
Figura 25. Gráfica de las muestras a partir de las cuales se formaron las muestras compuestas o grupos.	68

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A selección de muestras para generar las seis muestras compuestas.....	68
Anexo B Tabla 16 con los resultados de PM-ABA.....	69
Anexo C Tabla 17 Resultados del balance catiónico.....	73
Anexo D Tabla 18 Resultados de la Difracción de Rayos X (DRX).....	77

Resumen

La minería es una de las actividades económicas más importantes a nivel mundial. Ésta no sólo genera grandes utilidades, sino también grandes cantidades de residuos de granulometría fina denominados jales.

De acuerdo a la experiencia nacional e internacional, la peligrosidad de los jales está en función de su capacidad para la generación de drenaje ácido de mina, la cual ocurre debido a la oxidación de los sulfuros metálicos (principalmente los de Fe), en presencia de agua y aire. Sin embargo, cuando hay suficiente cantidad de minerales consumidores de acidez (carbonatos y aluminosilicatos de calcio, principalmente); el ácido generado es eficientemente neutralizado.

Si hay condiciones para la generación de drenaje ácido de mina (DAM), se puede propiciar el transporte de elementos potencialmente tóxicos (EPT), en forma soluble, a través de las escorrentías que se forman en épocas de lluvia, cuyo destino final son los cuerpos de agua superficial ubicados en los alrededores de las presas de jales; lo que puede poner en riesgo al ecosistema.

La Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, en su anexo normativo 5 punto II, indica que, para valorar la capacidad de generación de DAM en un apresa de jales, se debe utilizar la denominada "Prueba Modificada Balance Acido-Base (PM-ABA)", la cual es una de las metodologías más comunes, internacionalmente, para determinar si los jales son potencialmente generadores o no de DAM. Dicha metodología tiene como objetivo final la determinación del valor de Potencial de Neutralización Neto (PNN), que se obtiene al realizar el balance entre la capacidad para generar acidez (cantidad de minerales productores de acidez) y la capacidad de neutralización (cantidad de minerales consumidores de acidez).

Con el fin de determinar la capacidad de generación de DAM, por el método convencional y normado en México, en el presente estudio se aplicó la PM-ABA en 133 muestras de jales de una mina de hierro estado de Colima, en el municipio de Minatitlán. Debido a que la prueba PM-ABA permite estimar la potencial generación de acidez a través de la cuantificación del azufre como sulfuro (considera en la generación de acidez a todos los sulfuros metálicos que puedan estar presentes en los jales) y sólo permite estimar el consumo de acidez (neutralización) a través de la cuantificación de los carbonatos asociado a la calcita (CaCO_3); se considera que la aplicación de esta prueba PM-ABA puede derivar en: (i) la sobre-estimación del potencial de acidez, al considerar a todos los sulfuros; y ya ha sido demostrado que solamente los sulfuros de Fe contribuyen a la generación de acidez. Así mismo, la aplicación de esta prueba puede conllevar a una subestimación de la capacidad de neutralización al no considerar otros minerales de calcio como el de los Ca-aluminosilicatos.

En este trabajo de tesis se propone un método alternativo para estimar la capacidad potencial para la generación de DAM a través de la concentración total de Ca y Fe, determinada por Fluorescencia

de Rayos X, con el fin de considerar en la generación de drenaje ácido, todos los sulfuros de Fe; y para considerar en la capacidad de neutralización a todos los carbonatos y aluminosilicatos e hidróxidos.

Considerando los resultados de las prueba y análisis anteriores, se formaron 6 muestras compuestas. A estas muestras compuestas se les aplicó la prueba PM-ABA, se les determinó la concentración total de Ca y Fe y se les determinó la composición mineralógica. Finalmente, estas muestras fueron sometidas a la prueba de oxidación acelerada con H_2O_2 , con el fin de valorar cuál de los métodos (el convencional normado en México o el propuesto en este estudio) es el más adecuado para la estimación del potencial de generación de DAM en los jales de estudio.

La composición mineralógica semicuantitativa determinada por Difracción de Rayos X en las seis muestras compuestas permitió:

1) Que el Fe presente en los jales puede estar asociado a sulfuros (pirita) y a óxidos (magnetita y hematita). Estos resultados permiten afirmar que el potencial de acidez no puede ser determinado a través de la concentración total de Fe (método alternativo propuesto en este estudio, ya que el Fe contenido en los óxidos no participa en la generación de acidez) por lo que se concluye que el mejor método para determinar el potencial de acidez es a través del contenido de azufre como sulfuro, tal como lo indica la prueba PM-ABA de la normatividad ambiental mexicana.

2) Que el Ca puede estar asociado a carbonatos (calcita y aragonita) y a aluminosilicatos (Augita-Ensatita) y además otros minerales participan en el proceso de neutralización. Debido a que estos minerales de tienen una reactividad relativa diferente, se propuso un factor de corrección en la concentración total de Ca, determinado por FRX, con el fin de estimar con mayor certidumbre, el potencial de neutralización de los jales estudiados.

Con base en estos resultados se propone un método alternativo para determinar el potencial de generación de DAM de los jales de estudio que consiste en: (i) Estimar el potencial de acidez a través del contenido azufre como sulfuro, tal como lo indica la PM-ABA, en la normatividad ambiental mexicana. (ii) Estimar el potencial de neutralización a través del contenido total de Ca, determinado por FRX, y modificado con el factor de corrección debido a la presencia de minerales de que participan en el proceso de neutralización con diferente reactividad.

La prueba de oxidación acelerada utilizando H_2O_2 , en las seis muestras compuestas, permite concluir que el método propuesto, en este estudio, para determinar el potencial de acidez de los jales de estudio es más adecuado que el método indicado en la normatividad ambiental mexicana.

Palabras clave

Drenaje Ácido de Mina (DAM), Potencial de Neutralización Neto (PNN), Prueba Modificada Acido-Base (PM-ABA), Jales mineros.

Abstract

Mining is one of the most important economic activities worldwide. This not only generates large profits, but also large amounts of fine granulometry waste called tailings.

According to national and international experience, the danger of tailings is a function of their capacity for the generation of acid mine drainage, which occurs due to the oxidation of metal sulfides (mainly Fe), in the presence of water and air. However, when there is sufficient quantity of acid-consuming minerals (carbonates and calcium aluminosilicates, mainly); the acid generated is efficiently neutralized.

If there are conditions for the generation of acid mine drainage (DAM), it is possible to promote the transport of potentially toxic elements (ETP), in a soluble form, through the runoff that forms during rainy seasons, whose final destination is the bodies of surface water located in the vicinity of the tailings dams; what can put the ecosystem at risk.

The Official Mexican Standard NOM-141-SEMARNAT-2003, in its normative annex 5 point II, indicates that, in order to assess the generation capacity of DAM in a tailings harness, the so-called "Modified Acid-Base Balance Test (PM-ABA) ", which is one of the most common methodologies, internationally, to determine if the tailings are potentially generators or not of DAM. The final objective of this methodology is to determine the Net Neutralization Potential (NNP) value, which is obtained by making a balance between the capacity to generate acidity (quantity of acid-producing minerals) and the neutralization capacity (quantity of consumer minerals). of acidity).

In order to determine the capacity of generation of DAM, by the conventional method and regulated in Mexico, in the present study the PM-ABA was applied in 133 tailings samples from an iron mine state of Colima, in the municipality of Minatitlán. Because the PM-ABA test allows estimating the potential generation of acidity through the quantification of sulfur as sulfur (it considers in the generation of acidity all metal sulfides that may be present in the tailings) and only allows to estimate the consumption of acidity (neutralization) through the quantification of carbonates associated with calcite (CaCO_3); it is considered that the

application of this PM-ABA test can result in: (i) the over-estimation of the acidity potential, when considering all the sulfides; and it has already been shown that only Fe sulfides contribute to the generation of acidity. Likewise, the application of this test can lead to an underestimation of the neutralization capacity when not considering other calcium minerals such as Ca-aluminosilicates.

In this thesis an alternative method is proposed to estimate the potential capacity for the generation of AMD through the total concentration of Ca and Fe, determined by X-Ray Fluorescence, in order to consider the generation of acid drainage, all the sulfides of Fe; and to consider in the neutralization capacity all carbonates and aluminosilicates and hydroxides.

Considering the results of the previous tests and analyzes, 6 composite samples were formed. The PM-ABA test was applied to these composite samples, the total concentration of Ca and Fe was determined and the mineralogical composition was determined. Finally, these samples were subjected to the accelerated oxidation test with H_2O_2 , in order to assess which of the methods (the conventional norm in Mexico or the one proposed in this study) is the most suitable for estimating the generation potential of DAM. in the study posts.

The semiquantitative mineralogical composition determined by X-ray diffraction in the six composite samples allowed:

1) That the Fe present in the tailings can be associated with sulfides (pyrite) and oxides (magnetite and hematite). These results allow to affirm that the potential of acidity cannot be determined through the total concentration of Fe (alternative method proposed in this study, since the Fe contained in the oxides does not participate in the generation of acidity) so it is concluded that the best method to determine the acidity potential is through the sulfur content as sulfur, as indicated by the PM-ABA test of the Mexican environmental regulations.

2) That Ca can be associated with carbonates (calcite and aragonite) and aluminosilicates (Augita-Ensatite) and also other minerals participate in the neutralization process. Because these minerals have a different relative reactivity, a correction factor was proposed in the total concentration of Ca, determined by FRX, in order to estimate with greater certainty, the neutralization potential of the tailings studied.

Based on these results, an alternative method is proposed to determine the generation potential of DAM of the study tails, which consists of: (i) Estimating the acidity potential

through the sulfur content as sulfur, as indicated by the PM- ABA, in Mexican environmental regulations. (ii) Estimate the neutralization potential through the total Ca content, determined by FRX, and modified with the correction factor due to the presence of minerals that participate in the neutralization process with different reactivity.

The accelerated oxidation test using H_2O_2 , in the six composite samples, allows us to conclude that the proposed method, in this study, to determine the acidity potential of the study tailings is more appropriate than the method indicated in the Mexican environmental regulations.

Keywords

Acid Mine Drain (DAM), Net Neutralization Potential (PNN), Modified Acid-Base Test (PM-ABA), Mine Tails

Capítulo 1. Introducción

A través de la historia la minería ha sido una de las actividades económicas más importantes en México. La extracción y beneficio de minerales con un sentido económico comenzó en la época de la Colonia, cuando se fundaron importantes ciudades como Guanajuato, San Luis Potosí, Zacatecas, Taxco, Chihuahua y Durango. Según la Secretaría de Economía al mes de julio de 2015, la minería generó 352 mil 666 empleos directos y más de 1.6 millones de empleos indirectos, de acuerdo con el reporte del Instituto Mexicano del Seguro Social. Actualmente el sector minero-metalúrgico en México contribuye con el 4 por ciento del Producto Interno Bruto nacional (Secretaría de Economía, 2017).

De acuerdo con datos del INEGI, en 2017 se produjeron 11.7 millones de toneladas (contenido metálico) con una caída de 3.1% respecto del año anterior en México.

El principal productor de mineral de hierro fue el estado de Coahuila con una participación de 32% de la producción total, en segundo lugar, se ubica el estado de Colima con el 26.1% de participación y Michoacán ocupó el tercer puesto. (CAMIMEX, 2018)



Figura 1. Participación en la producción minera de mineral de hierro en México para el 2017 (11.7 millones de toneladas)

La producción en 2017 de pellet de mineral de hierro fue similar a la conseguida en 2016. Durante el año se produjeron 6.93 millones de toneladas, en contenido metálico de acuerdo con datos del INEGI.

Los principales productores de pellet de mineral de hierro fueron los estados de Colima, Coahuila y Michoacán. (CAMIMEX, 2018)

Gracias a los avances del conocimiento, los equipos y las técnicas para esta actividad, es posible obtener grandes volúmenes extractivos, de los cuales sólo un porcentaje mínimo (alrededor de 1-2%), es material de importancia económica o mena.

La minería genera un impacto ambiental de importancia, ya que el medio ambiente se ve comprometido tanto por la utilización de productos, tales como el agua, aditivos y energía necesarios para la obtención de mena tanto por los residuos generados (González Sandoval, 2006).

Los residuos se hacen presentes en más de una etapa del ciclo minero. Primeramente, durante la etapa de minado se generan residuos de granulometría gruesa, conocidos como terreros y tepetates, que son menos reactivos a las condiciones oxidantes. Posteriormente, durante los procesos de beneficio y refinación donde se generan los residuos de granulometría fina, conocidos como jales, los cuales son dispuestos en presas y son más reactivos ante condiciones oxidantes debido a que hay una mayor superficie expuesta.

Uno de los problemas ambientales más graves a los cuales se enfrenta la minería es la generación de Drenaje Ácido de Mina (DAM), este se hace presente cuando los residuos de yacimientos minerales explotados poseen un alto contenido de sulfuros metálicos, mayormente pirita (FeS_2) que al entrar en contacto con factores oxidantes como agua, aire e incluso algunos microorganismos, genera ácido sulfúrico y si no existe suficiente material que sea capaz de neutralizar la acidez, como por ejemplo roca caliza que está constituida en su mayoría por el mineral calcita (CaCO_3) se generara el DAM.

En el presente trabajo se analizaron 133 muestras de las cuales 6 son muestras compuestas, provenientes de la presa de jales de una mina de hierro en estado de Colima. Para cada una de ellas se determinó el Potencial de Neutralización Neto (PNN) conforme a la Prueba Modificada Balance Acido-Base (PM-ABA) señalada en el punto II del anexo normativo 5 de 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 postoperación de presas de jales (DOF, 2004).

Las muestras fueron analizadas con un equipo XRF, el cual es un analizador portátil de fluorescencia de rayos X (Modelo: Thermo Scientific Niton XL3t), por otro lado, para las 6 muestras compuestas se realizó la determinación de la mineralogía asociada utilizando el analizador portátil de Difracción de Rayos X modelo XRD-XRF TERRA, Olympus y por último se montó un experimento de erosión acelerada con peróxido de hidrogeno.

Los objetivos del presente estudio son determinar la peligrosidad de los jales por su capacidad de generación de DAM de acuerdo a la Normatividad Mexicana, realizar un balance catiónico para determinar la peligrosidad de los mismos jales a través las lecturas de Fluorescencia de Rayos X (FRX) que permitieron conocer la concentración de calcio (Ca) y hierro (Fe), determinar la mineralogía asociada a seis muestras compuestas a través de la Difracción de Rayos X (DRX) y determinar mediante el experimento de erosión acelerada que muestras generaran un lixiviado de pH ácido ya que de este modo fue posible establecer qué balance es más apegado a la realidad.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Yacimientos minerales en México

México es un país con abundantes recursos minerales que se encuentran dispuestos en zonas minero-metalúrgicas que se pueden llegar a delimitar. Los tipos de yacimientos que se han explotado a lo largo de la historia principalmente son: yacimientos epitermales presentes en Taxco, Guanajuato, Pachuca, Zacatecas

entre otros, los yacimientos de tipo skarn con presencia en Charcas, Zimapán, La Paz, Concepción del Oro entre otros, los yacimientos de tipo sulfuro masivo vulcanogenéticos que tiene expresión en Tizapa, Rey de Plata entre otros, los yacimientos tipo pórfido cuprífero como La caridad, Cananea entre otros y finalmente los yacimientos de hierro entre los cuales se encuentra Cerro de mercado, la Perla, Peña Colora, el Encino y Aquila.

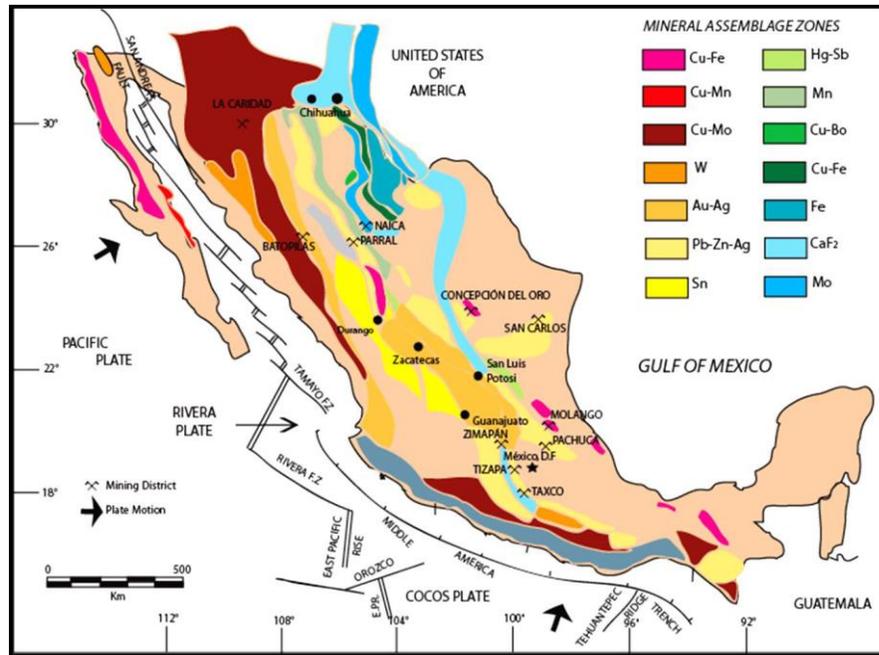


Figura 2. Distribución de las franjas mineralizadas en México (Clark Kenneth, Foster C, & Damon Paul, 1982)

2.1.1. Yacimientos de hierro en México

En México los depósitos de hierro están distribuidos principalmente en dos cinturones mineralizados el primero es el cinturón de hierro del NE de país que comprende a los depósitos de La Perla, Chihuahua, Cerro de Mercado, Durango y Hércules en Coahuila y el segundo es el cinturón de hierro del SW del país que incluye los depósitos Aquila, El Encino, Cerro Náhuatl y Peña Colorada. (Trilla, Jordi; et al., 2003)

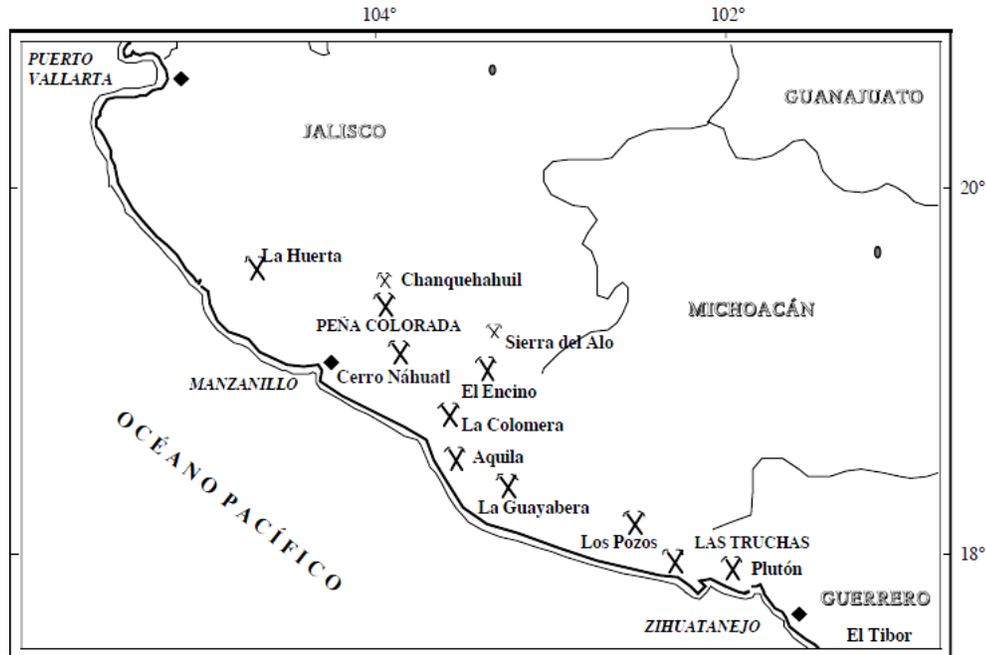


Figura 3. Yacimientos de hierro en la franja paralela a la costa pacífica en México (SW) (Trilla, Jordi; et al., 2003)

Se puede concluir que ambos cinturones comparten la misma génesis y que ambos evolucionaron a partir de un magma de mena de hierro rico en volátiles que, al disminuir el punto de fusión y densidad, generó una mayor movilidad y un emplazamiento como cuerpos intrusivos y extrusivos; éste es el caso de Cerro de Mercado, Durango; La Perla, Chihuahua; así como Peña Colorada, El Encino y Aquila. (Trilla, Jordi; et al., 2003)

2.2. Drenaje ácido de mina y residuos mineros

2.2.1. Generalidades de los residuos mineros

La obtención de minerales de importancia económica está asociada a la generación de grandes volúmenes de material sin interés económico, ya que para separar los minerales de mena de los de ganga es necesario realizar diversos procesos físico químicos. Los avances de en la tecnología se han reflejado en la industria minera en el aumento de la capacidad para la explotación mineral y en los procesos de beneficio tales como la flotación y la cianuración. Todo lo anterior resulta en una mayor generación de residuos de diferentes granulometrías como los

denominados terreros cuyo tamaño de partícula es grueso y no representan un gran peligro debido a su baja reactividad y los jales, que destacan entre los residuos por ser material de granulometría fina (arenas y limos) y representan un mayor peligro debido a que son más reactivos ya que tienen una mayor superficie expuesta.

En la industria minera uno de los depósitos finales del material inerte del producto del beneficio de mineral es una presa de jales. Con base en las condiciones geotécnicas del sitio en donde se planea construir esta obra, así como el material a emplear para la cortina contenedora y necesidades de operación existen varios tipos de presas (Espino, 2015). Los métodos de construcción son: aguas arriba, aguas abajo y línea central.

De acuerdo a la NOM-141-SEMARNAT-2003 las empresas mineras están obligadas a depositar los jales mineros en presas, que se deben diseñar en función de la zona para así poder reducir el riesgo al medio ambiente.

Una presa de jales está compuesta por cuatro elementos fundamentales:

a) Cortina contenedora o dique: este elemento que constituye una barrera contra el desplazamiento de la masa de jales hacia áreas adyacentes, por lo cual puede ser considerado como el elemento más importante del sistema de depósito. Para su construcción se pueden utilizar jales si es que su composición es ideal u algún otro material.

b) Vaso de almacenamiento: es la cavidad donde serán almacenados los jales en forma de pulpa, está delimitado por la cortina contenedora y en ocasiones por la misma geometría del terreno.

c) Sistema decantador drenante: es un sistema de tuberías de concreto que puede o no estar perforado, su función principal es recuperar el agua para poder reutilizarla.

d) Vertedor de excedencias: es un sistema de túneles o canales que permite desalojar escurrimientos, puede construirse en roca firme para prevenir colapsos o derrumbes.

2.2.2. Drenaje ácido de mina

El drenaje ácido de mina (DAM) es un problema ambiental que se genera cuando los jales mineros presentan abundante concentración de sulfuros metálicos, una cantidad insuficiente de materiales neutralizantes como la calcita y son expuestos a agentes oxidantes como el agua y el aire, lo que ocasiona que se generen ácido sulfúrico y sulfato férrico. Por lo que el DAM es una disolución caracterizada por presentar valores bajos de pH y en ocasiones altas concentraciones de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) disueltos. Este fluido puede convertirse en un gran problema ambiental ya que al transportarse puede contaminar cuerpos de agua superficiales y subterráneos, puede contaminar suelos al infiltrarse y también puede propiciar la dispersión de EPT a través del aire una vez que sea ha secado en la superficie.

Cabe mencionar que el proceso de oxidación se presenta de forma natural, pero es acelerado por la actividad antropogénica, ya que la actividad minera expone a los agentes oxidantes una mayor superficie del material.

La oxidación también puede ser acelerada en gran medida por la actividad bacteriana que puede promover la solubilización de cationes metálicos (González Sandoval, 2006).

2.2.3. Problemática ambiental asociada a los jales

a) Jales generados a partir de la explotación de yacimientos de sulfuros metálicos.

Estos jales generalmente contienen cantidades residuales de pirita (FeS_2), pirrotita (Fe_{1-x}S), galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (FeAsS) que son fuente de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) como el As, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, etc. (Romero, Armienta, & González, 2007). Los sulfuros metálicos en los jales se pueden oxidar por la acción del aire y al agua y generar drenaje ácido de mina.

El principal problema ambiental de este tipo de jales se relaciona con la dispersión de los mismos hacia su entorno, debido a su contenido de EPT. En las zonas

lluviosas, esta problemática ambiental está relacionada con la generación de drenaje ácido y su dispersión a través de los escurrimientos superficiales; mientras que en las zonas áridas se relaciona con la dispersión provocada por el viento (Luna, 2011).

El drenaje ácido producido en los jales que provienen de este tipo de yacimientos se caracteriza por tener valores bajos de pH y por lo general, altas concentraciones de sulfatos y EPT disueltos que representa un severo problema al transportarse.

b) Jales que provienen de yacimientos de óxido de hierro

Los jales de este tipo de yacimientos están constituidos por residuos de magnetita. De acuerdo con Rosas, et al., (2009) los jales que provienen de una mina de hierro se caracterizan por presentar bajas cantidades de EPT; sin embargo, sí pueden llegar a generar drenaje ácido, ocasionado por la presencia de pirita.

El drenaje ácido se genera por la oxidación de la pirita, que ocurre gracias a la interacción del mineral con agentes del intemperismo tales como el aire y el agua. Cabe recalcar que no siempre que exista el proceso de oxidación de la pirita existirá drenaje ácido, esto se explica debido a que la generación de drenaje ácido depende del balance que existe entre los minerales capaces de generar acidez (sulfuros de hierro) y los minerales que son capaces de consumirla (carbonatos de calcio, aluminosilicatos e hidróxidos). En general si la capacidad de generar acidez es menor que la capacidad de neutralizarla se tendrá un fluido de pH cercano al neutro.

2.3. Procesos geoquímicos asociados a los jales

Los minerales presentes en los jales se pueden clasificar de dos maneras de acuerdo con Jambor (1994) estas son:

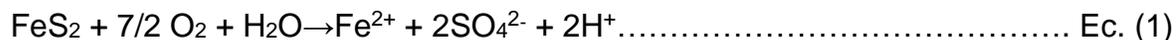
a) Minerales primarios: estos minerales solamente han sufrido cambios físicos durante el proceso de flotación, y su composición es análoga al del yacimiento original. En general son sulfuros metálicos, carbonatos, aluminosilicatos, hidróxidos, etc.

b) **Minerales secundarios:** Aunque se pueden formar durante el proceso de flotación, generalmente son producto de los cambios que ocurren en la presa de jales, típicamente por la precipitación de constituyentes derivados de la oxidación de los sulfuros metálicos y alteración o disolución de los carbonatos, aluminosilicatos e hidróxidos. Los minerales secundarios contienen óxidos, hidróxidos, sulfatos, carbonatos y sulfuros. Entre los minerales secundarios los más importantes son los oxihidróxidos de Fe, principalmente la goethita [(FeO(OH))], sulfatos tales como la jarosita (KFe₃(SO₄)₂(OH)₆) y el yeso (CaSO₄*2H₂O).

2.3.1. Oxidación de sulfuros metálicos

Los sulfuros metálicos se oxidan al estar expuestos a la acción del agua, aire e incluso actividad microbiana. La problemática ambiental derivada de la oxidación de los sulfuros metálicos, en los jales, está asociada a la generación de acidez, lo que favorece la liberación al ambiente de sulfatos (SO₄²⁻), arseniatos (H_nAsO₄³⁻ⁿ) y de los principales metales pesados (Fe²⁺, Cu²⁺, Pb²⁺, Zn²⁺ y Cd²⁺), que forman parte de la composición de los mismos sulfuros metálicos. Así mismo, bajo condiciones ácidas se favorece la disolución de otros minerales, presentes en los jales, como los carbonatos y los aluminosilicatos, lo que es la explicación de altas concentraciones de Al, Si, Ca, Na, K en el drenaje ácido de mina que se forma en los jales. (Luna Celis , 2011)

La oxidación de la pirita ocurre en una serie de reacciones que se describen a continuación de acuerdo con Morales-Arredondo (2010)



Una mol de pirita libera una mol de Fe²⁺, dos moles de SO₄²⁻ y dos moles de protones. En presencia de mayor cantidad de oxígeno (O₂), el Fe²⁺ se oxida a Fe³⁺ como se ve en la siguiente ecuación:



La hidrólisis del Fe^{3+} , deriva en la precipitación de minerales secundarios de Fe que en la Ec. 3 se representa de forma genérica como $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y en la producción de mayor acidez (liberación de 3 moles de protones):



A su vez el ión férrico, Fe^{3+} es un fuerte agente oxidante de otros sulfuros con la subsecuente generación de mayor cantidad de protones (16 moles):



Estos procesos de oxidación inorgánica pueden ser catalizados (aceleran la reacción hasta 1 millón de veces) por la presencia de bacterias como las *Acidithiobacillus ferrooxidans* (Berry, 1983).

2.3.2. Neutralización de drenaje ácido de mina

El proceso por el cual se consume la acidez se denomina neutralización, en general cuando la capacidad consumidora de ácido en los jales es superior a la capacidad que genera este ácido se consumen todos los protones y el agua del depósito tendrá un pH cercano al neutro. Cuando los H^+ son liberados por la oxidación de sulfuros, en contacto con carbonatos, hidróxidos y otros minerales con potencial de neutralización, se propician reacciones que consumen acidez (Jambor & Blowes, 1994). Los principales mecanismos de las reacciones de ácido – neutralización que se presentan en los jales son:

a) Disolución de carbonatos

La disolución de minerales del grupo de los carbonatos (CaCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, FeCO_3) libera cationes alcalinos y metálicos como Ca, Mg y Fe. Bajo las condiciones neutras o alcalinas, los cationes liberados tienden a precipitar como minerales secundarios (sulfatos, carbonatos, hidróxidos), que posteriormente pueden disolverse y contribuir a la neutralización del drenaje ácido formado en los jales (Jambor J. L., 1994).

Las reacciones que involucran la disolución de carbonatos en los jales pueden mantener las condiciones de pH cercanas a las neutras y limitar la movilidad de los EPT.

b) Disolución de Hidróxidos

Los productos de las reacciones de oxidación y disolución de minerales, con el incremento del pH, producto de la neutralización, tienden a precipitar en forma de oxihidróxidos metálicos como: gibbsita, ferrihidrita, goethita o schwermanita.

En los casos en que la generación de ácido continua y los carbonatos han sido consumidos, el pH baja hasta valores entre 3.5 y 4.5; que es cuando la disolución de los hidróxidos juega el principal papel como agentes neutralizadores del DAM (Jambor & Blowes, 1994).

c) Disolución de Aluminosilicatos

Bajo condiciones de acidez más extremas, después de que los carbonatos y los hidróxidos son consumidos, comienza la disolución de los minerales del grupo aluminosilicatos. La disolución de muchos aluminosilicatos consume iones H^+ y liberan cationes (Ca, Mg, Fe, Na, K, Si y Al) (Jambor & Blowes, 1994).

Bajo condiciones de pH ácido ocurre la disolución incongruente de los minerales del grupo de los aluminosilicatos, lo que deriva en la formación de caolinita, esta puede jugar un papel muy importante en la retención de EPT, a través de reacciones de intercambio catiónico.

2.4. Pruebas utilizadas para valorar y predecir el comportamiento de los jales mineros.

2.4.1. Pruebas de extracción

Estas pruebas indicativas tienen como objetivo determinar cuáles son los componentes fácilmente solubles que se pueden dispersar en el ambiente, por lo que se realizan tanto en jales no oxidados como en jales oxidados.

Las metodologías de mayor aceptación para esta prueba son: USEPA 1312 y la prueba modificada de la ASTM D3987-85. Esta prueba consiste en:

Mezclar la muestra de jales con un ácido débil o con agua meteórica (Proporción 1:20).

Mantener los sólidos en suspensión agitando la mezcla (18 a 24 horas).

Medir el pH final de la solución (Representa la capacidad amortiguadora del material).

Medición de CE, Eh, sulfatos y EPT solubles del extracto final.

La peligrosidad de los jales por su toxicidad es determinada cuando la concentración en el extracto (Prueba modificada ASTM 3987-85) de alguno de los elementos listados en la NOM-052-SEMARNAT-19933 supera los límites permisibles (NOM - 141-SEMARNAT-2003).

2.4.2. Procedimiento de lixiviación por precipitación sintética

El principal objetivo del procedimiento de lixiviación por precipitación sintética (SPLP) de la EPA 1312 es determinar la movilidad de fases inorgánicas presentes en materiales de desecho en condiciones ácidas causadas por lluvia ácida. El fluido de extracción de pH ajustado se elabora añadiendo una mezcla 60/40 en porcentaje de masa de ácidos sulfúrico y nítrico al agua reactiva. El pH se ajusta a un nivel considerado comparable al de la lluvia ácida prevista en zonas altamente industrializadas al este del río Mississippi, o en regiones menos industrializadas al oeste del río Mississippi.

La preparación inicial de las muestras implica reducir la muestra hasta que el 80% de la misma pasa por una criba de 9,5 mm. Una muestra representativa se pesa en un contenedor y se extrae con una cantidad de fluido de extracción equivalente a 20 veces el peso del sólido. Después de la extracción, la muestra se hace girar durante 18 horas. Luego, el filtrado se separa de la fase sólida filtrándolo a través

de un filtro de fibra de vidrio de 0,6 a 0,8 μm . A continuación, se analizan ambas fases. (SGS, 2018)

2.4.3. Pruebas estáticas

a) Prueba Modificada Balance Acido-Base

Las pruebas estáticas predicen la calidad del drenaje por comparación entre el potencial máximo de producción de ácido (PA) y el potencial máximo de neutralización (PN) debido a los minerales alcalinos capaces de neutralizar el ácido sulfúrico generado (González Sandoval, 2006).

Estas solo son útiles sólo para la predicción cualitativa del potencial drenaje ácido.

El procedimiento más utilizado para estimar el balance entre los minerales productores de acidez y los neutralizadores es el propuesto por Lawrence (1997), denominado Prueba Modificada de Balance Ácido-Base (PM – ABA), que consiste en determinar en las muestras de jales:

- 1) El Potencial de neutralización (PN), que está dado por la presencia de minerales que contienen carbonatos.
- 2) El Potencial de Acidez (PA), que está dado por la presencia de minerales que contienen azufre, solo se toma en cuenta el azufre presente como sulfuro.

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 la relación entre PN y PA. Internacionalmente es aceptado que las muestras con una relación $\text{PN/PA} > 3$, se pueden considerar como No generadoras de DAM; en cambio, las muestras con una relación $\text{PN/PA} < 1$, 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. (Flores-Mendoza , 2013).

Hay ciertas observaciones que son convenientes señalar; los criterios para determinar si los jales son o no peligrosos se basan en la experiencia internacional

y en la actualidad no se han obtenido datos propios que permitan justificar que estos criterios sean aplicados en México (Minchaca Arreola, 2017).

a.1) Modificación de la PM-ABA

A mediados de la década del 2000 en Europa se realizó un análisis para determinar cuál de las metodologías existentes era la mejor para estandarizarla en vez de desarrollar una nueva que requiriera un largo periodo de prueba (Borie , 2015).

La prueba seleccionada fue la PM-ABA debido a su relativa sencillez. Se propusieron una serie de modificaciones a esta prueba, entre ellas la más importante es que la cantidad y concentración de ácido utilizado para la digestión de las muestras debe ser seleccionado a partir del contenido de carbón inorgánico determinado por el método de combustión de espectroscopia infrarroja (IR) (Borie , 2015).

Por otro lado, otra de las debilidades de la PM-ABA es la cantidad de ácido añadida al inicio de la prueba y en el tiempo 2 horas, lo cual da como resultado que en el periodo más largo de la prueba (22 horas) la digestión de la muestra se da a niveles elevados de pH lo cual puede generar una sobre estimación del PN, a partir de la identificación de estas deficiencias y de las mejorías propuestas se generó la EN 15875 de la comunidad europea, la cual tiene como por objetivo obtener valores más certeros.

b) Prueba de generación de ácido neto (NAG)

Esta es una prueba estática desarrollada para predecir la generación de DAM durante y después de la operación minera. Es adecuado como herramienta de predicción independiente (Miller et al., 1997) y como complemento de otras pruebas estáticas, como la prueba ácido-base (ABA) o la PM-ABA (Räisänen et al., 2010; Morin y Hutt, 1999).

La prueba NAG se basa en la reacción de una muestra con peróxido de hidrógeno, que acelera la oxidación de minerales sulfurados. Durante la prueba, la generación de ácido y las reacciones de neutralización de ácido pueden ocurrir

simultáneamente, y el resultado final representa una medición directa de la cantidad neta de ácido generada por la muestra.

2.4.4. Pruebas cinéticas

Una vez que se ha determinado que los residuos mineros son potenciales generadores de acidez, generalmente se someten a pruebas cinéticas. Estas pruebas requieren un mayor volumen de muestra y un lapso más largo, proporcionan información acerca de la rapidez de oxidación del mineral y, por tanto, de la producción de ácido, así como de las características del agua del drenaje. Los métodos de pruebas cinéticas más utilizados son las pruebas de celdas de humedad y las pruebas de columna (González-Sandoval, 2010)

a) Celdas Húmedas

De acuerdo con Sobek (1978), la prueba de celda de humedad lixivia una muestra de 200 g molida a menos de 2.38 mm en un contenedor plástico cerrado. La prueba típica dura diez semanas las cuales se dividen en ciclos de siete días. La muestra puede inocularse con bacterias. En cada ciclo de siete días, durante los primeros tres días se circula aire seco a través del contenedor de muestra y aire húmedo en los siguientes tres días. En ambos casos, el aire fluye de la parte inferior de la celda y a través de la cama de jal. Al séptimo día, la muestra se enjuaga con 200 mL de agua destilada y pueden medirse pH, alcalinidad, conductividad eléctrica, potencial de óxido-reducción, sulfatos y metales disueltos.

b) Método de prueba estándar para intemperización acelerada de materiales sólidos usando una celda de humedad modificada

En 1996, la ASTM publicó un método de prueba, D 5744-96, denominado "Método de prueba estándar para intemperización acelerada de materiales sólidos usando una celda de humedad modificada" y establece algunas diferencias, como por ejemplo, la duración de la prueba debe ser de 20 semanas, la muestra debe ser de 1 kg y el volumen de agua de lixiviado es de 500 mL o 1000 mL (ASTM, 2000). (González-Sandoval, 2010)

c) Pruebas de columna

Las pruebas de columna se utilizan también para complementar las pruebas anteriormente descritas; sin embargo, no existe prácticamente ninguna normalización para su diseño, por lo que su flexibilidad es aún mayor. Algunas columnas, por ejemplo, se componen de muestras de 2 a 3 kg de residuos de roca molida o jales y se sujetan también a ciclos de humedecimiento y secado para favorecer la oxidación y lixiviado del material para su posterior análisis, tal como ocurre con las celdas.

2.5. Peligrosidad de los jales de acuerdo a la Normatividad Mexicana

En México la normalización se plasma en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de carácter obligatorio, elaboradas por Dependencias del Gobierno Federal y las Normas Mexicanas (NMX) de ámbito primordialmente voluntario.

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son regulaciones técnicas de observancia obligatoria expedidas por las Dependencias de la Administración Pública Federal, que establecen reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado y las que se refieran a su cumplimiento o aplicación.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) expide las NOM del Sector Ambiental, con el fin de establecer las características y especificaciones, criterios y procedimientos, que permitan proteger y promover el mejoramiento del medio ambiente y los ecosistemas, así como la preservación de los recursos naturales.

Para facilitar su consulta, las NOM vigentes del Sector Ambiental se clasificaron en las siguientes materias: Agua, Contaminación por Ruido, Emisiones de Fuentes Fijas, Emisiones de Fuentes Móviles, Impacto Ambiental, Lodos y Biosólidos, Medición de Concentraciones, Metodologías, Protección de Flora y Fauna,

Residuos y Suelos. Cabe señalar que las NOM elaboradas conjuntamente por la SEMARNAT y otras Secretarías.

En el presente estudio se utilizó como referencia principal la siguiente Norma Oficial Mexicana:

- 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.

Para que los jales representen un riesgo potencial para el ambiente se requiere que sean peligrosos. De acuerdo a la normatividad mexicana los jales son peligrosos cuando: son generadores potenciales de acidez y/o contiene EPT solubles, esto es que se pueden extraer en una solución de agua meteórica.

En la Norma Oficial Mexicana 141-SEMARNAT-2003 se especifican las pruebas y análisis que deben realizarse para valorar la peligrosidad de los jales:

a) Prueba de extracción. Esta prueba tiene el propósito de caracterizar la peligrosidad de los jales por su toxicidad. Es la referida a la "Prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con CO₂". En el extracto obtenido se cuantifican los metales y metaloides. Si la concentración en el extracto de uno o varios de los elementos listados en la Tabla 1 es superior a los límites permisibles señalados en la misma, los jales son peligrosos por su toxicidad.

Tabla 1 límites máximos permisibles de concentraciones de EPT que hacen de los jales peligrosos por su toxicidad (NOM-052-SEMARNAT-2005)

Elementos potencialmente tóxicos (EPT)	Límite Máximo permisible (mg/L)
Arsénico	5.0
Bario	100.0
Cadmio	1.0
Cromo	5.0
Mercurio	0.2
Plata	5.0
Plomo	5.0
Selenio	1.0

a) Prueba balance ácido base

Las pruebas para determinar si un jal es potencialmente generador de DAM, se basan en la dependencia que existe en el balance entre los minerales productores de ácido, como los sulfuros metálicos y los minerales que son capaces de neutralizar o consumir esta acidez, tales como los carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos.

Los procedimientos más comúnmente utilizados para pronosticar la posible generación de DAM es la denominada “Prueba de Balance Acido-Base (ABA)” (Sobek *et al.*, 1978) y la “Prueba Modificada de Balance Acido-Base (PM-ABA)” (Lawrence y Wang, 1997). En la actualidad no se considera la prueba ABA, ya que sobreestima la cantidad de minerales que producen ácido sulfúrico y la de los que pueden consumirlo, caso distinto a la prueba PM-ABA y que por lo tanto produce mejores resultados.

El objetivo de la PM-ABA es determinar si un jal es potencialmente generador o no de DAM, por lo que es necesario conocer el balance que existe entre minerales capaces de generar acides y los que son consumidores de la misma. La prueba se basa en la obtención del valor del PNN que es un cociente entre PN sobre el PA.

El PN representa la cantidad total de carbonatos de calcio, considerados como los minerales neutralizantes presentes en los jales, se determina por valoración directa del ácido después de la digestión mediante sosa (NaOH) hasta un pH de 8.3.

El PA se calcula principalmente basándose en el análisis químico y la diferencia de la muestra por azufre total y azufre como sulfatos.

Interpretación del resultado de PNN

La relación entre los valores de PN y PA (expresados ambos como $\text{kgCaCO}_3/\text{ton}$ de jales), permite determinar si los jales poseen la cantidad suficiente de carbonatos de calcio para neutralizar a los sulfuros:

- Sí el PNN \leq 1.2; los jales son potencialmente generadores de DAM
- Sí el PNN $>$ 1.2 los jales no son potencialmente generadores de DAM

En el caso de los jales inalterados (no oxidados), la aplicación de las pruebas antes descritas es adecuada ya que cumplen con su objetivo, pero en el caso de los jales oxidados, donde ya ocurrieron los procesos de oxidación y neutralización para determinar si hay posibilidad de generación de drenaje ácido basta con medir el pH en los jales y constatar que es ácido (generalmente menor a 4). Adicionalmente, la aplicación de pruebas simples de campo para identificar presencia de carbonatos (reacción positiva al HCl) permiten determinar si éstos se agotaron o no durante el proceso de neutralización. En el caso de que en los jales oxidados aún haya carbonatos, se puede interpretar como una garantía de que en estos jales no habrá posibilidad de generación de drenaje ácido en el futuro, ya que la oxidación de los posibles sulfuros, que quedaron, sería neutralizada por la disolución de los carbonatos existentes. (Morrales-Arredondo , 2010)

2.6. Omisiones en la evaluación de la capacidad para generar drenaje ácido

Uno de los procedimientos más comunes para determinar si los jales serán o no generadores de DAM fue la Prueba de Balance Acido-Base (Sobek et al. 1978), en esta prueba se mide el PN haciendo reaccionar los jales con HCl a ebullición, de este modo se sobreestima la capacidad de neutralización de los jales bajo condiciones ambientales debido a que el HCl a esta temperatura logra disolver carbonatos poco reactivos como por ejemplo la siderita (FeCO_3) que en condiciones ambientales no participa en el proceso de neutralización. Además, se sobre estima la capacidad de generar acidez ya que no todos los compuestos que contengan azufre necesariamente pueden formar ácido sulfúrico, en otras palabras, se toma en cuenta el azufre total.

La PM-ABA trata de evitar la sobreestimación de acidez y neutralización, buscando así arrojar un resultado más acertado del comportamiento de los jales.

2.6.1. Minerales involucrados en la generación de acidez y neutralización

La influencia del carbonato de calcio en el proceso de neutralización está bien establecida y es la única considerada en la PM-ABA, mientras que la de otros minerales con una reactividad menor, como, por ejemplo, los aluminosilicatos capaces de disolverse y participar en el proceso de neutralización, es despreciada.

Aunque existen varios cientos de sulfuros metálicos, sólo cinco de estos minerales son lo suficientemente abundantes como para ser clasificados "minerales formadores de rocas" (Deer, Howie, & Zussman, 1992). Estos son pirita, pirrotina, galena, calcopirita y esfalerita y de ellos dos (pirita y pirrotina) son responsables de la mayoría de los drenajes ácidos del mundo (Jambor & Blowes, 1998).

Kwong (1993) interpreta que las especies con verdadero potencial de neutralización son aquellas que se encuentran en las categorías soluble, meteorización rápida y meteorización intermedia, es decir aquellas con reactividad relativa 1.0, 0.6 y 0.4 que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Agrupación de minerales según su capacidad de neutralización tomada de (Kwong Y. J., 1993)

Grupo mineral	Minerales típicos	Reactividad relativa a pH=5
Solubles	Calcita, aragonita, dolomita, magnesita, brucita	1.0
Meteorización acelerada	Anortita, nefelina, olivino, granate, leucita, espodumena, diópsido, wollastonita	0.6
Meteorización intermedia	Epidota, zoisita, enstatita, hiperstena, augita, hedenbergita, hornblenda, glaucofano, tremolita, actinolita, serpentina, crisocola, talco, clorita, biotita	0.4
Meteorización lenta	Albita, oligoclasa, labradorita, monmorillonita, vermiculita, gibbsita, caolinita	0.02
Meteorización muy lenta	Feldespato potásico, moscovita	0.01
Inertes	Cuarzo, rutilo, circón	0.004

Debido a que la Prueba Modificada de Balance Acido-Base (PM-ABA) solo contempla al carbonato de calcio en el proceso de neutralización y de estudios previos se sabe que una vez que estos han sido consumidos otros minerales comienzan a reaccionar al disolverse como lo son los hidróxidos y por último los aluminosilicatos es claro que uno de los mayores problemas que presenta esta prueba es el Potencial de Neutralización (PN) ya que el cálculo de este será erróneo resultando en un valor de PNN menor del real.

Capítulo 3. Antecedentes

3.1. La minería en México

Los antiguos mexicanos explotaban diversos minerales que encontraban en estado nativo como el oro, la plata, el cobre, entre otros. La plata y el oro eran fundidos en pequeños hornos, utilizaban crisoles de arcilla y la aplicación del método de la cera perdida era una práctica común. Mediante martillado producían láminas de oro, plata y cobre que luego eran repujadas o labradas, Además hacían aleaciones de dos o más metales: oro-cobre, plata-cobre, plomo cobre, que utilizaban sobre todos para fabricar cascabeles (Hosler, 1997).

La minería en México hoy en día explota depósitos a cielo abierto o subterráneos, en general, todas las etapas que conforman un proceso minero, con excepción de la prospección, que implica estudios preliminares, generan problemas ambientales de alto impacto. Para separar el mineral de todos aquellos materiales sin valor se utilizan básicamente dos métodos: La flotación y la hidrometalurgia (Pacheco Gutiérrez, 2006).

En todas las etapas se generan aguas residuales, residuos peligrosos y, en algunos casos, emisiones a la atmósfera. Debido al desarrollo y modernización en los procesos de extracción y procesamiento de los recursos minerales, así como a la generación de grandes cantidades de residuos provenientes de sus procesos, la industria minera en México ha generado una gran cantidad de desechos y sitios contaminados a lo largo de todo el país (INE, 2005, en Redes internacionales), constituyendo alrededor del 65% de los residuos industriales (SEDESOL, 1993). Se

desconoce el número de sitios mineros, pero se estima que hay de 10,000 a 50,000 sitios abandonados o inactivos (Carrillo Chávez y col., 2003).

3.2. Problemas ambientales asociados a la minería

Como se ha mencionado antes, paralelamente a los impactos positivos, esta actividad genera impactos negativos tales como la modificación de las condiciones originales de su entorno y, junto con la generación de energía, es responsable del significativo aumento de la concentración de varios elementos potencialmente tóxicos (EPT) en la superficie de la Tierra: Cr, Ni, Cu, Zn, Mo, Sn, Ag, Cd, Hg, Pb, As y Sb, perturbando sus ciclos biogeoquímicos naturales (Sposito, 2008).

La dispersión de los EPT ocurre a través de los desechos de los productos metálicos y de las actividades minero-metalúrgicas. Los jales, dependiendo de su peligrosidad (cantidad, toxicidad y geodisponibilidad) y de la vulnerabilidad del sitio donde se almacenan, pueden representar un riesgo para el ambiente y/o biota. (Romero et al., 2007)

La mayoría de los estudios que se han llevado a cabo en México sobre jales y su impacto sobre el ambiente, se han realizado en zonas mineras donde se explotan yacimientos de sulfuros metálicos para la obtención de metales preciosos y metales base como el Pb, Zn y Cu. Diversos investigadores han reportado que los jales que no contienen suficientes materiales básicos, representan un problema ambiental pues generan lixiviados ácidos (Armienta et al., 2003; Méndez and Armienta, 2003; Talavera et al., 2006; Mendez-Ortiz et al., 2007; Romero et al., 2007; Meza-Figueroa et al., 2009). Los lixiviados se caracterizan por presentar valores bajos de pH y concentraciones altas de los elementos que estaban presentes en los yacimientos en formas insolubles, pero que bajo condiciones ácidas se disuelven. Cuando estos lixiviados contaminan suelos, sedimentos, aguas superficiales y aguas subterráneas, representan un riesgo severo para el ambiente (Lin, 1997; Johnson et al., 2000; Bain et al., 2000; Jung, 2001).

Sin embargo, la formación de drenaje ácido de los jales de la minería de hierro ha sido poco estudiada (Romero et al., 2007).

En la mina asociada a los jales mineros analizados en el presente estudio se explota una mena de hierro (magnetita), mediante el método a “cielo abierto” y se beneficia a través de métodos físicos, aprovechando la susceptibilidad magnética de la magnetita, para la separación de los minerales de ganga.

3.3. Peligrosidad de los jales de la mina de estudio

De acuerdo con Luna Celis (2011) por su toxicidad los jales estudiados se clasifican como no peligrosos; ya que las concentraciones solubles de los constituyentes tóxicos son inferiores a las concentraciones máximas permisibles (solubles) que hacen a los jales peligrosos de acuerdo a la NOM-141-SEMARNAT-2003.

Las muy bajas concentraciones solubles de los EPT se deben a que de acuerdo a la mineralogía reportada para el yacimiento de donde provienen estos jales no existe la abundante presencia de minerales que pudieran contener estos elementos.

De acuerdo a la NOM – 141 – SEMARNAT – 2003, los jales estudiados se clasifican como peligrosos debido a su capacidad para la generación de drenaje ácido.

Capítulo 4. Marco geográfico, geológico y socioeconómico

4.1. Localización del área de estudio

El yacimiento mineral se localiza en el extremo noroccidental de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur, en la Sierra del Mamey, a 6 km al NW de la población de Minatitlán (Figura 4) , en la parte noroccidental del estado de Colima y a unos 50 km al NW de la capital del mismo, sus coordenadas geográficas son 19° 23' de latitud norte y 104° 06' de longitud este, su altitud es del orden de los 1200 msnm. (Corona-Esquivel et al., 2009).

4.1.1. Vías de comunicación

La carretera federal Manzanillo-Minatitlán, que cruza al municipio de sur a norte, y la carretera Minatitlán-Villa de Álvarez-Colima, representan las principales comunicaciones terrestres que enlazan a Minatitlán con Manzanillo y Colima. Con

las demás localidades hay comunicación por medio de brechas y caminos rurales. Asimismo, en el municipio existe una aeropista (Zermeño, 2005).



Figura 4 Mapa de localización del yacimiento mineral. (Corona-Esquivel et al., 2009)

4.2. Proceso de explotación en la mina de estudio

El proceso de explotación consiste en la preparación y concentración de los minerales, comprende varias etapas, en la primera de explotación en bancos a cielo abierto se utilizan perforadoras rotarias para hacer los barrenos que se cargan con dinamita. Una vez realizada la tronada, el material estéril se lleva a los terreros y el mineral de hierro es recogido con una pala eléctrica de 20 m³ con ayuda de palas mecánicas de 13 m³ de cucharón, las cuales cargan a camiones con capacidad de 120 y 170 t. Estos llevan al mineral a una preconcentradora que separa a los fragmentos con tamaño menor a 200 mm, que no necesitan ser triturados (Corona-Esquivel et al., 2009).

El mineral preconcentrado pasa a los molinos en donde se obtiene una pulpa la cual es sometida a un proceso de concentración con lo que la ley de Fe total se eleva hasta un 68.5 %. La pulpa obtenida es transportada a la planta peletizadora por medio de dos ferroaductos de 44.5 km de longitud y 178 y 245 mm de diámetro interno, los cuales tienen una capacidad de transporte de 190 y 380 t por hora (Corona-Esquivel et al., 2009).

4.3. Geología regional

La zona de interés se encuentra en la región ferrífera de la Sierra Madre del Sur, la cual ocupa una franja paralela a las costas de los estados de Jalisco, Colima y Guerrero, y está caracterizada por la presencia de una secuencia volcánico-sedimentaria de edad Cretácica (120 a 90 Ma) compuesta principalmente por caliza, caliza arcillosa, limolita y conglomerado con interacciones de capas de rocas volcánicas de composición andesítica (Corona-Esquivel et al., 2009).

Estas secuencias, con importantes volúmenes de material volcánico y volcánico-clástico, están asociadas al desarrollo de grandes estructuras volcánicas marinas que corresponden a un ambiente tectónico de arco de islas ubicado en la provincia geológica del Complejo Orogénico de Guerrero-Colima (Ortega-Gutiérrez et al., 1992).

4.4. Geología local

El basamento de la secuencia sedimentaria de la zona no aflora en el área de estudio, aunque Centeno-García et al. (1993) sugirieron que está formado por materiales de fondo oceánico de edad triásica, muy deformados (Trilla, Jordi; et al., 2003).

Sobre este basamento se encuentra la formación Alberca conformada por pelitas negras, calizas margosas, areniscas de grano fino y tobas andesítica con una potencia media de 1,500 metros (Corona-Esquivel, 1993).

Concordantemente sobre la anterior, se dispone la Formación Tecalitlán, constituida por rocas vulcanosedimentarias, con flujos andesíticos, flujos piroclásticos riolíticos,

areniscas y conglomerados, con una potencia total entre 1,200 y 2,000 metros (Trilla, Jordi; et al., 2003).

Enseguida se encuentra la formación Tepalcatepec cuya base está constituida por margas, pelitas carbonáceas, limolitas, areniscas, niveles evaporíticos y esporádicos arrecifes carbonatados. La parte media de la formación Tepalcatepec consiste en carbonatos marinos micríticos, con intercalaciones de limolitas, que pasan verticalmente a una serie de intercalaciones de niveles carbonatados con tobas andesíticas calcoalcalinas, características de un ambiente extensional de tras-arco (Ortiz-Hernández, 1992; Centeno-García et al., 1993; Zürcher, Ruiz, & Barton, 2001).

La mineralización de Fe del yacimiento, está encajonada en las intercalaciones de andesitas con carbonatos. Por encima de estos materiales existe la presencia de un conglomerado rojizo que corresponde con la formación Cerro la Vieja. Estos materiales están intrusionados por el batolito de Manzanillo (Schaaf, 1990; Schaaf et al., 1995; Calmus et al., 1999), de composición granodiorita (Trilla, Jordi; et al., 2003).

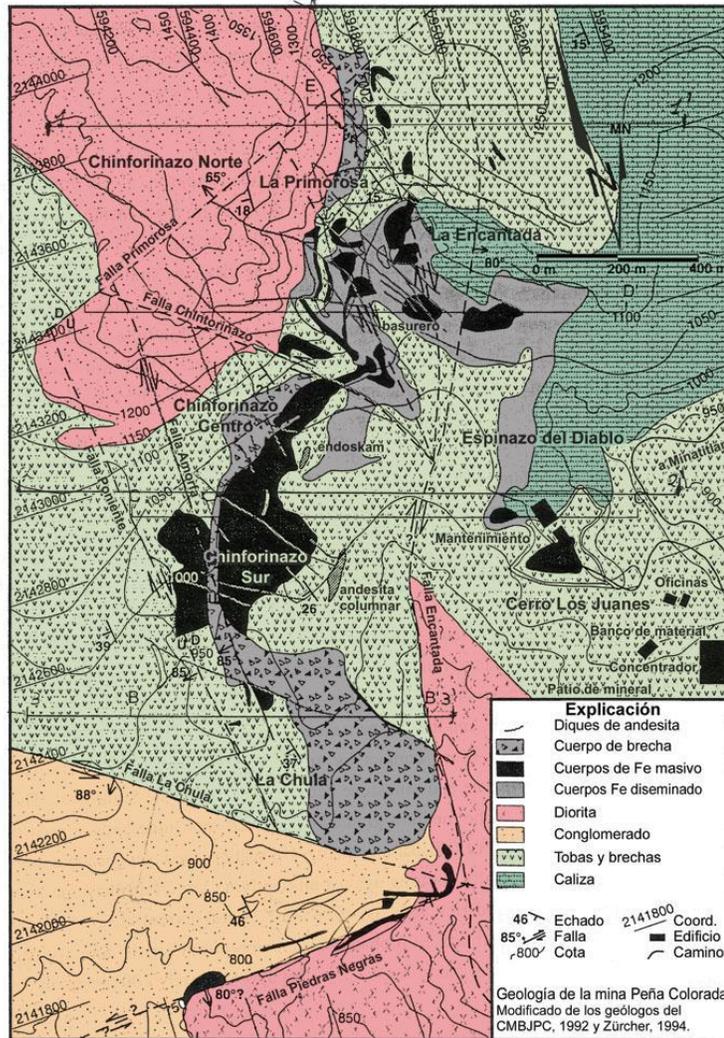


Figura 5 Mapa geológico del yacimiento de Peña Colorada, Colima. (Corona-Esquivel y Henríquez, 2004).

4.5. Geología estructural

Las estructuras más importantes, localizadas en la zona son fallas normales y laterales conformando un sistema con dos direcciones NE-SW, NW-SE y algunas menos comunes de dirección N-S.

Las estructuras más consistentes corresponden a las de orientación NE-SW, las cuales generalmente son normales y algunas con componente lateral. Las estructuras de orientación NW-SE son también de tipo normal y algunas de ellas con componente lateral. De las estructuras de orientación N-S la más importante es

la falla Ayotitlán, de tipo normal con rumbo general S-W e inclinación de 55° al W y es interrumpida por la falla El Mamey (SGM, 2018)

4.6. Descripción del yacimiento mineral

Cuerpo masivo superior

Este corresponde al cuerpo principal, está compuesto por un cuerpo de magnetita en general de carácter masivo, de morfología tabular, con una potencia de unos 20 metros y una continuidad lateral de más de 1000 metros. Mineralógicamente, el cuerpo principal está dominado por magnetita (>85%) y, en menor proporción, martita, hematita, piroxeno, clorita, apatita y carbonatos (Trilla, Jordi; et al., 2003).

Cuerpo diseminado inferior

Se sitúa unos 40 metros por debajo del cuerpo masivo superior, en la mina aflora con una potencia de 10 metros. Los sondeos efectuados en el pasado, indican que este cuerpo presenta una extensión lateral similar a la del cuerpo principal, es subparalelo al mismo y tiene una potencia máxima de hasta 150 m reconocidos. La característica más sobresaliente del cuerpo diseminado inferior es su aspecto laminado a nivel de afloramiento, debido a la presencia de alternancias rítmicas (Trilla, Jordi; et al., 2003).

Brecha polimíctica

El tercer cuerpo está conformado por una zona de brecha subvertical de trazado irregular, que corresponde a una brecha polimíctica. Esta brecha corta con claridad los dos cuerpos previamente descritos, por lo cual es considerada como el último cuerpo mineralizado en haberse formado. En su parte inferior se encuentran bloques de andesita en una matriz de magnetita de grano fino, en la zona central presenta bloques menos angulosos y corta el cuerpo principal, en esta zona la brecha engloba fragmentos del cuerpo principal, de las rocas encajonantes y fragmentos del cuerpo diseminado inferior y en la parte superior de la mina está presente la brecha-conglomerado. El mecanismo de formación de la brecha parece estar en

relación con un fenómeno de fracturación hidráulica, ya que los fragmentos de la brecha encajan los unos con los otros.

Conglomerados mineralizados

La serie que aflora en el tajo del yacimiento mineral finaliza con unos conglomerados polimícticos, altamente cementados, que son correlacionales con la Formación Cerro de la Vieja (Corona-Esquivel, 2000)

Diques andesíticos tardíos

A lo largo del tajo del yacimiento afloran un conjunto de diques subverticales de composición andesítica y de hasta dos metros de potencia, que cortan a todas las unidades anteriormente mencionadas. Estos diques, de composición intermedia, generaron el desarrollo local de pequeñas zonas de skarn adyacentes, constituidas por granates y piroxenos, cuando la composición de la roca que cortan es propicia para ello. (Trilla, Jordi; et al., 2003).

El yacimiento minero es de afinidad IOCG (Iron-Oxide, Copper, Gold deposits) y no de tipo Skarn como se creía hace unos años. La evidencia más contundente es el resultado del fechamiento K-Ar de dos muestras de feldespato potásico (Trilla, Jordi; et al., 2003), una corresponde al cuerpo masivo superior presentando una edad de 65.3 ± 1.5 Ma y la otra corresponde al cuerpo diseminado inferior cuya edad es de 57.3 ± 2.1 Ma ya que aun tomando en cuenta el rango de error, el lapso de formación entre los cuerpos esta entre 4.4 y 11.6 Ma, este intervalo de tiempo invalida en automático la posibilidad de que sea un yacimiento tipo Skarn ya que estos se forman en tan solo unos cuantos miles de años.

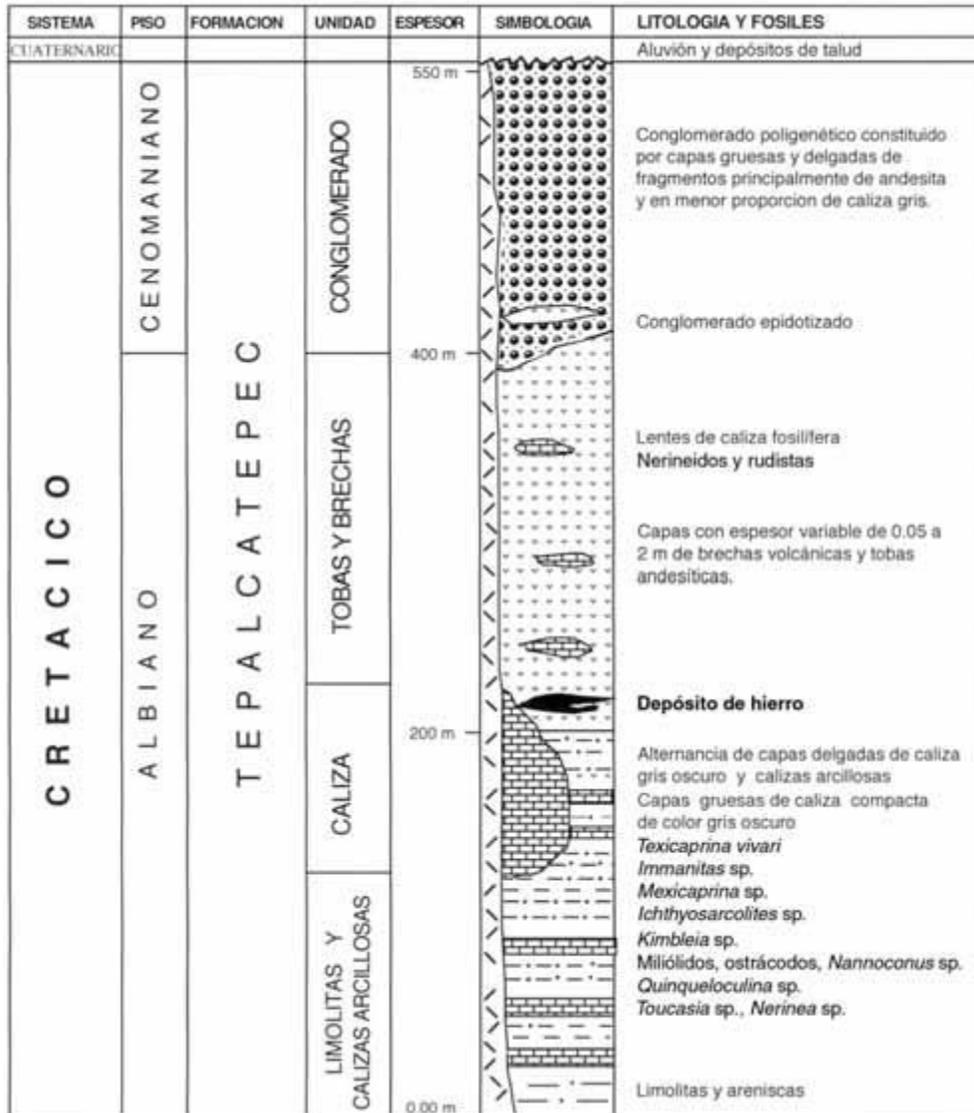


Figura 6 Columna estratigr3fica del 3rea Minatitl3n-Pe3a Colorada. (Corona-Esquivel & Henr3quez , 2004)

Cap3tulo 5. Metodolog3a

5.1. Campa3a de muestreo

La campa3a de muestreo para la recolecci3n de las muestras se realiz3 en el mes de diciembre de 2016. El tipo de muestreo fue exploratorio y sistem3tico en la presa de jales Gu3simas, ubicada en el municipio de Minatitl3n, Colima, cuyo objetivo

principal fue establecer zonas de vaso y talud para la colocación de celdas de experimentación.

Durante esta campaña de muestreo fueron recolectadas muestras superficiales de tipo talud, vaso y zanja de la presa de jales (Figura 7). Las zanjas fueron ubicadas en el talud oxidado de la presa de jales y por último se tomaron muestras duplicadas para asegurar el control de calidad del muestreo.

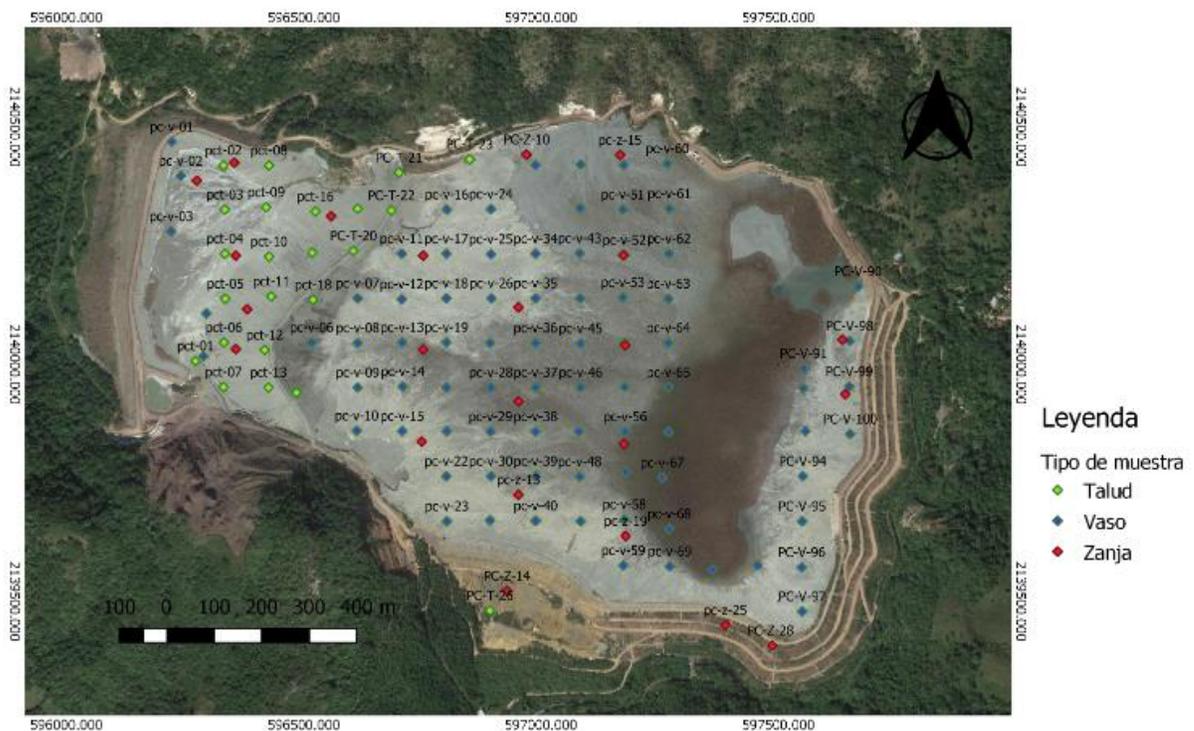


Figura 7. Mapa de la presa de jales Guásimas donde se observa la ubicación de los diferentes tipos de muestras.

5.2. Prueba Modificada Balance Acido-Base

Las pruebas estáticas son de tipo predictivo y son útiles para estimar el comportamiento de los jales a futuro, más no proporciona información sobre la velocidad o tasa cinética con la que se producirá, de ser el caso, DAM y o la neutralización.

Es posible al determinar el balance que existe entre minerales potencialmente generadores de acidez (sulfuros de hierro) y aquellos que serán potencialmente

capaces de consumirla (carbonatos de calcio). El resultado de la PM-ABA es este balance y se expresa como $PNN=PN/PA$ a continuación, se señala y describe cada uno de los elementos que conforman al mismo.

5.2.1. Potencial de Neutralización

El PN surge del contenido de carbonatos de calcio capaces de consumir o neutralizar la acidez, para calcularlo se determinan los carbonatos por medio de titulación.

El procedimiento para determinarlo fue el siguiente:

- a) Se realizó la prueba cualitativa de efervescencia descrita a continuación:
Se tomaron 1 o 2 gramos de muestra finamente molida, se colocaron en una superficie no porosa y posteriormente se adicionaron unas gotas de agua con la finalidad de que se libere el aire contenido en la muestra. Después se agregaron unas gotas de ácido clorhídrico al 25%, se observó el grado de efervescencia de la reacción generada por la transformación de carbonatos a dióxido de carbono (CO_2) y se asigna el valor cualitativo de: nulo, bajo, moderado o fuerte.
Las muestras con valores, bajo, moderado y fuerte corresponden a jales grises mientras que aquellas muestras que presentaron un nivel de efervescencia nulo presentaron una coloración rojiza, propia de una oxidación avanzada y un pH inferior a 7.
- b) Se pesaron 2 gramos de muestra finamente molida, se colocaron en un matraz de Erlenmeyer de 100 mL y después se adicionó 90 mL de agua destilada, a esto se le conoce como mezcla 1.
- c) Se adiciona los mililitros necesarios en el “tiempo 0” de HCl 1 Normal (N) conforme a la Tabla 3 y de acuerdo al grado de efervescencia observado. Esto es conocido como mezcla 2. Se registra el volumen añadido (V_a).
- d) Se agitó la mezcla 2 en un agitador orbital a una velocidad de 250 revoluciones por minuto, a temperatura ambiente durante 2 horas. Se midió el pH y se agregó el volumen de HCl 1 N que se consideró necesario de

acuerdo al valor de pH registrado en el “tiempo 2 horas”, convirtiéndose ahora en la mezcla 3. Se registró el volumen añadido (V_b).

A pesar que la NOM 141- SEMARNAT 2003 estipula que cantidad se debe adicionar de HCl en el tiempo 2 horas de acuerdo a su grado de reacción (Tabla 3) fue necesario modificar este volumen para cada muestra, tomando en cuenta el pH registrado; esto con la finalidad de asegurar un experimento exitoso.

- e) Se agitó la mezcla 3 durante 22 horas, al término de este periodo se registra el pH, en los casos en el que el pH fue mayor a 2.5 se agregó el volumen de HCl necesario de acuerdo al valor de pH registrado, se agitó durante un periodo de 2 horas con la finalidad de bajar el valor de pH al intervalo de 2 a 2.5. Se registra el volumen adicionado (V_c). En los casos donde el valor de pH después de las 2 horas adicionales fue menor o mayor a 2 fue necesario repetir el procedimiento desde el inciso b.
- f) Después de que se ha conseguido la acidificación, se titula el ácido que no ha sido consumido con una base estandarizada de NaOH 0.1 N hasta alcanzar un pH de 8.3.

Tabla 3. Cálculo de volumen de HCl para determinar el PN (NOM 141-SEMARNAT 2003).

	HCl solución 1.0 N (mL)	
	Tiempo 0	Tiempo 2 horas
Nulo	1.0	1.0
Bajo	2.0	1.0
Moderado	2.0	2.0
Fuerte	3.0	2.0

- g) Se calculó el total de mL adicionados de HCl 1 N para conocer el volumen final (V_f)

$$V_f = V_a + V_b + V_c \dots\dots\dots \text{Ec. (5)}$$

- h) Se calculó el PN, que es el equivalente del carbonato de calcio expresado como $\text{kg}_{\text{CaCO}_3}/\text{ton}$ de jales utilizando la siguiente expresión matemática:

$$PN = \frac{(V_f * CHCl) - (C_{NaOH} * mL \text{ de } NaOH)}{\text{peso de la muestra (g)}} \times 50 \dots \text{Ec. (6)}$$

Donde:

- V_f es el volumen final en mL de HCl adicionado.
- CHCl es la concentración real del HCl adicionado.
- mL de NaOH son los mililitros totales de la base utilizados durante la titulación.
- C_{NaOH} es la concentración real de NaOH

En el presente estudio las soluciones de HCl y NaOH fueron valoradas para conocer su concentración real y así poderlas incluir en la ecuación de PN con una solución de hidrogenoftalato de potasio (KHP) y de carbonato de sodio (Na_2CO_3) respectivamente.

5.2.2. Potencial de Acidez

El potencial de acidez (PA) está determinado por el contenido de azufre en forma de sulfuro, el procedimiento para determinarlo fue el siguiente:

- a) Se determinó el azufre total en el Laboratorio de Biogeoquímica Ambiental (LABQA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), utilizando el horno LECO siguiendo el método de referencia: LABQA-PIII-DS-01 Determinación de azufre total en matrices sólidas.
- b) Se determinó el contenido de sulfato presente en cada muestra por medio del método turbidimétrico de acuerdo a la NMX-AA-074-SCFI-2014 cuyo principio es que el ion sulfato precipita con cloruro de bario en un medio ácido, formando cristales de sulfuro de bario de tamaño uniforme.

A continuación, se enlista el procedimiento para la formación de turbiedad de sulfato de bario.

- b.1) Se pesó en un tubo para centrifuga 1.25 gramos de muestra, se adicionó 25 mL de agua con un pH entre 6.5 y 7 y se dejó en agitación durante un periodo de 18 horas en un agitador orbital a 300 revoluciones por minuto.

b.2) Se generó una curva de calibración de 7 niveles con un estándar de 10,000 ppm de sulfato, semejante a la indicada en la NMX-AA-074-SCFI-2014 tomando en cuenta el límite de detección del método.

b.3) Se introdujeron los tubos en una centrifuga por 10 minutos a una velocidad de 4500 revoluciones por minuto. Una vez que la muestra está centrifugada se tomó una cantidad distintita de alícuota para cada muestra, ésta determinada por la CE de la muestra y se aforó con agua destilada hasta alcanzar un volumen total de 10 mL.

b.4) Después de adicionar los reactivos indicados en la norma, se agitó durante un minuto, se dejó reposar por 5 minutos para generar la precipitación de cristales y se leyó la absorbancia a una longitud de onda de 420 nanómetros en el espectrofotómetro Thermo Scientific Evolution 201 UV-Visible.

c) Se calcula el PA como la diferencial de azufre total (S_{total}) y el azufre como sulfatos ($S_{SO4^{2-}}$) y se multiplica por 31.25; valor que se obtiene de la siguiente reacción de neutralización de los sulfuros (Skoulsen et al., 2002)



De acuerdo a la estequiometría de esta reacción una tonelada de jales que contenga 10 kg de S, es decir el 1% requiere 31.25 kg de $CaCO_3$ para no producir acidez; debido a esto el PA expresado como kg requeridos de $CaCO_3$ /ton se calcula utilizando el siguiente modelo matemático:

$$PA = \%S^{2-} \times 31.25 \dots\dots\dots Ec. (8)$$

Donde:

$$\%S^{2-} = (\%S_{total} - \%S_{sulfatos}) \dots\dots\dots Ec. (9)$$

5.2.3. Potencial de Neutralización Neto

La finalidad de la PM-ABA es determinar el balance que existe entre minerales capaces de generar acidez (sulfuros metálicos) y los que serán capaces de

consumirla (carbonatos de calcio), para ello es necesario conocer el valor de PN y PA ambos expresados como $\text{kgCaCO}_3/\text{ton}$ jales anteriormente descritos. El cociente resultante de la relación PN/PA permite evaluar si los jales contienen suficientes carbonatos de calcio para neutralizar a los sulfuros capaces de generar acidez.

La interpretación se muestra a continuación:

- Si $\text{PN/PA} \leq 1.2$ los jales son potencialmente generadores de DAM.
- Si $\text{PN/PA} > 1.2$ los jales no son potencialmente generadores de DAM.

5.3. Alternativa para la evaluación del potencial de generación de drenaje ácido de mina.

La PM-ABA es una de las pruebas estáticas más utilizadas para evaluar la peligrosidad de los jales a nivel mundial debido a su sencillez respecto a otras pruebas, certeza en los resultados y bajos costes en relación a otras pruebas, pero todo lo anterior no exime a ésta de ser una prueba muy exigente para el analista en cuanto a tiempo y procesos. Surge entonces la necesidad de tener un camino alternativo que nos permita determinar el comportamiento de los jales mineros en México.

En el presente estudio se ha propuesto un procedimiento que permite con ayuda de tecnología moderna obtener un valor del balance entre el calcio y el hierro ya que se sabe que el Fe está presente en los minerales responsables de la generación de acidez y el Ca está presente en casi todos los minerales responsables del proceso de neutralización.

El objetivo fue obtener valores de PN, PA y PNN análogos a los obtenidos por la PM-ABA al detectar los porcentajes de calcio y hierro que posee cada muestra a través de FRX, a continuación, se describe la metodología utilizada para alcanzar dicho objetivo.

Todas las muestras fueron molidas hasta alcanzar un tamaño de partícula fino y leídas con el analizador portátil de XRF Thermo Scientific Niton XL3t, en modo mina, asegurando que las lecturas se enfocaran en elementos mayoritarios (elementos

con una presencia mayor a 0.1% en la muestra), con la finalidad de cuantificar el porcentaje de los elementos de interés (Ca y Fe) presentes en la muestra, conociendo estas concentraciones es posible proponer valores de PN y PA al realizar un cambio de unidades.

Se realizó un cambio de unidades partiendo de porcentajes de Fe y Ca hasta alcanzar las unidades (Kg de CaCO₃) (Tonelada de jales)⁻¹ que son las mismas unidades que se tienen en la PM-ABA, después se hizo un análisis cuyo objetivo fue determinar si existe o no una relación entre cada uno de los elementos constituyentes del PNN, calculados a través de la PM-ABA y los determinados en este balance propuesto.

Una vez realizadas las lecturas de FRX y el tratamiento de datos correspondiente, fue posible conocer el porcentaje presente de Ca y Fe en cada muestra, este porcentaje nos indica la cantidad total de los elementos que podrían o no entrar en juego durante la generación y neutralización de DAM.

Las unidades de PN y PA en la PM-ABA son kg CaCO₃/ton de jales por lo tanto se propuso llegar a estas mismas unidades a partir de los porcentajes obtenidos, a continuación, se describe la secuencia de pasos que se utilizó para realizar la transformación de unidades.

5.3.1. Potencial de Neutralización generado a partir del porcentaje de Ca presente en la muestra (PN_{FRX}) Se deben conocer los siguientes datos:

Tabla 4. Masas atómicas y molar de los elementos y compuestos involucrados en el PN.

Elemento	Masa atómica (u)	Compuesto	Masa Molar (g/mol)
Calcio (Ca)	40.078	Carbonato de calcio (CaCO ₃)	100.085
Carbono (C)	12.010		
Oxígeno (O)	15.999		

Para los siguientes cálculos se consideró una muestra de 100 g.

- a) Se selecciona el porcentaje de calcio presente en una muestra para realizar el cambio de unidades, en la ecuación este porcentaje estará representado por la letra N (neutralización), se divide entre 100 gramos de muestra, de este modo N se puede expresar fácilmente en gramos.

$$\frac{N (gCa)}{100 g} \dots\dots\dots Ec. (10)$$

- b) Se multiplica por una mol de calcio dividida entre la masa atómica del mismo

$$\frac{N (gCa)}{100 g} \times \frac{1 \text{ mol de Ca}}{40.078 (gCa)} \dots\dots\dots Ec. (11)$$

- c) Se multiplica por una mol de carbonato de calcio dividida entre una mol de calcio

$$\frac{N (gCa)}{100 (g)} \times \frac{1 (\text{mol de Ca})}{40.078 (gCa)} \times \frac{1 (\text{mol de CaCO}_3)}{1 (\text{mol de Ca})} \dots\dots\dots Ec. (12)$$

- d) Se multiplica por la masa molar del carbonato de calcio dividida entre una mol del mismo

$$\frac{N (gCa)}{100 (g)} \times \frac{1 (\text{mol de Ca})}{40.078 (gCa)} \times \frac{1 (\text{mol de CaCO}_3)}{1 (\text{mol de Ca})} \times \frac{100.085 (g CaCO_3)}{1 (\text{mol de CaCO}_3)} Ec.(13)$$

- e) Se multiplica por los gramos que hay en una tonelada sobre una tonelada

$$\frac{N (gCa)}{100 (g)} \times \frac{1 (\text{mol de Ca})}{40.078 (gCa)} \times \frac{1 (\text{mol de CaCO}_3)}{1 (\text{mol de Ca})} \times \frac{100.085 (g CaCO_3)}{1 (\text{mol de CaCO}_3)} \times \frac{1 \times 10^6 (g)}{1 \text{ ton}} Ec.(14)$$

f) Se multiplica por un kilogramo sobre los gramos que existen en él

$$\frac{N \text{ (gCa)}}{100 \text{ (g)}} \times \frac{1 \text{ (mol de Ca)}}{40.078 \text{ (gCa)}} \times \frac{1 \text{ (mol de CaCO}_3\text{)}}{1 \text{ (mol de Ca)}} \times \frac{100.085 \text{ (g CaCO}_3\text{)}}{\text{(mol de CaCO}_3\text{)}} \times \frac{1 \times 10^6 \text{ (g)}}{1 \text{ ton}} \times \frac{1 \text{ (kg)}}{1000 \text{ (g)}} \dots\dots\dots \text{Ec. (15)}$$

g) Al realizar las operaciones matemáticas correspondientes se obtiene como resultado las unidades kg CaCO₃/ton, que son las mismas unidades de PN en la PM-ABA.

$$\frac{N \text{ (gCa)}}{100 \text{ (g)}} \times \frac{1 \text{ (mol de Ca)}}{40.078 \text{ (gCa)}} \times \frac{1 \text{ (mol de CaCO}_3\text{)}}{1 \text{ (mol de Ca)}} \times \frac{100.085 \text{ (g CaCO}_3\text{)}}{\text{(mol de CaCO}_3\text{)}} \times \frac{1 \times 10^6 \text{ (g)}}{1 \text{ ton}} \times \frac{1 \text{ (kg)}}{1000 \text{ (g)}} = \frac{\text{Kg de CaCO}_3}{\text{Tonelada de jales}} \dots\dots\dots \text{Ec. (16)}$$

5.3.2. Potencial de Acidez generado a partir de la fluorescencia de rayos X (PA_{FRX})

Una vez que se conocen los valores porcentuales de hierro presentes en las muestras es posible determinar el valor de PA_{FRX} calculándolo a partir del sulfuro estimado en la pirita, trabajando de manera similar que en la determinación de PN_{FRX}.

Para determinar el factor de acidez se trabajó con el azufre total estimado a partir del porcentaje de hierro arrojado por FRX, de este modo es posible prescindir de equipos especializados como el Horno LECO.

Es necesario conocer los siguientes datos

Tabla 5 Masas atómicas y molares de los elementos involucrados en el PA.

Elemento	Masa atómica (u)	Compuesto	Masa Molar (g/mol)
Hierro (Fe)	55.84	Sulfuro de hierro (FeS ₂)	119.97
Azufre (S)	32.065		

a) Se estimó el porcentaje de azufre total presente en las muestras. Para hacerlo primero se selecciona el porcentaje de hierro presente en una

muestra para realizar el cambio de unidades, en la ecuación este porcentaje estará representado por la letra A (acidez).

$$A \% Fe = A g Fe \dots\dots\dots Ec. (17)$$

- b) Ahora se multiplica por la masa atómica del azufre y se divide entre la masa atómica del hierro, de este modo se obtiene el porcentaje de azufre total en la muestra estimado a partir del porcentaje de hierro en la misma.

$$A (\cancel{g Fe}) \times \frac{2 \times 32.065 (g S)}{55.84 (\cancel{g Fe})} \dots\dots\dots Ec. (18)$$

- c) Por ultimo para determinar el valor de PA_{FRX} se trabajó de igual forma que en la PM-ABA, al valor obtenido de azufre estimado se le resto el porcentaje de azufre como sulfatos para encontrar el porcentaje de azufre como sulfuros presentes en la muestra y posteriormente se multiplico por el factor de 31.25

$$PA_{FRX} = \%S^{2-} \times 31.25 \dots\dots\dots Ec. (19)$$

Donde:

$$\%S^{2-} = (\%S_{estimado} - \%S_{sulfatos}) \dots\dots\dots Ec. (20)$$

5.3.3. Potencial de Neutralización Neto (PNN_{FRX}) obtenido con los valores de PN_{FRXst} y PA_{FRX}

Tanto la obtención del valor de PNN_{FRX} como su interpretación se realizó de la misma manera que en que en la NOM-141-SEMARNAT-2003, como se muestra a continuación:

- Si $PNN_{FRX} = PN_{FRX} / PA_{FRX} \leq 1.2$ los jales son potencialmente generadores de DAM
- Si $PNN_{FRX} = PN_{FRX} / PA_{FRX} > 1.2$ los jales no son potencialmente generadores de DAM.

5.4. Identificación de las fases cristalinas

En busca de obtener resultados más apegados a la realidad se propuso ajustar los porcentajes de elementos que se sabe juegan un papel importante en la generación de acidez y neutralización de la misma en 6 muestras compuestas (ver Anexo A), identificando con ayuda de la técnica de DRX, el porcentaje de estos elementos, presente en otras fases minerales.

Para determinar la mineralogía asociada a cada muestra, se realizó un análisis semicuantitativo de las fases cristalinas presentes en los grupos, para ello se tomó una porción de la muestra, se molió en un mortero de ágata y se tamizó a malla 100 (tamaño de partícula $\leq 149 \mu\text{m}$), después la determinación de la mineralogía se realizó en un analizador portátil XRD-XRF TERRA, Olympus. En el caso de XRD, la medición se realizó en un intervalo angular de 5° a 55° con un escaneo mínimo de 50 exposiciones con una fuente de radiación de cobalto. La identificación se llevó a cabo con ayuda del software X Powder Ver. 2010.01.35 PRO con una base de datos PDF2.

A continuación se presenta el comparativo de los difractogramas obtenidos por el analizador portátil XRD-XRF TERRA, Olympus, para las muestras de los grupos 1-6 (Figura 8). Como se puede observar el difractograma comparativo las muestras compuestas se tienen una mineralogía muy similar. En la tabla 6 se presentan todos los minerales identificados a través de DRX para las muestras, los únicos minerales que no están presentes en todas las muestras son la hematita (Fe_2O_3) y el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

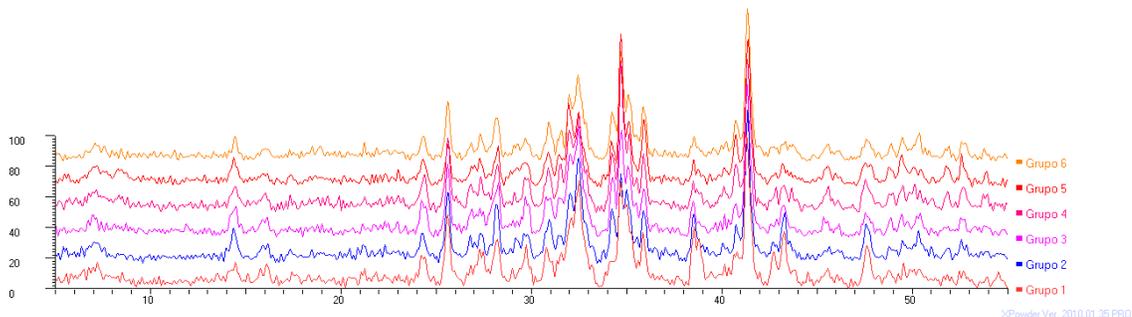


Figura 8. Difractograma comparativo de las muestras compuestas o grupos. El eje x representa el ángulo de difracción mientras que el eje y representa la intensidad de la difracción observada.

Una vez identificadas las fases cristalinas presentes en cada muestra (Tabla 6 en rojo se muestra el único mineral capaz de aportar acidez para estas muestras y en verde se muestran los minerales que son capaces de consumirla) y que se sabe que minerales participaron en la producción de acidez y en la neutralización fue posible corregir los porcentajes de elementos generadores de acidez y los que la neutralizan. Ya determinados los nuevos valores de estos elementos se trabajó de igual manera con que con la Fluorescencia de Rayos X (FRX).

Tabla 6. Minerales identificados a través de la técnica de DRX, su fórmula química correspondiente y grado de reactividad para los elementos neutralizantes

Fases minerales identificadas	Fórmula	Reactividad
Pirita	FeS_2	-
Aragonita	CaCO_3	1
Calcita	CaCO_3	1
Piroxenos (Augita-Enstatita)	$(\text{Ca},\text{Na}) (\text{Mg},\text{Fe},\text{Al},\text{Ti}) (\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$	0.4
Filosilicatos (Clorita)	$\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}) (\text{OH})_8$	0.4
Plagioclasas (Albita)	$\text{Na} (\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$	0.02
Feldespatos (Ortoclasa)	KAlSi_3O_8	0.01
Magnetita	$(\text{Fe}^{3+},\text{Fe}^{2+})_2\text{O}_4$	-
Hematita	Fe_2O_3	-
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-

5.4.1. Balance ácido base a través de DRX (PNN_{DRX})

Potencial de neutralización a través de DRX (PN_{DRX})

Una vez que se conoció la mineralogía de las muestras y de acuerdo con Kwong (1993) fue posible determinar cuáles son los minerales que tiene participación en el proceso de neutralización, para el presente estudio, estos son: calcita, aragonito, piroxenos y la clorita.

Para poder determinar un porcentaje del aporte de la neutralización y obtener un PN neutralización análogo al arrojado por la PM-ABA se realizaron los siguientes cálculos, tomando como ejemplo la muestra compuesta número 1 (Tabla 6)

- a) Se calculó el peso molecular para cada uno de los minerales presentes cuyo grado de reacción se encuentre en el intervalo 0.4-1.0 y que en su fórmula química estuviera presente el calcio.

Tabla 7. Mineralogía determinada a partir de DRX para la muestra compuesta 1.

Clave de muestra	Fases minerales identificadas	Fórmula	Peso Molecular
Grupo 1	Piroxenos	(Ca,Na) (Mg,Fe,Al,Ti)	
	(Augita-Enstatita)	(Si,Al) ₂ O ₆	188.467
	Aragonita	CaCO ₃	100.085
	Calcita	CaCO ₃	100.085
	Yeso	CaSO ₄ 2H ₂ O	172.165

- b) Se determinó el porcentaje de calcio presente en la fase mineral para calcita, aragonito y piroxenos, para esto se multiplico el porcentaje en fase por el peso atómico del calcio y se dividió entre el peso molecular previamente identificado y se suman los valores obtenidos.

Tabla 8. Minerales que contienen calcio en la muestra compuesta 1.

Clave de muestra	Fases minerales identificadas	Fórmula	% Relativo en fase cristalina	Peso Molecular	% Ca Fase
Grupo 1	Piroxenos (Augita-Enstatita)	(Ca,Na) (Mg,Fe,Al,Ti) (Si,Al) ₂ O ₆	19.6	188.467	4.168
	Aragonita	CaCO ₃	10	100.085	4.004
	Calcita	CaCO ₃	2.8	100.085	1.121
	Yeso	CaSO ₄ 2H ₂ O	2.4	172.165	0.559
				Total=	9.852

- c) Después se normalizaron los valores de los elementos neutralizantes, para esto se dividió el porcentaje en fase por la sumatoria obtenida previamente

Tabla 9. Porcentaje normalizado de los minerales que contienen calcio para la muestra compuesta 1.

Clave de muestra	Fases minerales identificadas	% Relativo en fase cristalina	Peso Molecular	% Ca Fase	% Ca Normalizado
Grupo 1	Piroxenos (Augita-Enstatita)	19.6	188.467	4.168	0.423
	Aragonita	10	100.085	4.004	0.406
	Calcita	2.8	100.085	1.121	0.114
	Yeso	2.4	172.165	0.559	0.057
			Total=	9.852	1.000

- d) Por ultimo para conocer el porcentaje de calcio aportado por los diferentes minerales en la muestra se debe multiplicar el porcentaje normalizado de cada mineral por el porcentaje de Ca en obtenido por FRX.

Tabla 10. Porcentaje de calcio aportado por cada mineral que interviene el proceso de neutralización para la muestra compuesta 1.

Clave de muestra	Fases minerales identificadas	%Ca Normalizado	% Ca FRX	% Ca DRX
Grupo 1	Piroxenos (Augita-Enstatita)	0.423	4.350	1.840
	Aragonita	0.406	4.350	1.768
	Calcita	0.114	4.350	0.495

Una gran limitante de los equipos portátiles de FRX es que no pueden leer ciertos elementos entre ellos el Aluminio (Al), debido a que su radio atómico es muy pequeño, esto cobra importancia en el presente estudio debido a que los análisis de DRX muestran la presencia de minerales en cuya composición química está presente el Al y su vez desempeñan papel importante en los procesos de neutralización, el caso concreto es el de la clorita.

Ya que tanto la clorita como los piroxenos tienen una reactividad igual (0.4) se ha calculado su posible aporte en la neutralización al realizar una equivalencia entre el aporte de los piroxenos y el de la clorita, para explicar y ejemplificar dicha equivalencia se ha vuelto a tomar el caso de la muestra compuesta número 1.

e) Se divide el porcentaje en fase cristalina de la clorita entre el porcentaje en fase cristalina de piroxenos y se multiplica por 100 con la finalidad de conocer qué porcentaje representa el primer mineral en relación al segundo.

Tabla 11. Porcentaje relativo de clorita en relación a los piroxenos para la muestra compuesta 1

Clave de muestra	Fases minerales identificadas	Fórmula	% Relativo en fase cristalina	% Ca DRX	%Clorita/ %Piroxeno
Grupo 1	Piroxenos (Augita-Enstatita)	(Ca,Na) (Mg,Fe,Al,Ti) (Si,Al)2O6	19.6	1.840	20.918
	Filosilicatos (Clorita)	Mg5Al(AlSi3O10) (OH)8	4.1		

- f) Ahora que se sabe que el porcentaje relativo en fase de la clorita representa solo el 20.918% del porcentaje relativo en fase de los piroxenos es posible establecer que el aporte a la neutralización de la clorita es solo el 20.918% del porcentaje que aportan los piroxenos en esta muestra, entonces para determinar el aporte a la neutralización de la clorita basta con multiplicar el aporte de los piroxenos por 0.20918.

Tabla 12. Aporte a la neutralización de la clorita para la muestra compuesta 1

Clave de muestra	Fases minerales identificadas	% Relativo en fase cristalina	% Ca DRX	%Clorita/ %Piroxeno	% Neutralización
Grupo 1	Piroxenos (Augita-Enstatita)	19.6	1.840	20.918	1.840
	Filosilicatos (Clorita)	4.1			0.385

Ahora es posible sumar todos los valores que se han calculado y se sabe juegan un papel importante en el proceso de neutralización.

Tabla 13. Porcentaje ajustado de neutralización en la muestra compuesta 1

.Clave de muestra	Fases minerales identificadas	% Neutralización
Grupo 1	Piroxenos (Augita-Enstatita)	1.840
	Aragonita	1.768
	Calcita	0.495
	Filosilicatos (Clorita)	0.385
	Total =	4.488

Como paso final para obtener el PN_{DRX} se trabajó exactamente igual que como se hizo con la Fluorescencia de Rayos X (FRX) solo que con el porcentaje de neutralización calculado en la tabla 13.

Potencial de Acidez obtenido a través de DRX (PA)

La técnica de difracción demostró que para las muestras compuestas el único mineral capaz de generar acidez es la pirita y también es el único considerado en el Potencial de Acidez (PA) de la Prueba Modificada de Balance Acido-Base (PM-ABA), se puede dar por hecho que el PA calculado para esta última es correcto.

Potencial de Neutralización Neto híbrido (PNN_H)

Para generar el Balance Acido-Base de las muestras compuestas se utilizó el PN_{DRX} ya que se asume que este es más acercado a la realidad debido a que se han contemplado más minerales además de los carbonatos; mientras que para el PA se utilizó el PA de la PM-ABA debido a que se asume que este es correcto.

Una vez realizada la operación matemática correspondiente, la interpretación de los valores de PNN_H se hizo de acuerdo al valor contemplado por la Normatividad Mexicana.

- Si $PNN_H = PN_{DRX}/PA \leq 1.2$ los jales son potencialmente generadores de DAM
- Si $PNN_H = PN_{DRX}/PA > 1.2$ los jales no son potencialmente generadores de DAM

Factor de corrección

Cabe aclarar que la utilización de la técnica de Difracción de Rayos X nunca ha sido contemplada en el presente estudio como técnica de remplazo para el cálculo del Potencial de Neutralización de la Prueba Modificada de Balance Acido – Base, debido a que al día de hoy es una técnica complicada y costosa.

Después de realizar el ajuste mineralógico a las muestras compuestas se obtuvo un valor promedio del aporte que se cree es el real a la neutralización, este factor

empírico que llamaremos de ahora en adelante factor de corrección tiene como finalidad acercar más a la realidad los valores del aporte de la neutralización.

El porcentaje de Ca leído a través de Fluorescencia de Rayos X fue multiplicado por este factor en todas las muestras para posteriormente generar un nuevo balance acido-base, cuyos componentes son el PN determinado por Fluorescencia y multiplicado por el factor de corrección sobre el Potencial de acidez de la norma.

5.5. Validación a través del intemperismo acelerado

A continuación, se describe el proceso para montar el experimento de erosión acelerada para las muestras compuestas:

Como primer paso se midió el pH de los jales sin tratamiento alguno, para conseguir esto se pesaron 2.5 gramos de muestra en un matraz de Erlenmeyer de 100 mL, se adicionaron 50 mL de agua destilada y se agitó durante un periodo de una hora en agitador orbital a una velocidad de 250 revoluciones por minuto, una vez concluido este periodo se midió el pH de cada muestra.

Posteriormente se pesaron 5 gramos de muestra en un matraz de Erlenmeyer de 250 mL, se adicionó un volumen de 2 mL de peróxido de hidrogeno al 50% (H_2O_2) cada 10 minutos con ayuda de una pipeta graduada hasta alcanzar un volumen final de 50 mL, las muestras se encontraban en agitación constante gracias a una barra magnética en el interior de matraz. Se dejaron reaccionar las muestras durante un periodo promedio de 72 horas y al finalizar este lapso se midió el pH de cada una.

Capítulo 6. Resultados y discusión

6.1. Prueba Modificada de Balance Acido-Base (PM-ABA)

Para todas las muestras utilizadas en el presente estudio se determinó el Potencial de Neutralización Neto (PNN) conforme a la Normatividad Mexicana.

La Figura 9 se muestra los valores de PN, se observa que la mayoría de las muestras están en el intervalo que va de 20 a 80 $kgCaCO_3/ton$ de jales. De acuerdo al tipo de muestra no es posible ver una tendencia clara.

En la Figura 10 se observan los valores del Potencial de acidez para las 127 muestras, se observa que las muestras con un valor mas bajo en promedio son las muestras que fueron tomadas en el vaso de la presa de jales. Los valores mas altos corresponden a la zanjas.

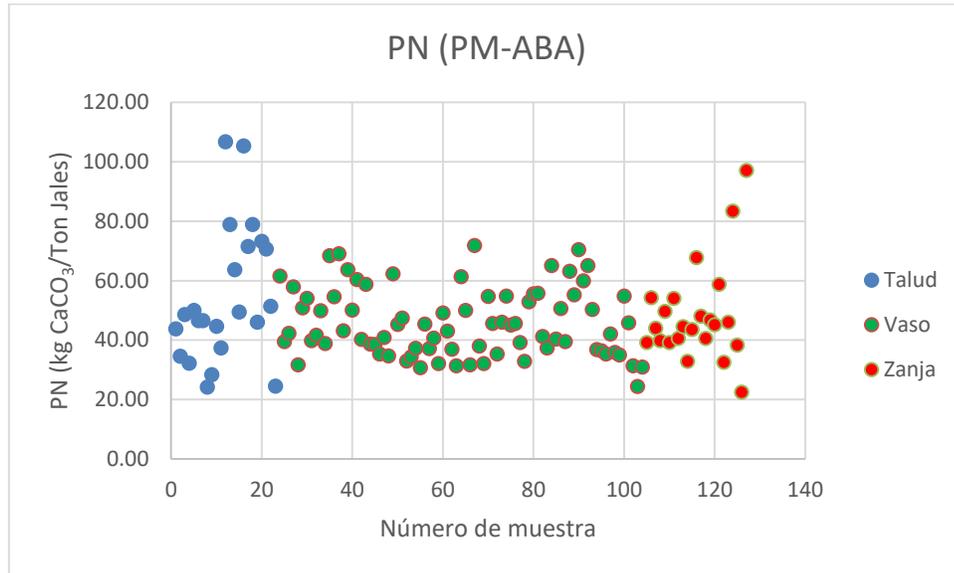


Figura 9. Valores de PN para las 127 muestras simples, no es clara una tendencia de acuerdo a la zona.

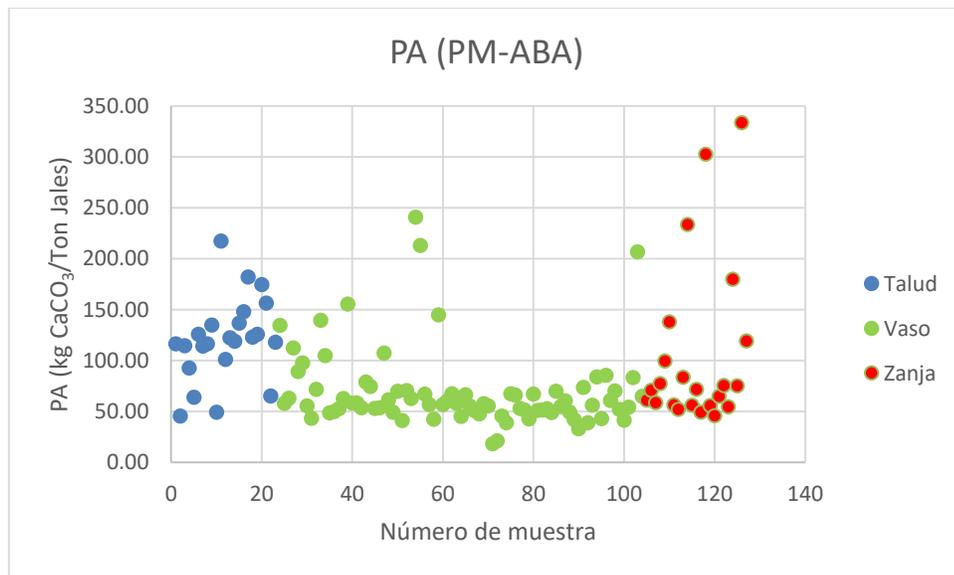


Figura 10 Valores de Potencial de Acidez (PA) de acuerdo a la Prueba Modificada de Balance Acido – Base para las 127 muestras.

En el presente estudio y de acuerdo con la Normatividad Mexicana solo 15 muestras no son potencialmente generadoras de drenaje ácido de mina lo que equivale al 11.81%. éstas 15 muestras corresponden a las tomadas en el vaso. En la Figura 11 se muestra los valores del Potencial de Neutralización Neto (PNN), se puede ver que los valores más lejanos al valor de 1.20 corresponden a las muestras de zanja.

En la Figura 12 se comparan los valores obtenidos de azufre presente como sulfuro contra los valores de PNN. Como era de esperarse, entre mayor sea el valor del porcentaje de sulfuro menor será el valor del PNN.

En la Figura 13 se observa una interpolación generada a partir de los valores de Potencial de Neutralización Neto. Tanto como la simbología como la rampa de colores corresponden al a este valor. Dichos valores y colores tendrán el mismo significado en siguientes mapas.

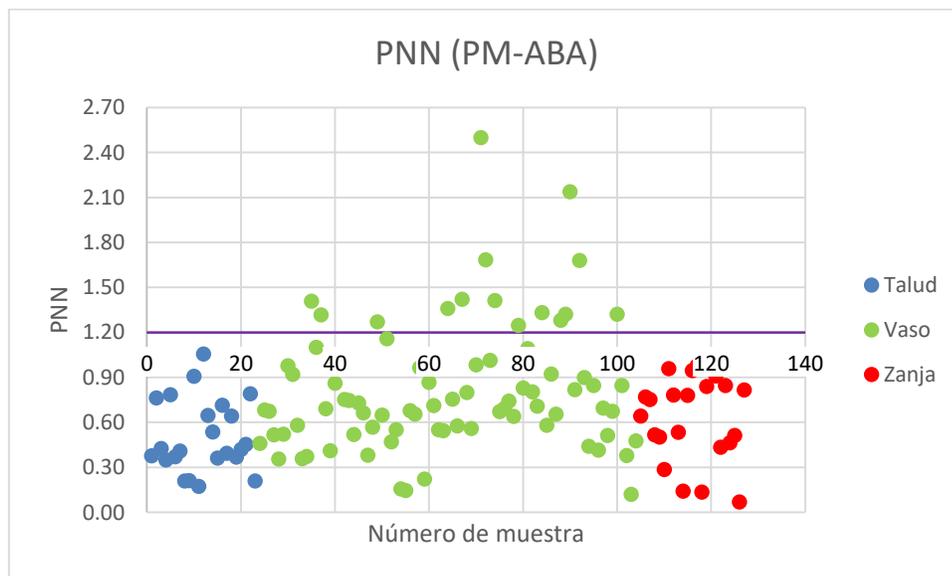


Figura 11. Valores de Potencial de Neutralización Neto para las 127 muestras de acuerdo a la Prueba Modificada de Balance Acido-Base (PM-ABA)

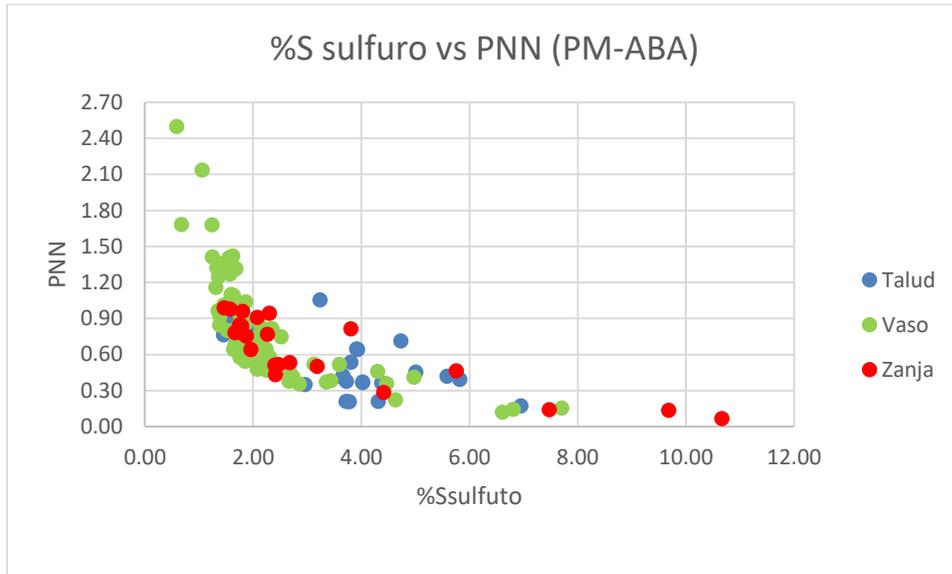


Figura 12. Porcentaje de azufre presente como sulfuro en las muestras contra el PNN de las mismas.

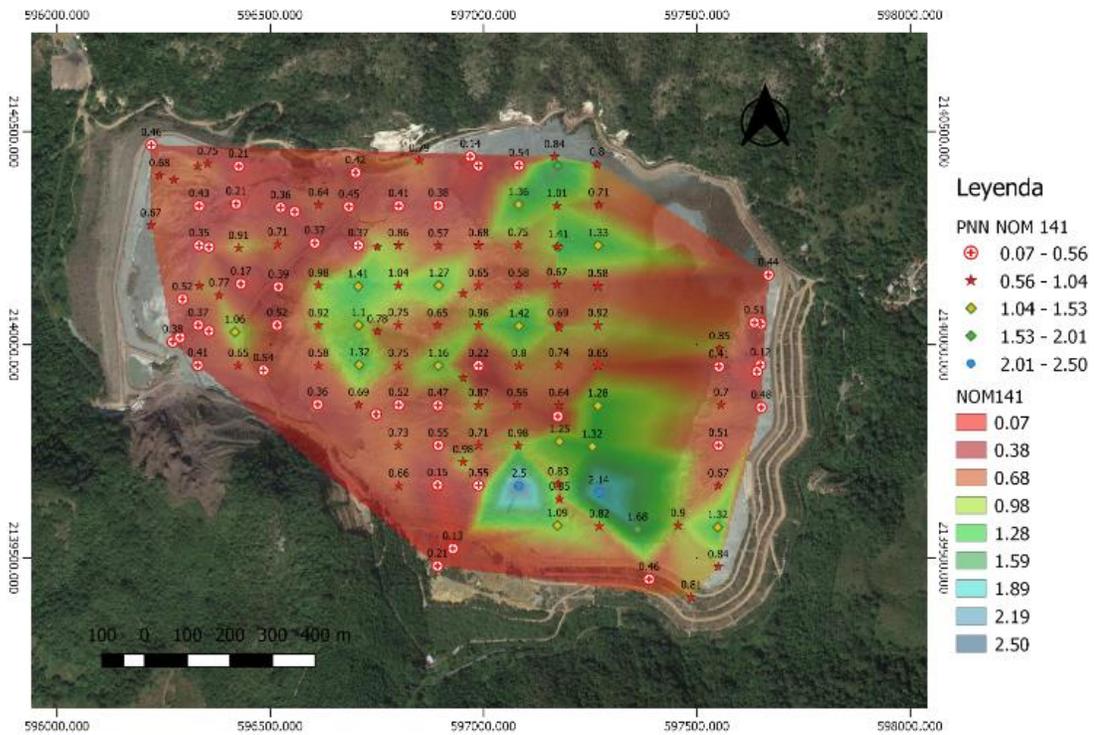


Figura 13. Sobre la imagen de la presa de jales se ha colocado la interpolación de los valores del PNN.

6.2. Evaluación de la peligrosidad a través de la Fluorescencia de Rayos X (FRX)

La Figura 14 es la gráfica de los valores que se obtienen al realizar un el cambio de unidades del porcentaje de Ca detectado por FRX. Se observa que los valores obtenidos son considerablemente más altos que los que se obtienen en por la PM-ABA.

Al igual que en la Figura 9 donde se observan los valores de PN de acuerdo a la PM-ABA, no es posible establecer una tendencia de acuerdo al tipo de muestra, en ambas graficas se observan valores altos para las muestras de zanja. No es clara una similitud entre las gráficas.

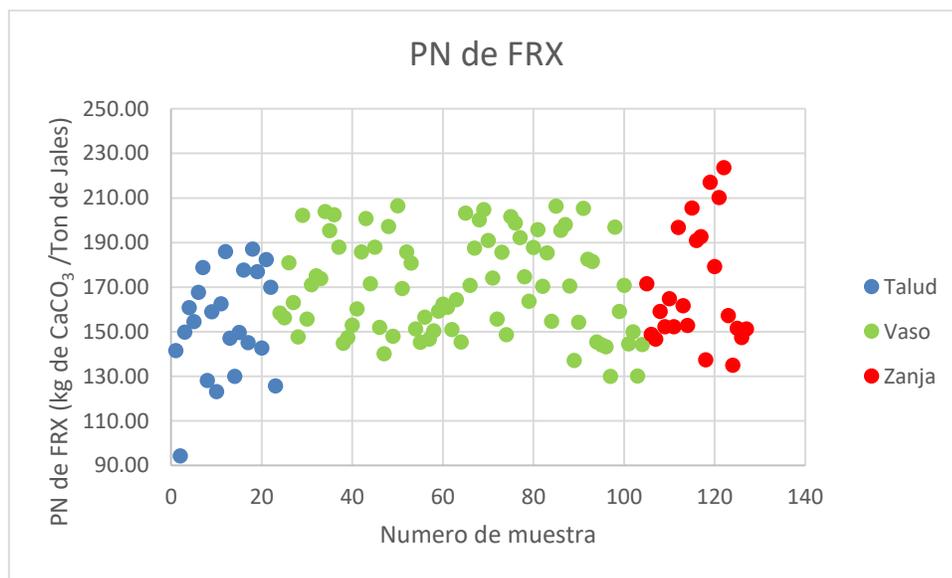


Figura 14 Valores de Potencial de Neutralización que se obtiene a través del análisis de Fluorescencia de Rayos x (PN_{FRX}). Obsérvese que el valor mínimo en el eje y es 90.

La Figura 15 corresponde a la gráfica de los valores del Potencial de Acidez que se obtiene al realizar el cambio de unidades partiendo del porcentaje de Fe determinado por FRX hasta alcanzar las mismas unidades de la PM-ABA.

Al compararse con la Figura 10, que es la gráfica de los valores obtenidos por la PM-ABA, lo primero que resalta a la vista es que los valores obtenidos a través de FRX son mucho mayores, pero a pesar de esto si es posible ver una similitud en la distribución de los puntos.

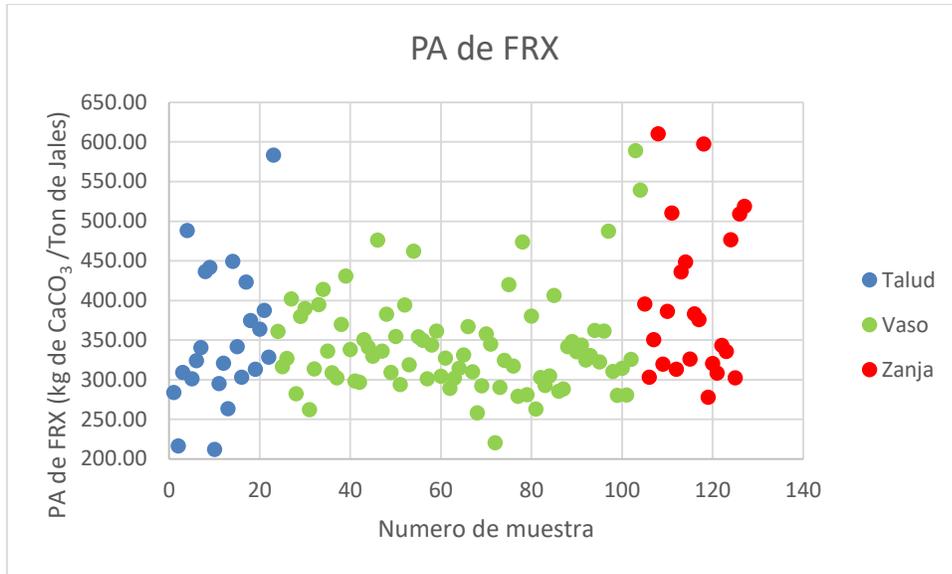


Figura 15. Valores del PA calculado a partir de la FRX. Obsérvese que el valor mínimo para esta grafica en el eje y es igual a 200.

La Figura 16 es la gráfica de los valores que se obtienen al hacer el balance entre el PN_{FRX}/PA_{FRX} . Aun cuando los elementos anteriores son considerablemente mayores en relación a la PM-ABA el PNN resultante es menor, ya que ningún valor de este balance está por encima de 1.20, a pesar de esto sí existe similitud en la distribución de los puntos entre la Figura 11 que muestra los valores de PNN de acuerdo a la PM-ABA y la Figura 16.

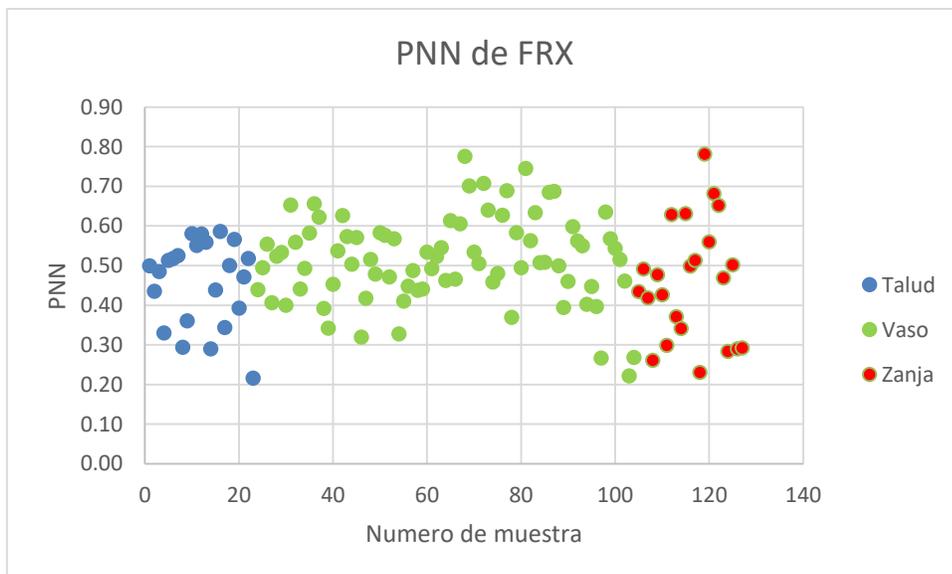


Figura 16 valores de PNN obtenidos de FRX

En la Figura 17 se han comprado los valores del porcentaje de azufre como sulfuro estimado de la pirita que se obtiene a través de los cálculos realizados a partir del porcentaje de Fe contra los valores del balance que se han calculado a partir de del PN_{FRX}/PA_{FRX} . Si se compara esta figura con la Figura 12 se puede observar que el intervalo de valores en el eje x es mayor mientras que en el eje y es menor, en otras palabras, los valores que se obtienen de PNN arrojados por este balance son menores en comparación con la PM-ABA mientras que los que se obtienen del porcentaje de sulfuro estimado son mayores, esto explica a su vez que los valores de PA_{FRX} sean mayores.

A pesar de todo lo anterior es posible establecer una relación en la distribución de los puntos.

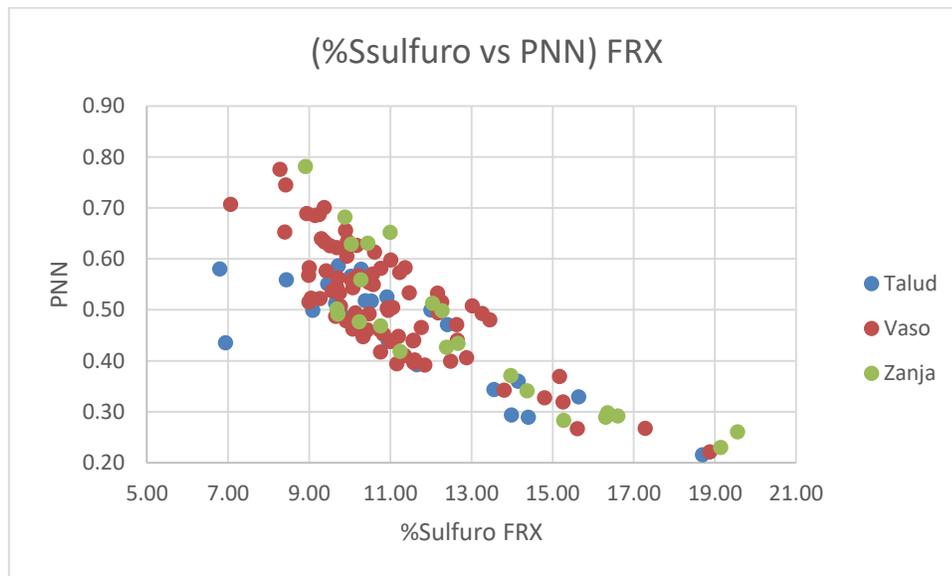


Figura 17 valores del porcentaje de sulfuro estimado de la pirita calculado a partir del porcentaje de Fe determinado por FRX contra los valores del PNN que se obtiene de hacer el balance PN_{FRX}/PA_{FRX} . Nótese que ninguno de los dos ejes comienza en 0.

La Figura 18 es la interpolación de los valores de PNN_{FRX} , cuando se compara con la Figura 13, que es la interpolación hecha para los valores del PNN de la PM-ABA, se nota que existe similitud entre ambos. Debido a que se consideran el valor de 1.2 para evaluar si un jal es potencialmente generador de DAM o no lo interpolación siguiente no muestra zonas no peligrosas.

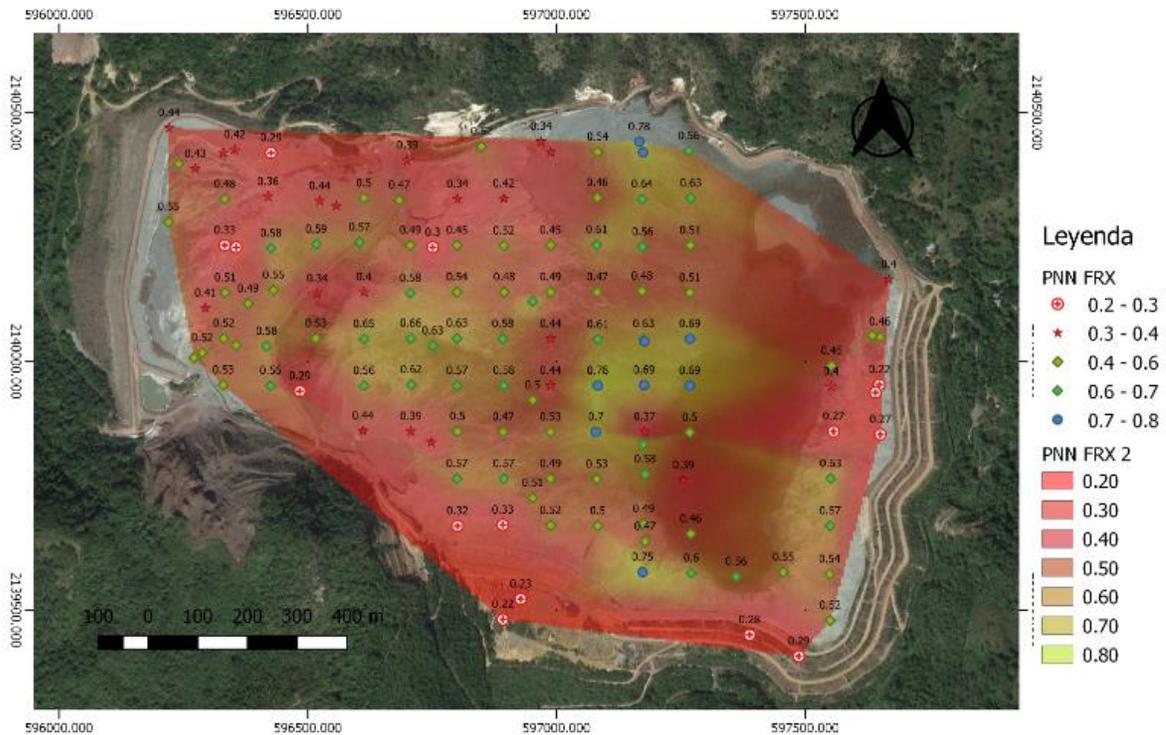


Figura 18 Presa de jales Guásimas y sobre esta la interpolación de los valores de PNN_{FRX}.

6.3. Identificación de las fases cristalinas

El objetivo de realizar esta identificación de fases cristalinas es determinar el verdadero valor de la neutralización que puede generar cada muestra y posteriormente poder realizar una comparación entre los valores de PNN_H y PNN de la PM-ABA, se da por hecho que la primera determinación es más acercada a la realidad.

En la Figura 19 se compran los tres balances con los que se cuenta para el PN se observa que los valores son mayores tanto para DRX como para FRX, además de esto presentan una tendencia prácticamente igual son solo un ligero desfase generado porque los valores de DRX son más altos que los de FRX.

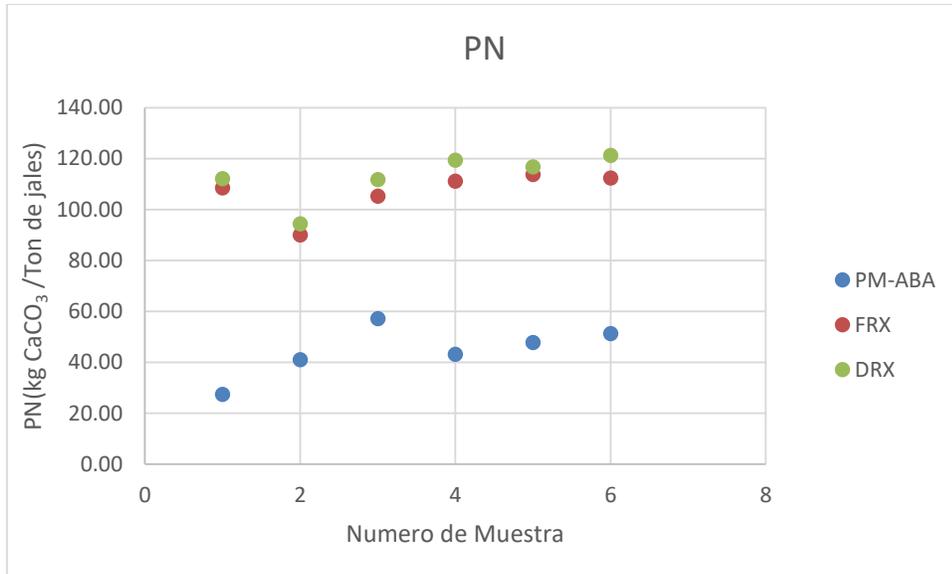


Figura 19. Valores de PNN para las 6 muestras compuestas. Se pueden observar las tres determinaciones.

La Figura 20 muestra los valores de los tres diferentes tipos de balance acido-base (PNN), se observa que el valor de este balance para FRX en la muestra 5 y 6 decae, mientras que el de la PM-ABA y el de DRX presentan una misma tendencia. El valor más alto, como es de esperarse debido a que incluye más minerales para la neutralización es el balance que se obtiene con el PN de la DRX dividido entre el PA de la PM-ABA.

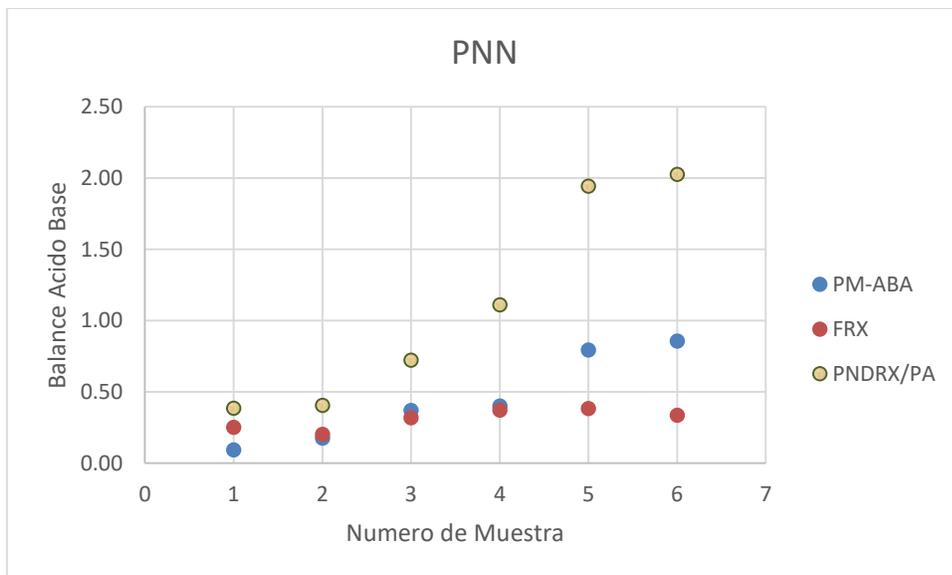


Figura 20. Valores de los diferentes tipos de balance acido-base para las 6 muestras compuestas

En la Figura 21 se han colocado los valores para las seis muestras compuestas de PNN híbrido que se obtiene de trabajar con el ajuste de Difracción de Rayos X (PN_{DRX} / PA) sobre la interpolación de los valores de PNN (PM-ABA), se observa que hay coherencia entre ambos ya que los valores bajos corresponden a valores zonas rojas mientras que los valores elevados corresponden a zonas verdes y azules.

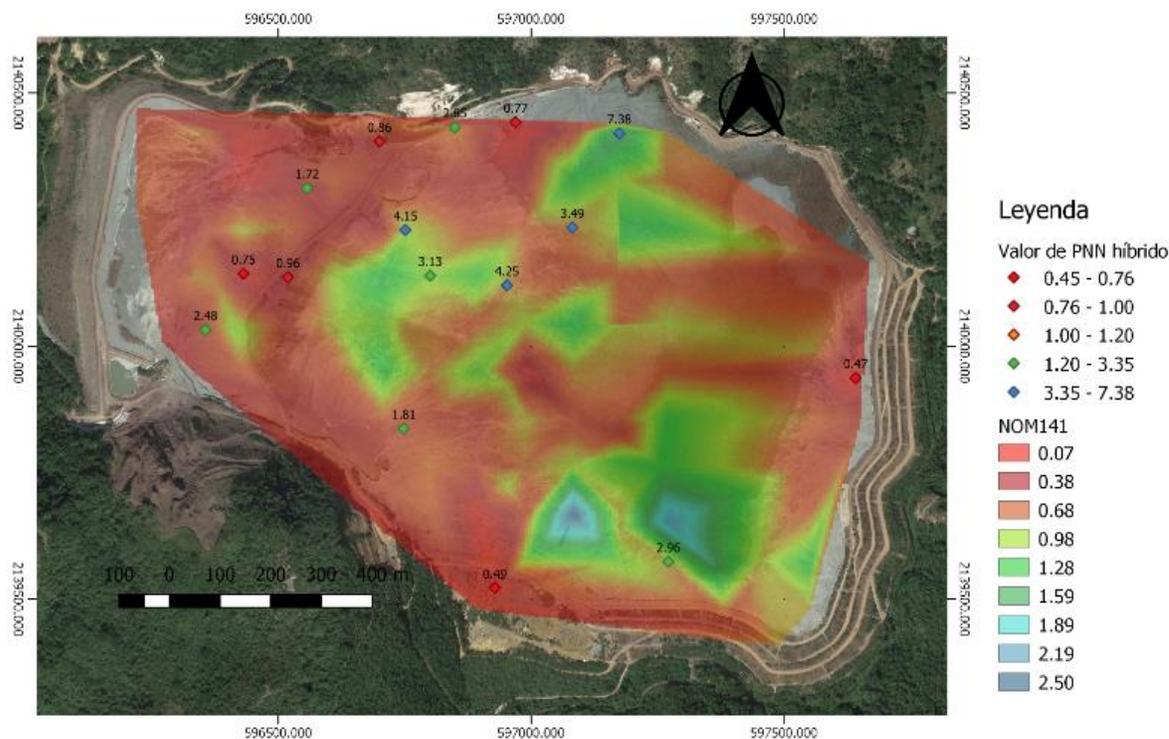


Figura 21. Mapa de la presa de Jales Guásimas, se ha sobrepuesto la interpolación de los valores de PNN (PM-ABA) y sobre esta se colocaron las muestras a partir de las cuales se han generado las muestras de compuestas, el valor que es visible en sobre cada punto representa el valor de PN_{DRX} / PA para cada muestra.

Factor de corrección

En la Figura 22 se muestra la interpolación del balance ácido-base híbrido, resultante de dividir el Potencial de Neutralización que se obtiene cuando se aplica el factor de corrección a los valores de calcio leídos por FRX y se realiza el cambio de unidades descrito en el capítulo 5.3.1 y sobre los valores se muestran los valores de PNN obtenidos de la PM-ABA. Se observa claramente que los valores de PNN híbrido son mucho mayores que los de la PM-ABA debido a que sea calculado con

un valor de PN mayor ya que este no subestima los minerales neutralizantes presentes.

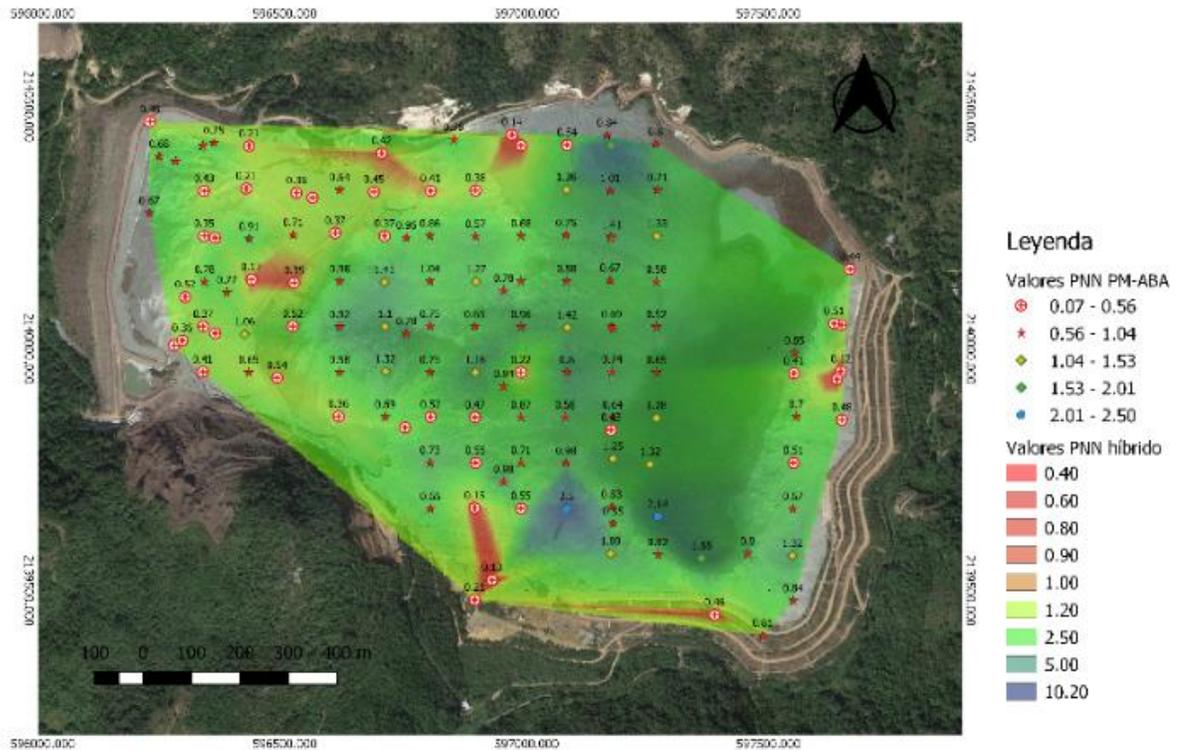


Figura 22 Interpolación de los valores del balance híbrido, sobre esta los valores de PNN de la PM-ABA

6.4. Validación a través del intemperismo acelerado

A continuación, se reportan los valores de pH registrados para las muestras compuestas, así como los valores de cuatro distintos balances acido-base.

La primera columna corresponde al número de muestra, la segunda a los valores de pH correspondiente a los jales grises sin tratamiento, la tercera columna corresponde al pH final es decir después del experimento de erosión acelerada, la cuarta columna corresponde a los valores del Potencial de Neutralización Neto de acuerdo a la Prueba Modificada de Balance Acido-Base, la quinta columna corresponde a los valores del balance catiónico (FRX), la sexta corresponde a los valores del Potencial de Neutralización Neto híbrido, la columna número siete corresponde al balance acido-base híbrido que se obtiene cuando se multiplica el porcentaje de calcio detectado por Fluorescencia de Rayos X, se hace cambio de

unidades y se divide entre el Potencial de Acidez de la PM-ABA, la última columna es la diferencia porcentual relativa entre los valores de las columnas seis y siete.

Tabla 14. Valores de pH para las muestras compuestas.

Muestra compuesta	pH Jales sin tratamiento	pH final	PNN PM-ABA	PNN FRX	PNN (PNDRX/PANOM)	PNNFRX ajustado con PA	DPR
1	7.49	2.14	0.09	0.25	0.39	0.41	5.03
2	7.82	2.61	0.18	0.20	0.41	0.42	3.57
3	8.21	7.05	0.37	0.32	0.72	0.74	2.21
4	8.13	6.71	0.40	0.37	1.11	1.12	1.10
5	8.17	5.93	0.80	0.38	1.94	2.06	5.65
6	8.18	5.92	0.86	0.34	2.03	2.04	0.62

Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

7.1. Peligrosidad de los jales en las muestras originales

a) Normatividad Mexicana.

De acuerdo a la Prueba Modificada Balance Acido-Base solo 15 muestras en el presente estudio no son potencialmente generadoras de drenaje ácido de mina. Lo anterior se puede explicar debido a que la existe una desestimación de minerales neutralizantes ya que solo es considerado el carbonato de calcio.

Algunas otras observaciones que se pueden realizar al proceso para determinar el Potencial de Neutralización son: que este comienza con la técnica cualitativa de determinación de efervescencia, la exactitud en la concentración de los reactivos y la adición de los mismos depende de la experiencia de cada analista y la calidad de los instrumentos involucrados para la adición de reactivos, esto puede representar errores que se irán acumulando y darán como resultado un cálculo impreciso del Potencial de Neutralización.

b) Fluorescencia de Rayos X

El balance que se genera a partir de los cationes resulta en valores más bajos de Potencial de Neutralización Neto en relación a la PM-ABA, la explicación a esto es que se contemplan todos los elementos de que contengan tanto calcio como hierro.

En el caso de la neutralización y de acuerdo con la determinación mineralógica el valor es subestimado ya que no se contempla el aporte de la clorita y al porcentaje de calcio que es necesario quitar es el que proviene del yeso que representa solo una pequeña fracción del total mientras que para el elemento de acidez es sobreestimado debido a que se contemplan además de la pirita óxidos que se sabe no juegan un papel en la generación de acidez.

En la Figura 23 se comparan los valores que se obtiene al hacer el balance entre las concentraciones de los cationes determinado por FRX contra los que se generan por PM-ABA para las 127 muestras, el coeficiente de correlación que existe entre estos dos balances es muy bajo siendo igual a 0.35.

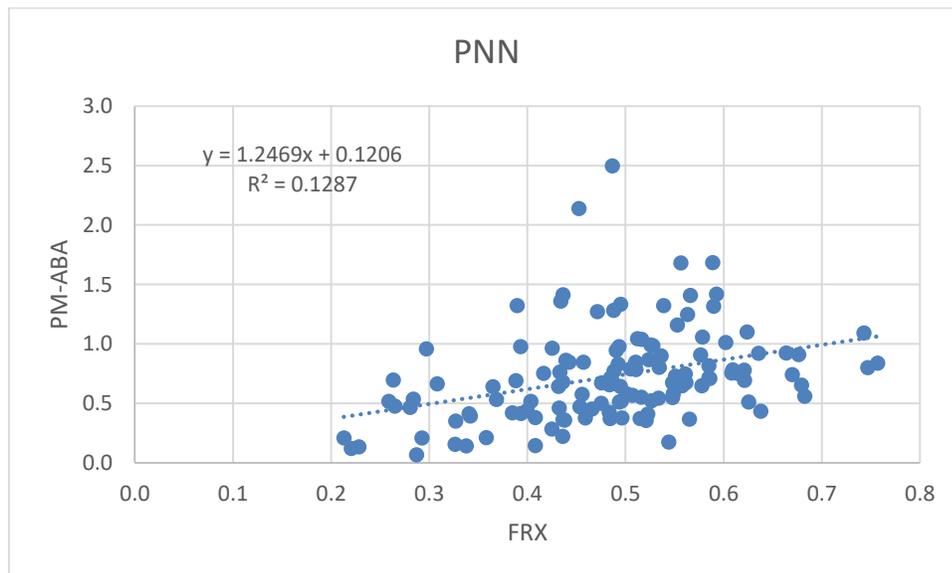


Figura 23. Gráfica de PNN: FRX vs PM-ABA

c) Factor de corrección

En la Figura 24 se puede ver que existe una buena correlación entre los valores del balance que se ha propuesto con el factor de corrección (PNN híbrido) y los valores de la PM-ABA para las 127 muestras, presentando un coeficiente de determinación de 0.71, lo que es igual a un coeficiente de correlación de 0.84.

Gracias a este valor de 0.84, se puede considerar proceder a utilizar esta alternativa, se asevera que el balance híbrido puede ser utilizado para realizar una predicción más certera de la peligrosidad de los jales, debido a que se sabe que el PA está correctamente calculado y el PN no es subestimado adicionalmente a puede ser considerara por su rapidez, sencillez y menor costo.

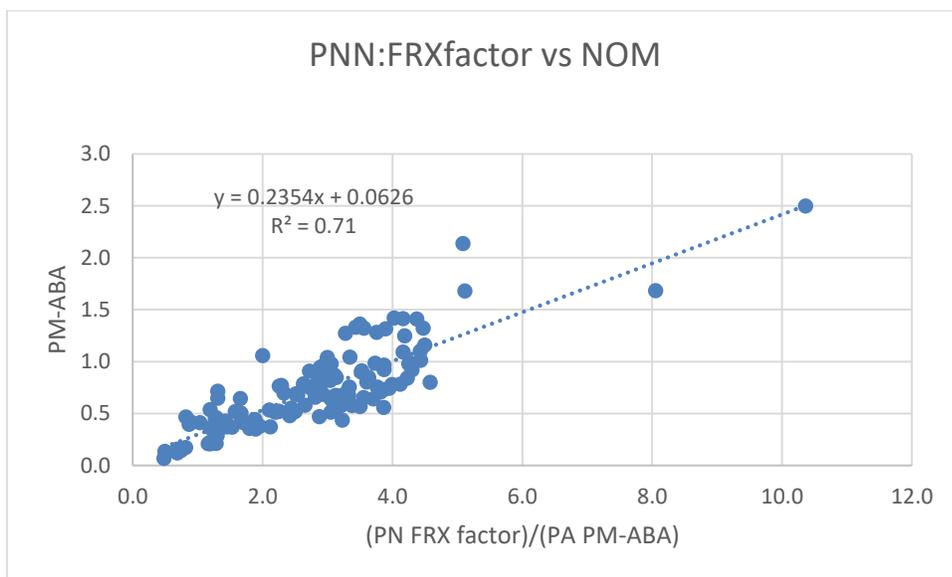


Figura 24. Gráfica que se obtienen de hacer el bance de los valores de PN_{FRX} ajustado sobre el PA de la PM-ABA contra el PNN de PM-ABA

7.2. Comparación entre los tres balances

En la Tabla 15 se puede observar la matriz de correlación entre los tres balances propuestos, la correlación que existe entre la PM-ABA (PNN NOM) y la balance generado a partir de los cationes (PNN FRX) es demasiado baja como para considerarla viable, caso contrario a la correlación existente entre el PNN de la PM-

ABA y el PNN híbrido. De este modo se concluye que el PNN híbrido puede utilizarse debido a que se esperan resultados más realistas ya que no existe subestimación de los elementos neutralizantes, a que representa una mejoría en el tiempo de determinación y finalmente a que es una alternativa más económica.

Tabla 15 Matriz de correlación entre los tres balances calculados para las 127 muestras.

	<i>PNN NOM</i>	<i>PNN FRX</i>	<i>PNN Híbrido</i>
<i>PNN NOM</i>	1		
<i>PNN FRX</i>	0.36	1	
<i>PNN Híbrido</i>	0.84	0.5	1

7.3. Validación a través del intemperismo acelerado.

- En los cuatro balances determinados los valores del PNN (Tabla 14) van en aumento, esto es coherente ya que se sabe que el cociente de la división (Fe/S) % va de menos a más en las muestras compuestas, en otras palabras, el porcentaje de S en relación al Fe es menor.
- De acuerdo con la PM-ABA ninguna muestra será capaz de neutralizar la acidez.
- De acuerdo con el balance que se obtiene después de hacer el cambio de unidades de los cationes Ca y Fe ninguna muestra será capaz de neutralizar la acidez, se nota un valor demasiado bajo debido a que el aporte de neutralización puede llegar a ser subestimado mientras que el aporte de acidez es sobrestimado debido a la gran cantidad de óxidos presentes.
- Conforme al balance híbrido que se ha propuesto solo las muestras 1,2 y 3 son potencialmente generadoras de drenaje ácido de mina, mientras que las muestras 4,5 y 6 no lo son.
- Para dar sustento al factor empírico propuesto, o factor de corrección, se tomaron los porcentajes de calcio leídos por FRX para estas muestras y se multiplicaron por el factor de corrección, después se hizo el cambio de

unidades correspondiente y se dividió entre el PA de la PM-ABA. Fue calculada la DPR entre el PNN híbrido y el PNN con el factor de corrección y en todos los casos se obtuvo un valor aceptable.

- En cuanto al comportamiento del pH para todas las muestras se observa un descenso en este valor, aunque las muestras 3 y 4 no bajan tanto como la 5 y 6, situación que se esperaría fuese al revés.

7.4. Recomendaciones

- Montar el método de prueba estándar para intemperización acelerada de materiales sólidos usando una celda de humedad modificada para estas muestras, ya que al montar esta prueba cinética será posible determinar con mayor contundencia cuál de los tres balances está más apegado a la realidad después de analizar el lixiviado resultante.
- Realizar el análisis de arcillas correspondiente a las muestras analizadas por DRX para poder tener un conocimiento mineralógico aún más robusto que con el que se cuenta.
- Se recomienda determinar el porcentaje de aluminio en algunas muestras en un equipo no portátil de FRX para poder determinar el verdadero aporte a la neutralización de minerales en cuya fórmula química este presente.

Bibliografía

- Acarapi, J., Castro de Esperanza , M. L., Cornejo, L., Litter, M. I., Wong , M., & Mori , V. (2009). IBEROARSEN Metodologías analíticas para la determinación y espaciación de arsenico en aguas y suelos. Argentina: CYTED.
- Armienta, M.A.; Talavera, Oscar; Morton, Ofelia; Barrera, Marilu, 2003, Geochemistry of Metals from Mine Tailings in Taxco, Mexico. Bull. Environ. Contam. Toxicol, v.71, p. 387–393
- Bain, J.G.; Blowes, D.W.; Robertson, W.D.; Frind, E.O.; 2000, Modelling of sulfide oxidation with reactive transport at a mine drainage site. J. Contam. Hydrol., v. 41, pp. 23-47.
- Berry, L. G. (1983). Mineralogy (2nd edition). San Francisco : W. H. Freeman & Co.
- Borie , G. C. (16 de 07 de 2015). Test ABA ¿cuál? ¿por qué?, el potencial de neutralización. Obtenido de AGQ Labs: <http://www.agq.com.es/doc-es/test-aba-cual-por-que-potencial-neutralizacion>
- CAMIMEX. (2018). *Informe de la Octagésima Primera Asamblea General Ordinaria de la Cámara de Minería de México.*
- Carles Melgarejo, J., Proenza, J. A., Galí, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y exploración minera. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 1-23. Obtenido de <https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/espectroscopia-de-fluorescencia-de-rayos-x.html>
- Clark Kenneth, F., Foster C, T., & Damon Paul, E. (1982). Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in Mexico. GSA bulletin, 533-544.
- Corona Esquivel, R., Trilla , J., Henríquez , F., Morales Insuza , A., de la Luz, P. J., & Nava Pérez , L. (2009). Geología y mineralización del yacimiento de hierro. Geología Económica de México, 522-528.

- Corona-Esquivel et al., R. (2009). Geología y mineralización del yacimiento de hierro Peña Colorada, Colima. *Geología Económica de México*, 522-528.
- Corona-Esquivel, R., & Henríquez, F. (2004). Modelo magmático del yacimiento de hierro Peña Colorada, Colima, y su relación con la exploración de otros yacimientos de hierro en México. *Boletín 113 del Instituto de Geología*, 1-109.
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1992). *An introduction to rock-forming minerals*. Harlow, UK: Longman Scientific & Technical.
- Espino, V. (2015). Diseño Geotécnico de una. *GEOMIMET*, 27-32.
- Galán Huertos, E. (2003). Aportaciones de la mineralogía a la evaluación y tratamientos de suelos y. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 1-28.
- Gonzáles Sandoval, M. d. (2006). *Generación de Lixiviados ácidos de jales ricos en pirita (tesis de maestría)*. Ciudad de México : Universidad Nacional Autónoma de México .
- Guitiérrez-Ortega, F., Mitre-Salazar, L. M., Roldán-Quintana, J., Aranda-Gómez, J. J., Moran-Zenteno, D., Alaniz-Álvarez, S. A., & Nieto-Samaniego, Á. F. (1992). *Texto explicativo de la quinta edición de la carta geológica de la República Mexicana, escala 1:2,000,000*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México y Secretaría de Energía Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales.
- Jambor, J. L., & Blowes, D. W. (1998). *Theory and applications of mineralogy in environmental studies of sulfide-bearing mine wastes*. Canada: L.J. Cabri and D.J. Vaughan.
- Jambor, J. L., & Blowes, D. W. (1994). *short course handbook in Environmental geochemistry of sulfide mine-wastes*, mineralogical association of Canada.
- Jambor, J. L. (1994). *short course handbook in Environmental geochemistry of sulfide mine-wastes*, mineralogical association of Canada, 58-292.
- Kwong, Y. J. (1993). *Prediction and prevention of acid mine drainage from a geological and mineralogical perspective*. Natural Resources Canada.

- Kwong, Y., & Ferguson, K. D. (1993). In-site Acid Rock Drainage Assessment and Prevention - A New Challenge for a Mining Geologist. Proc. International Mining Geology Conference, 213-217.
- Lin, Z; 1997, Mobilization and retention of heavy metals in mill-tailings from Garpenberg sulfide mines, Sweden. Sci. Total Environ, v. 198, p. 13-31.
- Luna Celis, L. (2008). MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA DE LOS JALES DE LA UNIDAD MINERA CHARCAS, SAN LUIS POTOSÍ (tesis de licenciatura).
- Luna Celis, L. (2011). EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE DIFERENTES ROCAS, PARA EL CONTROL Y MANEJO DEL DRENAJE ÁCIDO, PARA EL CONTROL Y MANEJO DEL DRENAJE ÁCIDO, PRODUCIDO POR UNA MINA DE HIERRO (Tesis de Maestría).
- Minchaca Arreola, L. (2017). Procesos de atenuación natural que disminuyen los peligros de los jales inactivos de las presas Los Remedios y Hacienda de Atlistac en Tehuilotepic, Guerrero (tesis de licenciatura). Ciudad de México : Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morrales-Arredondo, I. J. (2010). Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras de México: implicaciones ambientales.
- Peña Colorada. (s.f.). Obtenido de Peña Colorada : <http://www.pcolorada.com/>
- Quispe Guzmán, D. L. (2010). Neutralización y retención de metales en drenajes ácidos de mina de la faja pirítica ibérica con residuos de la. Macla-Revista de la Sociedad Española de Mineralogía, 73-75.
- Ramoz, P. D. (2017). Informe de Resultados - Muestras de Peña Colorada.
- Romero, F. M., Armienta, M. A., & Gonzáles, G. H. (2007). Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico. Applied Geochemistry, 109-127.
- Romero, F., & Perez Martinez, I. (2015). Uso de parámetros indirectos para la evaluación de la contaminación de suelos por metales pesados en una zona minera de San Luis Potosí, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 1-12.

- Rosas-Gómez , H., Martínez-Jardinez , G., Guitierrez-Ruíz, M., & Romero , F. M. (2009). Evolución del riesgo ambiental, ocasionado por jales provenientes de la explotación de yacimientos de hierro . GEOS.
- Secretaría de Economía. (2017). Obtenido de Acciones y Programas: <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>
- SGM. (2018). Servicio Geológico Mexicano . Obtenido de Servicio Geológico Mexicano : <https://www.gob.mx/sgm/>
- Sposito, Garrison (2008). The Chemistry of Soils. Second Edition. Oxford University Press. Pp. 329.
- Subsecretaría de Minería. (2017). Perfil del Mercado del Hierro - Acero.
- Trilla, Jordi; et al. (2003). Estructura y edad del depósito de hierro de Peña Colorada (Colima): un posible equivalente fanerozoico de los depósitos de tipo IOCG. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 182-201.
- Zermeño, A. (2005). Jóvenes-TIC- desarrollo.Colima. (U. d. Cátedra, Ed.) Caleidoscopio.
- Zürcher, L., Ruiz, J., & Barton, M. D. (05 de 2001). Paragenesis, elemental distribution, and stable isotopes at the Peña Colorada Iron Skarn, Colima, Mexico. Economic Geology, 553-557.

Anexos

Anexo A selección de muestras para generar las seis muestras compuestas.

Para crear los 6 muestras compuestas se realizó la división del porcentaje de Fe obtenido en FRX entre su correspondiente valor de S total obtenido por el Horno Leco para cada una de las 127 muestras, después se obtuvieron intervalos de este cociente y se identificaron 6 grupos en orden ascendente, siendo la muestra compuesta 1 la que posee un valor más bajo de $\%(\text{Fe}/\text{S})$ hasta llegar a la 6 cuyo resultado de esta división es el más alto (Figura 25).

Para cada uno de estos intervalos se seleccionaron 3 muestras a partir de las cuales se formó una muestra compuesta representativa, para esto se tomaron 150 gramos de cada una de las tres muestras, fueron mezclados y cuarteados para asegurar su homogenización. Para las muestras compuestas se determinaron los valores de PN, PA, PNN, PN_{FRX} , PA_{FRX} y PNN_{FRX} del mismo modo que se hizo para todas las demás.

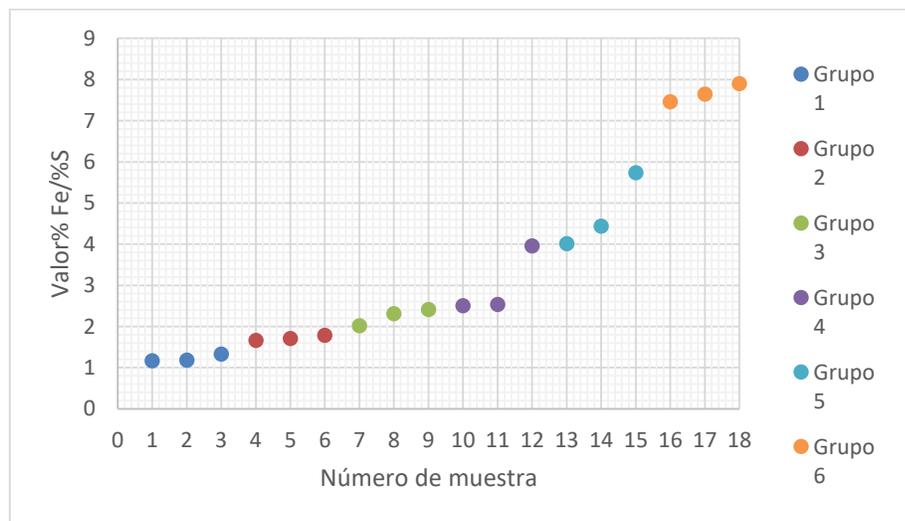


Figura 25. Gráfica de las muestras a partir de las cuales se formaron las muestras compuestas o grupos.

Anexo B Tabla 16 con los resultados de PM-ABA

Muestra	PN NOM	S% LECO	Sulfatos % UV-visible	PA NOM	PNN NOM
pct-01	43.78	3.78	0.06	116.40	0.38
pct-02	34.62	1.49	0.04	45.41	0.76
pct-03	48.64	3.69	0.03	114.35	0.43
pct-04	32.27	3.08	0.12	92.44	0.35
pct-05	50.06	2.09	0.04	63.95	0.78
pct-06	46.63	4.08	0.06	125.77	0.37
pct-07	46.63	3.70	0.05	114.11	0.41
pct-08	24.21	3.78	0.06	116.22	0.21
pct-09	28.42	4.39	0.08	134.83	0.21
pct-10	44.62	1.62	0.05	49.17	0.91
pct-11	37.39	7.07	0.12	217.23	0.17
pct-12	106.72	3.26	0.02	101.12	1.06
pct-13	78.91	3.93	0.02	122.20	0.65
pct-14	63.73	4.09	0.28	118.93	0.54
pct-16	49.49	4.43	0.06	136.71	0.36
pct-17	105.37	4.75	0.02	147.80	0.71
pct-18	71.57	5.88	0.06	181.82	0.39
PC-T-19	78.88	4.05	0.12	122.80	0.64

Muestra	PN NOM	S% LECO	Sulfatos % UV-visible	PA NOM	PNN NOM
PC-T-20	46.08	4.03	0.01	125.69	0.37
PC-T-21	73.21	5.81	0.23	174.53	0.42
PC-T-22	70.69	5.14	0.14	156.38	0.45
PC-T-23	51.42	2.34	0.26	65.08	0.79
PC-T-26	24.49	4.00	0.22	117.98	0.21
pc-v-01	61.59	4.48	0.18	134.32	0.46
pc-v-02	39.52	2.01	0.16	57.91	0.68
pc-v-03	42.34	2.12	0.11	62.81	0.67
pc-v-04	57.98	3.67	0.08	112.32	0.52
pc-v-05	31.69	2.89	0.04	89.16	0.36
pc-v-06	50.81	3.27	0.15	97.64	0.52
pc-v-07	54.09	1.97	0.20	55.35	0.98
pc-v-08	39.78	1.61	0.23	43.25	0.92
pc-v-09	41.63	2.49	0.19	71.80	0.58
pc-v-10	49.87	4.54	0.08	139.51	0.36
pc-v-11	38.87	3.58	0.23	104.74	0.37
pc-v-12	68.38	1.85	0.30	48.57	1.41
pc-v-13	54.64	2.10	0.51	49.70	1.10
pc-v-14	69.01	2.21	0.53	52.46	1.32
pc-v-15	43.18	2.11	0.11	62.60	0.69
pc-v-16	63.70	5.04	0.07	155.27	0.41
pc-v-17	50.13	2.19	0.33	58.28	0.86
pc-v-18	60.40	2.24	0.38	58.16	1.04
pc-v-19	40.28	1.89	0.18	53.59	0.75
pc-v-20	58.74	2.77	0.25	78.72	0.75
pc-v-21	38.61	2.55	0.16	74.53	0.52
pc-v-22	38.59	2.07	0.37	53.02	0.73
pc-v-23	35.38	2.26	0.55	53.44	0.66
pc-v-24	40.86	3.68	0.24	107.40	0.38
pc-v-25	34.68	2.16	0.20	61.24	0.57
pc-v-26	62.28	1.72	0.15	49.04	1.27
pc-v-27	45.25	2.33	0.09	69.85	0.65
pc-v-28	47.38	1.71	0.40	40.93	1.16
pc-v-29	32.98	2.74	0.49	70.26	0.47
pc-v-30	34.42	2.37	0.36	62.69	0.55
pc-v-31	37.24	7.75	0.05	240.64	0.15
pc-v-32	30.72	6.86	0.05	212.67	0.14

Muestra	PN NOM	S% LECO	Sulfatos % UV-visible	PA NOM	PNN NOM
pc-v-34	45.45	2.45	0.31	67.00	0.68
pc-v-35	37.12	1.88	0.07	56.70	0.65
pc-v-36	40.71	1.67	0.32	42.26	0.96
pc-v-37	32.17	4.75	0.12	144.73	0.22
pc-v-38	49.16	2.00	0.19	56.72	0.87
pc-v-39	43.00	2.09	0.16	60.40	0.71
pc-v-40	36.94	2.26	0.11	67.17	0.55
pc-v-41	31.42	2.05	0.20	57.81	0.54
pc-v-42	61.35	2.10	0.66	45.15	1.36
pc-v-43	49.96	2.21	0.09	66.20	0.75
pc-v-44	31.66	2.01	0.25	54.97	0.58
pc-v-45	71.82	1.83	0.21	50.61	1.42
pc-v-46	37.98	1.84	0.32	47.52	0.80
pc-v-47	32.15	2.09	0.25	57.57	0.56
pc-v-48	54.66	1.90	0.12	55.57	0.98
pc-v-49	45.58	0.99	0.41	18.25	2.50
pc-v-50	35.35	2.09	1.42	21.01	1.68
pc-v-51	46.05	2.04	0.58	45.50	1.01
pc-v-52	54.79	1.77	0.53	38.81	1.41
pc-v-53	45.06	2.28	0.13	67.17	0.67
pc-v-54	45.61	2.20	0.09	65.97	0.69
pc-v-55	39.19	1.95	0.26	52.93	0.74
pc-v-56	32.83	1.80	0.16	51.27	0.64
pc-v-57	52.90	1.67	0.31	42.47	1.25
pc-v-58	55.62	2.19	0.04	67.10	0.83
pc-v-59	55.76	1.66	0.02	51.13	1.09
pc-v-60	41.23	2.16	0.51	51.41	0.80
pc-v-61	37.34	2.45	0.76	52.74	0.71
pc-v-62	65.15	1.81	0.24	48.95	1.33
pc-v-63	40.38	2.41	0.18	69.69	0.58
pc-v-64	50.63	2.05	0.29	54.89	0.92
pc-v-65	39.56	2.04	0.10	60.56	0.65
pc-v-66	63.16	1.83	0.25	49.31	1.28
pc-v-67	55.30	1.47	0.13	41.87	1.32
pc-v-68	70.41	1.24	0.19	32.95	2.14
pc-v-69	59.93	2.59	0.24	73.39	0.82
pc-v-78	65.11	1.34	0.10	38.76	1.68

Muestra	PN NOM	S% LECO	Sulfatos % UV-visible	PA NOM	PNN NOM
PC-V-87	50.31	2.06	0.27	56.00	0.90
PC-V-90	36.87	2.75	0.07	83.88	0.44
PC-V-91	36.43	1.49	0.11	43.07	0.85
PC-V-92	35.37	2.83	0.09	85.50	0.41
PC-V-93	42.11	2.13	0.19	60.58	0.70
PC-V-94	35.87	2.39	0.14	70.17	0.51
PC-V-95	35.00	1.76	0.10	52.00	0.67
PC-V-96	54.81	1.41	0.08	41.49	1.32
PC-V-97	45.79	1.82	0.09	54.20	0.84
PC-V-98	31.43	2.71	0.05	83.25	0.38
PC-V-99	24.46	6.65	0.04	206.41	0.12
PC-V-100	30.90	2.24	0.16	64.85	0.48
PC-Z-01	39.15	2.02	0.06	61.13	0.64
PC-Z-02	54.32	2.32	0.06	70.64	0.77
PC-Z-03	44.05	1.93	0.05	58.60	0.75
PC_z-04	39.86	2.62	0.15	77.22	0.52
PC-Z-05	49.72	3.21	0.03	99.37	0.50
PC-Z-06	39.18	4.46	0.05	137.83	0.28
PC-Z-07	54.03	1.87	0.07	56.38	0.96
pc-z-08	40.60	1.98	0.32	51.94	0.78
PC-Z-09	44.57	2.77	0.09	83.61	0.53
PC-Z-10	32.85	7.60	0.13	233.50	0.14
PC-Z-11	43.54	1.95	0.16	55.91	0.78
PC-Z-12	67.76	2.50	0.20	71.77	0.94
pc-z-13	48.05	2.04	0.47	49.20	0.98
PC-Z-14	40.57	9.82	0.14	302.55	0.13
pc-z-15	46.77	2.07	0.28	55.79	0.84
PC-Z-16	45.16	2.11	0.65	45.64	0.99
PC-Z-17	58.84	2.15	0.08	64.79	0.91
PC-Z-18	32.61	2.65	0.24	75.34	0.43
pc-z-19	46.09	2.01	0.27	54.52	0.85
pc-z-25	83.44	5.89	0.14	179.82	0.46
PC-Z-26	38.34	2.55	0.15	74.98	0.51
PC-Z-27	22.51	10.80	0.14	333.22	0.07
PC-Z-28	62.46	2.03	0.11	59.93	1.04

Anexo C Tabla 17 Resultados del balance catiónico

Muestra	Fe %	Ca %	PN FRX	S% estimado FRX	PA FRX Con ST	PNN FRX
pct-01	7.96	5.67	141.62	9.14	285.39	0.50
pct-02	6.07	3.78	94.27	6.97	217.69	0.43
pct-03	8.65	6.00	149.82	9.93	309.95	0.48
pct-04	13.72	6.44	160.78	15.76	491.89	0.33
pct-05	8.44	6.19	154.53	9.69	302.59	0.51
pct-06	9.09	6.72	167.73	10.44	325.77	0.51
pct-07	9.54	7.16	178.83	10.96	342.13	0.52
pct-08	12.23	5.13	128.15	14.04	438.32	0.29
pct-09	12.39	6.37	158.96	14.22	444.00	0.36
pct-10	5.96	4.93	123.09	6.84	213.49	0.58
pct-11	8.34	6.51	162.57	9.57	298.82	0.54
pct-12	8.97	7.45	185.98	10.30	321.60	0.58
pct-13	7.36	5.89	147.13	8.45	263.89	0.56
pct-14	12.78	5.21	130.02	14.68	458.20	0.28
pct-16	9.58	6.00	149.72	11.00	343.26	0.44
pct-17	8.47	7.12	177.72	9.73	303.78	0.59
pct-18	11.85	5.81	145.19	13.61	424.88	0.34
PC-T-19	10.55	7.49	187.12	12.12	378.27	0.49
PC-T-20	8.74	7.09	177.02	10.04	313.25	0.57
PC-T-21	10.34	5.71	142.63	11.88	370.78	0.38
PC-T-22	10.92	7.30	182.37	12.54	391.47	0.47
PC-T-23	9.39	6.81	169.94	10.78	336.57	0.50
PC-T-26	16.47	5.04	125.77	18.92	590.46	0.21
pc-v-01	10.22	6.34	158.43	11.74	366.40	0.43
pc-v-02	8.96	6.26	156.28	10.29	321.23	0.49
pc-v-03	9.21	7.24	180.92	10.58	330.30	0.55
pc-v-04	11.28	6.53	163.12	12.95	404.25	0.40

Muestra	Fe %	Ca %	PN FRX	S% estimado FRX	PA FRX Con ST	PNN FRX
pc-v-05	7.91	5.92	147.72	9.09	283.57	0.52
pc-v-06	10.72	8.10	202.27	12.31	384.18	0.53
pc-v-07	11.05	6.23	155.67	12.69	395.95	0.39
pc-v-08	7.51	6.85	171.10	8.62	269.20	0.64
pc-v-09	8.91	7.01	175.13	10.23	319.34	0.55
pc-v-10	11.08	6.96	173.89	12.72	397.12	0.44
pc-v-11	11.75	8.16	203.87	13.49	421.06	0.48
pc-v-12	9.63	7.83	195.43	11.06	345.20	0.57
pc-v-13	9.06	8.11	202.50	10.40	324.69	0.62
pc-v-14	8.90	7.53	188.01	10.22	318.87	0.59
pc-v-15	10.41	5.80	144.82	11.96	373.16	0.39
pc-v-16	12.08	5.90	147.42	13.87	433.05	0.34
pc-v-17	9.71	6.12	152.93	11.15	348.18	0.44
pc-v-18	8.65	6.42	160.25	9.94	310.25	0.52
pc-v-19	8.43	7.44	185.74	9.68	302.29	0.61
pc-v-20	9.99	8.04	200.86	11.48	358.19	0.56
pc-v-21	9.65	6.87	171.50	11.08	345.97	0.50
pc-v-22	9.52	7.53	188.00	10.94	341.32	0.55
pc-v-23	13.76	6.08	151.91	15.80	493.23	0.31
pc-v-24	9.58	5.61	140.14	11.00	343.44	0.41
pc-v-25	10.85	7.90	197.23	12.46	389.02	0.51
pc-v-26	8.76	5.92	147.93	10.06	313.96	0.47
pc-v-27	9.97	8.27	206.56	11.45	357.46	0.58
pc-v-28	8.55	6.78	169.37	9.81	306.36	0.55
pc-v-29	11.43	7.44	185.74	13.12	409.56	0.45
pc-v-30	9.21	7.24	180.76	10.57	329.97	0.55
pc-v-31	12.93	6.05	151.20	14.85	463.58	0.33
pc-v-32	9.93	5.82	145.25	11.40	355.84	0.41
pc-v-34	10.02	6.27	156.56	11.50	359.03	0.44
pc-v-35	8.46	5.87	146.69	9.72	303.33	0.48
pc-v-36	9.86	6.02	150.37	11.33	353.58	0.43

Muestra	Fe %	Ca %	PN FRX	S% estimado FRX	PA FRX Con ST	PNN FRX
pc-v-37	10.18	6.37	159.20	11.70	365.05	0.44
pc-v-38	8.65	6.50	162.35	9.93	310.01	0.52
pc-v-39	9.26	6.44	160.90	10.63	331.92	0.48
pc-v-40	8.16	6.05	151.01	9.37	292.55	0.52
pc-v-41	8.60	6.59	164.47	9.87	308.15	0.53
pc-v-42	9.34	5.82	145.36	10.73	334.98	0.43
pc-v-43	9.32	8.14	203.18	10.70	334.05	0.61
pc-v-44	10.46	6.84	170.83	12.01	374.90	0.46
pc-v-45	8.83	7.51	187.55	10.14	316.40	0.59
pc-v-46	7.48	8.02	200.25	8.59	268.20	0.75
pc-v-47	8.37	8.20	204.80	9.61	300.06	0.68
pc-v-48	10.09	7.65	190.93	11.59	361.70	0.53
pc-v-49	9.98	6.97	174.06	11.46	357.68	0.49
pc-v-50	7.38	6.24	155.74	8.48	264.58	0.59
pc-v-51	8.60	7.43	185.67	9.88	308.45	0.60
pc-v-52	9.51	5.96	148.74	10.92	340.92	0.44
pc-v-53	11.82	8.07	201.58	13.58	423.82	0.48
pc-v-54	8.93	7.96	198.80	10.25	320.07	0.62
pc-v-55	8.01	7.70	192.22	9.19	286.99	0.67
pc-v-56	13.35	6.99	174.67	15.33	478.51	0.37
pc-v-57	8.11	6.55	163.62	9.31	290.61	0.56
pc-v-58	10.64	7.52	187.78	12.22	381.39	0.49
pc-v-59	7.35	7.84	195.82	8.44	263.57	0.74
pc-v-60	8.90	6.82	170.41	10.22	318.88	0.53
pc-v-61	8.83	7.42	185.41	10.14	316.45	0.59
pc-v-62	8.71	6.19	154.63	10.01	312.37	0.50
pc-v-63	11.49	8.27	206.42	13.20	412.04	0.50
pc-v-64	8.22	7.83	195.52	9.44	294.56	0.66
pc-v-65	8.13	7.93	198.09	9.34	291.60	0.68
pc-v-66	9.75	6.83	170.52	11.20	349.55	0.49
pc-v-67	9.83	5.49	137.18	11.29	352.29	0.39

Muestra	Fe %	Ca %	PN FRX	S% estimado FRX	PA FRX Con ST	PNN FRX
pc-v-68	9.51	6.18	154.30	10.93	341.06	0.45
pc-v-69	9.80	8.22	205.39	11.25	351.19	0.58
pc-v-78	9.15	7.31	182.50	10.51	327.97	0.56
PC-V-87	9.45	7.27	181.54	10.85	338.59	0.54
PC-V-90	10.16	5.82	145.45	11.66	364.05	0.40
PC-V-91	9.09	5.77	144.13	10.44	325.84	0.44
PC-V-92	10.16	5.74	143.32	11.67	364.22	0.39
PC-V-93	13.76	5.20	129.95	15.80	493.23	0.26
PC-V-94	8.78	7.89	196.91	10.09	314.82	0.63
PC-V-95	7.91	6.37	159.11	9.08	283.39	0.56
PC-V-96	8.84	6.84	170.81	10.15	316.95	0.54
PC-V-97	7.90	5.79	144.60	9.08	283.32	0.51
PC-V-98	9.12	6.01	149.99	10.47	326.83	0.46
PC-V-99	16.47	5.21	130.17	18.91	590.35	0.22
PC-V-100	15.19	5.78	144.32	17.44	544.48	0.27
PC-Z-01	11.08	6.87	171.52	12.73	397.29	0.43
PC-Z-02	8.50	5.96	148.86	9.77	304.87	0.49
PC-Z-03	9.83	5.87	146.68	11.29	352.34	0.42
PC_z-04	17.15	6.37	159.11	19.70	614.93	0.26
PC-Z-05	8.94	6.10	152.28	10.27	320.41	0.48
PC-Z-06	10.82	6.60	164.76	12.43	387.90	0.42
PC-Z-07	14.30	6.10	152.21	16.42	512.45	0.30
pc-z-08	9.01	7.88	196.86	10.35	323.08	0.61
PC-Z-09	12.25	6.48	161.72	14.06	438.99	0.37
PC-Z-10	12.62	6.12	152.82	14.50	452.47	0.34
PC-Z-11	9.23	8.23	205.49	10.60	330.87	0.62
PC-Z-12	10.86	7.64	190.88	12.47	389.27	0.49
pc-z-13	10.89	7.71	192.61	12.51	390.35	0.49
PC-Z-14	16.78	5.50	137.42	19.28	601.65	0.23
pc-z-15	8.00	8.70	217.14	9.19	286.86	0.76
PC-Z-16	9.51	7.18	179.20	10.92	340.77	0.53

Muestra	Fe %	Ca %	PN FRX	S% estimado FRX	PA FRX Con ST	PNN FRX
PC-Z-17	8.67	8.42	210.17	9.95	310.66	0.68
PC-Z-18	9.78	8.96	223.66	11.23	350.62	0.64
pc-z-19	9.60	6.30	157.21	11.02	343.97	0.46
pc-z-25	13.42	5.40	134.95	15.41	480.89	0.28
PC-Z-26	8.56	6.07	151.51	9.83	306.87	0.49
PC-Z-27	14.32	5.90	147.37	16.45	513.33	0.29
PC-Z-28	10.05	7.39	151.23	11.54	360.25	0.51

Anexo D Tabla 18 Resultados de la Difracción de Rayos X (DRX)

a) Valores de la PM-ABA para las 6 muestras compuestas

Muestra	Sulfatos	S LECO	PN NOM	PA NOM	PNN NOM
GRUPO1	0.147	9.400	27.460	289.163	0.095
GRUPO 2	0.167	7.600	41.010	232.288	0.177
GRUPO 3	0.057	5.000	57.190	154.476	0.370
GRUPO 4	0.163	3.600	43.118	107.391	0.401
GRUPO 5	0.178	2.100	47.800	60.052	0.796
GRUPO 6	0.286	2.200	51.258	59.818	0.857

b) Valores de FRX para las 6 muestras compuestas

Muestra	%Fe	%Ca	Sulfatos	% S Estimado	PNFRX	PAFRX	PNNFRX
GRUPO1	11.98	4.35	0.15	13.76	108.51	429.23	0.25
GRUPO 2	12.31	3.60	0.17	14.14	89.98	440.93	0.20
GRUPO 3	9.19	4.21	0.06	10.55	105.19	329.11	0.32
GRUPO 4	8.30	4.45	0.16	9.53	111.06	297.35	0.37
GRUPO 5	8.26	4.55	0.18	9.48	113.71	295.75	0.38
GRUPO 6	9.27	4.50	0.29	10.65	112.34	332.09	0.34