



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**Estudio del mecanismo de generación de drenaje ácido en
materiales de concentración del Proyecto Río Blanco**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de
INGENIERO EN MINAS**

Autor

LUIS ALEXANDER SONGOR CARRIÓN

Director

FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

CUENCA, ECUADOR

2020

DEDICATORIA

A mi hermanita Allison, que te has convertido en mi ángel guardián, cuidando y guiando cada uno de mis pasos, aunque el tiempo que compartimos fue muy corto, pero sé que fue suficiente para compartir momentos que quedarán grabados en mi corazón por siempre.

A mis padres, Luis Vicente y Yasmine Margoth, que día a día me brindaron su apoyo incondicional a pesar de las adversidades presentadas, siendo un gran ejemplo a seguir de lucha, respeto y gratitud, inculcándome valores para mi formación profesional y como ser humano.

A mis hermanos, Allison y Saúl, por estar junto a mí en cada etapa de mi vida, demostrándome su amor incondicional y apoyo en todo momento.

A Isabel, que me ha enseñado muchos valores importantes, demostrando que la humildad y carisma es lo mejor que puede tener un ser humano, por estar junto a mi lado en cada momento difícil de mi vida.

A mis abuelos y tíos, por estar siempre pendiente de mí, por brindarme su apoyo sin límites y por la motivación que me han generado para poder seguir adelante cada día

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de vivir un día más de vida, acercarme con personas de excelentes valores durante todo el tiempo de vida universitaria, que han aportado de forma positiva para poder culminar de manera acertada esta etapa universitaria y poder cumplir con cada una de mis metas planteadas.

A la Universidad del Azuay por abrirme las puertas de tan prestigiosa institución y permitir formarme tanto académicamente y como persona a lo largo de mi carrera universitaria.

Mi sincera gratitud al Ing. Fernando Valencia Msc, por compartir ampliamente sus conocimientos a lo largo de estos años y por brindarme la oportunidad y confianza de realizar el presente trabajo de titulación.

Al personal docente, que transmitir sus conocimientos de manera voluntaria tanto dentro de las aulas como fuera ellas.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido

| | |
|--|------|
| DEDICATORIA | ii |
| AGRADECIMIENTOS | iii |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS..... | iv |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | viii |
| ÍNDICE DE TABLAS | x |
| ÍNDICE DE ECUACIONES..... | xi |
| ÍNDICE DE ANEXO | xii |
| RESUMEN..... | xiii |
| ABSTRACT | xiv |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPITULO 1 | 3 |
| MARCO TEÓRICO..... | 3 |
| 1.1. Drenaje Ácido de Mina. | 3 |
| 1.1.1. Fuentes de generación de drenaje ácido..... | 4 |
| 1.1.1.1. Desmonte..... | 4 |
| 1.1.1.2. Minas a cielo abierto | 5 |
| 1.1.1.3. Minas subterráneas | 5 |
| 1.1.1.4. Relaves | 6 |
| 1.1.2. Etapas en el desarrollo de drenajes ácidos..... | 6 |
| 1.1.3. Lixiviación Bacteriana..... | 9 |

| | | |
|---|--|----|
| 1.1.4. | Clasificación de los drenajes mineros | 9 |
| 1.1.4.1. | Relaves Mineros..... | 10 |
| 1.1.4.2. | Pasivos mineros..... | 13 |
| 1.1.4.3. | Activos mineros..... | 13 |
| 1.2. | Columnas de Lixiviación..... | 13 |
| 1.2.1. | Evaluación del Drenaje Ácido de Mina | 13 |
| 1.2.1.1. | Pruebas estáticas..... | 14 |
| 1.2.1.2. | Relación Ácido – Base | 15 |
| 1.2.2. | Pruebas de Columnas de Lixiviación | 18 |
| CAPITULO 2 | | 20 |
| DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO | | 20 |
| 2.1. | Datos generales | 20 |
| 2.1.1. | Ubicación geográfica..... | 20 |
| 2.1.2. | Clima..... | 21 |
| 2.1.2.1. | Ecuatorial frío de alta montaña | 21 |
| 2.1.2.2. | Clima ecuatorial mesotérmico semi-húmedo | 22 |
| 2.1.3. | Temperatura..... | 23 |
| 2.1.4. | Humedad Relativa..... | 23 |
| 2.1.5. | Precipitación..... | 23 |
| 2.1.6. | Componente biótico | 24 |
| 2.1.6.1. | Flora..... | 24 |
| 2.1.6.2. | Fauna | 25 |
| 2.1.7. | Geología | 25 |
| 2.1.7.1. | Formación Tarqui, PT (Pleistoceno) | 26 |
| 2.1.7.2. | Formación Macuchi, KM (Cretáceo) | 27 |

| | |
|--|----|
| 2.1.7.3. Geomorfología..... | 27 |
| CAPITULO 3..... | 29 |
| DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN | 29 |
| 3.1. Preparación de la muestra. | 30 |
| 3.1.1. Preparación mecánica..... | 30 |
| 3.1.2. Tamizaje. | 31 |
| 3.1.3. Flotación..... | 33 |
| 3.2. Test Estáticos. | 36 |
| 3.2.1. Potencial ácido..... | 37 |
| 3.2.2. Potencial de Neutralización. | 38 |
| 3.3. Test Dinámicos..... | 42 |
| 3.3.1. Infraestructura de las columnas de lixiviación..... | 43 |
| 3.3.1.1. Diseño de la estructura. | 43 |
| 3.3.2. Construcción de las columnas de lixiviación..... | 44 |
| 3.3.3. Dosificación en las columnas de lixiviación. | 45 |
| 3.4. Medición de pH y conductividad. | 47 |
| 3.4.1. Medición de pH..... | 47 |
| 3.4.2. Conductividad | 49 |
| 3.4.3. Cálculo Eh (potencial de oxidación). | 51 |
| CAPÍTULO 4..... | 53 |
| RESULTADOS..... | 53 |
| 4.1. Test estáticos. | 53 |
| 4.1.1. Potencial de neutralización (PN)..... | 53 |
| 4.1.2. Potencial ácido (PA). | 60 |
| 4.1.3. Potencial de Neutralización Neto (PNN)..... | 60 |
| 4.2. Test dinámicos | 61 |

| | | |
|-------------------------------------|---|----|
| 4.2.1. | Interpretación de curvas de pH | 65 |
| 4.2.2. | Interpretación de las Conductividad..... | 69 |
| 4.2.3. | Interpretación del comportamiento de las curvas de Eh. | 73 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | | 74 |
| CONCLUSIONES | | 74 |
| RECOMENDACIONES..... | | 76 |
| BIBLIOGRAFÍA. | | 77 |
| ANEXOS | | 80 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Etapas de formación de aguas ácidas..... | 8 |
| Figura 2. Proceso de tratamiento mineral | 11 |
| Figura 3. Columnas de lixiviación | 19 |
| Figura 4. Mapa de ubicación del proyecto Río Blanco..... | 20 |
| Figura 5. Ubicación de las concesiones del Proyecto minero Río Blanco..... | 21 |
| Figura 6. Clima de la zona donde se ubica el Proyecto minero Río Blanco | 23 |
| Figura 7. Formaciones geológicas del Proyecto minero Río Blanco | 26 |
| Figura 8. Geomorfología del Proyecto minero Río Blanco | 28 |
| Figura 9. Trituradora de mandíbulas..... | 30 |
| Figura 10. Molino de bolas | 31 |
| Figura 11. Recuperación de cobre en varias granulometrías de diferentes plantas concentradoras..... | 32 |
| Figura 12. Agitador Ro-Top..... | 33 |
| Figura 13. Celda de flotación DENVER..... | 34 |
| Figura 14. Productos de la flotación de minerales. | 35 |
| Figura 15. Secado del material proveniente de flotación..... | 35 |
| Figura 16. Homogenización del material | 36 |
| Figura 17. Potenciómetro usado para realizar los análisis de PN y PA. | 37 |
| Figura 18. Titulación con ácido clorhídrico..... | 39 |
| Figura 19. Diseño de columnas de lixiviación..... | 43 |
| Figura 20. Construcción de columnas de lixiviación..... | 44 |
| Figura 21. Columnas de lixiviación. | 45 |
| Figura 22. Material grueso..... | 46 |
| Figura 23. Mezcla de material grueso y fino..... | 46 |
| Figura 24. Llenado de columnas de lixiviación..... | 47 |
| Figura 25. Medición de pH. | 49 |
| Figura 26. Medición de la conductividad..... | 51 |
| Figura 27. Variación de pH generada por adición de HCl (Alimento 1)..... | 54 |
| Figura 28. Variación de pH generada por adición de HCl (Alimento 2)..... | 55 |

Figura 29. Variación de pH generada por adición de HCl (Concentrado 1)..... 56

Figura 30. Variación de pH generada por adición de HCl (Concentrado 2)..... 57

Figura 31. Variación de pH generada por adición de HCl (Relave 1). 58

Figura 32. Variación de pH generada por adición de HCl (Relave 2). 59

Figura 33. Comportamiento del pH en un lapso de tiempo determinado. (Alimento)..... 62

Figura 34. Comportamiento del pH en un lapso de tiempo determinado. (Concentrado).
..... 63

Figura 35. Comportamiento del pH en un lapso de tiempo determinado. (Relave)..... 64

Figura 36. Comportamiento de la conductividad en un lapso de tiempo determinado.
(Alimento)..... 66

Figura 37. Comportamiento de la conductividad en un lapso de tiempo determinado.
(Concentrado)..... 67

Figura 38. Comportamiento de la conductividad en un lapso de tiempo determinado.
(Relave)..... 68

Figura 39. Comportamiento del Eh en un lapso de tiempo determinado. (Alimento) 70

Figura 40. Comportamiento del Eh en un lapso de tiempo determinado. (Concentrado) 71

Figura 41. Comportamiento del Eh en un lapso de tiempo determinado. (Relave) 72

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Clasificación de los drenajes de mina por su pH. | 10 |
| Tabla 2. Interpretación del Potencial de Neutralización Neto. | 17 |
| Tabla 3. Potencial ácido | 38 |
| Tabla 4. Peso exacto de la muestra selecciona para determinación de PN | 39 |
| Tabla 5. Comportamiento del pH al agregar ácido clorhídrico..... | 40 |
| Tabla 6. Rango pH de amortiguación de algunos minerales consumidores de ácido que reaccionan estabilizando el pH..... | 40 |
| Tabla 7. Potencial de Neutralización de Kg CaCO ₃ /ton | 41 |
| Tabla 8. Valores finales del Potencial de Neutralización en kg de CaCO ₃ /ton..... | 42 |
| Tabla 9. Medición de pH..... | 48 |
| Tabla 10. : Datos conductividad. | 50 |
| Tabla 11. Datos de Eh. | 52 |
| Tabla 12. Potencial ácido | 60 |
| Tabla 13. Generadores de potencial de acidez | 60 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|---|----|
| Ecuación 1. Reacción de oxidación de la pirita | 7 |
| Ecuación 2. Reacción de oxidación de iones ferrosos a iones férricos..... | 7 |
| Ecuación 3. Reacción de precipitación del ion férrico..... | 7 |
| Ecuación 4. Producción ácida potencial..... | 16 |
| Ecuación 5. Oxidación y neutralización de la pirita. | 17 |
| Ecuación 6. Potencial neto de neutralización..... | 17 |
| Ecuación 7. Ecuación Global | 37 |
| Ecuación 8. Formula del potencial ácido | 38 |
| Ecuación 9. Potencial de Neutralización de Kg CaCO ₃ /ton..... | 41 |
| Ecuación 10. : Cálculo de Eh. | 51 |

ÍNDICE DE ANEXO

| | |
|--|----|
| Anexo 1. Listado de abreviaturas..... | 80 |
| Anexo 2. Resultado del análisis químico del alimento | 81 |
| Anexo 3. Resultado del análisis químico del relave | 82 |
| Anexo 4. Resultado del análisis químico del concentrado..... | 83 |

**ESTUDIO DEL MECANISMO DE GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO EN
MATERIALES DE CONCENTRACIÓN DEL PROYECTO RÍO BLANCO**

RESUMEN

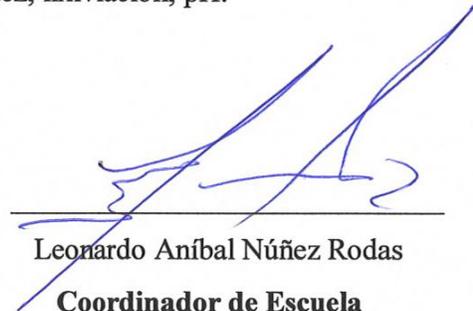
El presente trabajo pretende realizar la predicción de la generación de drenaje ácido minero, usando materiales de concentración, los mismos que se obtuvieron del Proyecto Minero Río Blanco. Mediante los ensayos cinéticos, tratamos de reproducir los procesos y las condiciones de los lugares de mina que pueden generar acidez. Estos ensayos requieren de mayor tiempo y son más costosos que los estáticos.

Una vez construidas y cargadas las columnas de lixiviación con el material óptimo, se controlará continuamente, los parámetros químicos de lixiviados como el pH y conductividad eléctrica, permitiendo determinar la calidad del agua de drenaje y su variación en el tiempo.

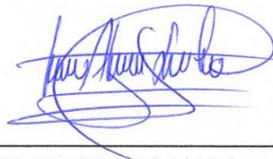
Palabras clave: Drenaje ácido de minero, acidez, lixiviación, pH.



Fernando Tulio Valencia Guaricela
Director del Trabajo de Titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinador de Escuela



Luis Alexander Songor Carrión

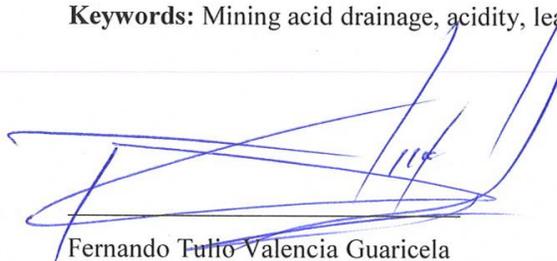
Autor

**STUDY OF THE ACID DRAIN GENERATION MECHANISM IN
CONCENTRATION MATERIALS OF THE RÍO BLANCO PROJECT**

ABSTRACT

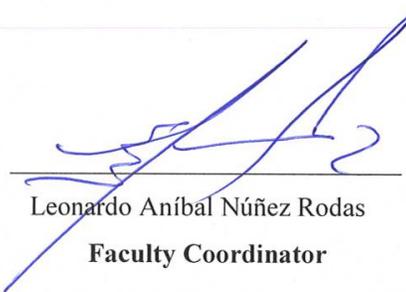
This work sought to predict the generation of mining acid drainage using concentration materials obtained from the Río Blanco Mining Project. It sought to reproduce the processes and conditions of mine sites that can generate acidity through kinetic tests. These tests require more time and are more expensive than static ones. Once the leaching columns are constructed and loaded with the optimum material, chemical leachate parameters such as pH and electrical conductivity will be continuously monitored, allowing to determine the quality of the drainage water and its variation over time.

Keywords: Mining acid drainage, acidity, leaching, pH.



Fernando Tulfo Valencia Guaricela

Thesis Director



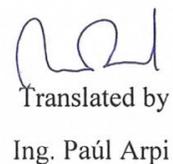
Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Faculty Coordinator



Luis Alexander Songor Carrión

Author



Translated by
Ing. Paúl Arpi

Luis Alexander Songor Carrión

Trabajo de titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela Msc.

Junio 2019

**ESTUDIO DEL MECANISMO DE GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO EN
MATERIALES DE CONCENTRACIÓN DEL PROYECTO RÍO BLANCO**

INTRODUCCIÓN

El sector minero en Ecuador es el futuro del desarrollo económico para el país, proyectando que en los próximos años será un aporte significativo para el Producto Interno Bruto, comparado con los ingresos de los productos tradicionales.

El Gobierno Nacional decidió apoyar el desarrollo de la industria minera y atraer capitales hacia este sector considerando que el Ecuador es un país con potencial minero, que tiene gran cantidad de reservas de oro, plata y cobre, además de una variada oferta de productos mineros, generando plazas de trabajo en todos los sectores donde se desarrolla.

En la provincia del Azuay en la zona sur, se ubican dos de los proyectos estratégicos que se encuentran desarrollando en el país, los cuáles son considerados de gran importancia para el desarrollo económico y productivo, además de las zonas cercanas donde están asentados.

El proyecto minero Río Blanco, que se encuentra en fase de preproducción, está ubicado en una zona de páramo, donde existen fuentes hídricas cercanas, por lo que es muy importante tomar las medidas preventivas para toda actividad que vaya a desarrollarse, ejecutando un desarrollo sostenible y sustentable del proyecto, del cual se obtuvieron las muestras que son analizadas en el presente trabajo.

Songor Carrión 2

En la minería se tiene uno de los principales problemas que es el drenaje ácido de mina, consiste en la aparición de aguas con pH típicamente entre 2 y 4 y altas concentraciones de metales pesados disueltos (tóxicos) al estar en contacto con el agua, oxígeno y bacterias con minerales de sulfuros metálicos.

Los materiales que se obtuvieron del proyecto minero Río Blanco, corresponden a mena, caja o estéril y relaves, los mismos que han sido sometidos a diferentes procesos y tratamientos mineros, sufriendo una variación en sus condiciones físicas y mineralógicas, dando las condiciones óptimas para la generación de drenaje ácido y afección al suelo.

Debido a estas condiciones que se presentan en los distintos materiales de concentración, el presente trabajo se centra en establecer el potencial de generación de drenaje ácido, de manera que las empresas que se encuentran involucradas así como las autoridades, puedan disponer de esta información permitiendo aplicar medidas de prevención y control ante los posibles impactos que se puedan generar.

CAPITULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Drenaje Ácido de Mina.

De todas las causas de contaminación de los cursos fluviales, quizás el drenaje ácido de mina sea una de las más graves, por su naturaleza, extensión y dificultad de resolución. Los ríos que son afectados por este tipo de contaminación se caracterizan por su grado acidez, así como por el elevado contenido de sulfatos y metales pesados de sus aguas y por el concentrado metálico de sus sedimentos, así como por los costes económicos de su remediación. (Grande, Borrego, & Morales, 2010).

Los daños que se generan varían desde alteraciones subletales, para ciertos individuos de los ecosistemas afectados, en los casos de polución muy débil, se generan problemas asociados de bioacumulación y biomagnificación, produciendo la desaparición de la fauna fluvial y pérdida de los recursos hídricos, tornándose inprovechable el agua para el consumo humano, agrícola o industrial (Sáinz, Grande, ML, & Sánchez-RodasD, 2002).

La característica principal de los drenajes ácidos de mina es que contienen una gran cantidad de sólidos en suspensión y metales pesados disueltos como Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, etc., alcanzando grandes concentraciones decenas y centenas de miligramos por litro. Estos elementos en dichas concentraciones son perjudiciales para la actividad biológica, ya que contaminan los cauces, además este tipo de aguas pueden llegar a dañar estructuras y cimentación de construcciones, debido al elevado coste que supone su tratamiento en depuradoras convencionales por el dilatado tiempo que perdura el fenómeno de generación de aguas ácidas, en antiguas zonas mineras se ha ido agravando esta situación, siendo necesario buscar una solución a este problema. (Pamo, 2002)

El drenaje ácido se origina cuando un mineral sulfuroso se pone en contacto con el oxígeno y la humedad atmosférica. En la superficie del mineral empieza un complejo mecanismo que

se da con la oxidación de los sulfuros muy insolubles, transformándolos en sulfatos generadores de ácido. La cinética de oxidación por oxígeno es muy lenta, pudiendo aumentar su velocidad de oxidación hasta cien veces, debido a la presencia de ión férrico y la actuación de bacterias catalizadoras. Con la oxidación de la pirita, finalmente se producen ciertos tipos de reacciones secundarias entre los productos de las reacciones anteriores y los productos restantes del minerales presentes en la roca, siendo el resultado final un conjunto de contaminantes solubles depositados sobre el mineral, que luego son disueltos y arrastrados por el agua de lluvia o escorrentía, produciéndose un caudal líquido contaminante que lleva su acidez, sulfatos y metales pesados hasta los diversos cursos de agua. (Dogan, 2001)

1.1.1. Fuentes de generación de drenaje ácido

Los minerales sulfurosos se encuentran en todas partes del ambiente geológico, están principalmente en rocas que yacen debajo de una capa de suelo y, a menudo, debajo de la napa freática. Cuando se encuentran en condiciones naturales, el suelo que cubre la roca y el agua subterránea disminuye el contacto con el oxígeno, permitiendo así que la generación de ácido continúe a una velocidad tan baja que el efecto sobre la calidad general del agua será insignificante o indetectable. La roca sulfurosa expuesta al aire y al agua, es reactivada, quedando como resultado de actividades tales como la construcción de carreteras o explotación minera, se puede acelerar la velocidad de generación de ácido y ocasionar un impacto en el medio ambiente. En un asiento minero, las fuentes primarias de drenaje ácido son las áreas en las cuales la roca de mina ha sido disturbada, y la superficie expuesta. Entre las fuentes principales del drenaje ácido de roca están:

1.1.1.1. Desmante

El término "desmante" generalmente se emplea para hacer referencia a la sobrecapa y rocas que deben extraerse para tener acceso al mineral de interés. Por lo general la mayor parte de desmante se produce en la explotación de minas a cielo abierto y en menores cantidades puede producirse a partir del desarrollo de obras subterráneas. Por lo general, esta roca es almacenada en la superficie, en grandes pilas o botaderos de desmante, también puede utilizarse para construcciones en el lugar; como relleno para la construcción de cimientos, especialmente en terreno montañoso, para la construcción de carreteras, represas, etc. (Ortiz, 2003).

Los botaderos de desmonte son generalmente, mezclas de material proveniente de diferentes áreas de explotación o desarrollo minero. Por lo general, están constituidos por rocas gruesas que se almacenan sobre la napa freática. De esta manera, cualquier mineral sulfuroso reactivo queda expuesto al aire y al agua que pasan por el botadero, inmediatamente luego de haber sido depositado allí. Las reacciones de generación de ácido pueden dar su inicio en cualquier lugar del botadero, generalmente se producen en diferentes sitios. La química del agua de drenaje proveniente del botadero dependerá de la mineralogía de la roca en la fuente de generación del Drenaje Ácido de Roca, como también de las reacciones con las diferentes rocas a lo largo de la ruta del flujo. Dado que toda pila de rocas o botadero puede estar compuesta por una mezcla de tipos de roca, puede surgir agua de química muy diferente, incluso en cada una de las diferentes áreas del mismo botadero. (Ortiz, 2003).

1.1.1.2. Minas a cielo abierto

La minería a cielo abierto puede alterar las condiciones del agua superficial y del agua subterránea. Incluso puede ser necesario desviar las aguas superficiales o las actividades de desagüe para disminuir el nivel del agua subterránea para acceder al mineral. Las actividades de desagüe y voladura, exponen los sulfuros al oxígeno atmosférico, iniciando la oxidación y la generación de ácido. (Valente, 2004)

1.1.1.3. Minas subterráneas

La minería subterránea por lo general incluye perforación, voladura, acarreo y transporte en vertical de estériles y mineral a la superficie. Se emplean diferentes métodos de minería de excavación por hundimiento, donde se crea una gran masa de roca fracturada sobre los trabajos subterráneos principales. En algunos casos, la zona de fragmentación puede extenderse hasta la superficie del suelo. Las propiedades físicas y químicas de esta gran masa de roca fracturada pueden ser similares a las propiedades de la roca estéril.

Al igual que en la minería a cielo abierto, las actividades de desagüe son típicamente necesarias para eliminar el agua subterránea del funcionamiento subterráneo, comúnmente mediante el uso de pozos de desagüe y bombas de sumidero. En algunos casos también se puede construir un túnel de drenaje por debajo del nivel de extracción del mineral, el mismo que permite el drenaje por gravedad del agua subterránea hasta la superficie. La minería

expone los sulfuros presentes en las paredes de las minas o las fracturas por explosión al oxígeno atmosférico que ingresa al trabajo subterráneo a través de los ejes y otras aberturas que se cruzan con la superficie terrestre. Los trabajos subterráneos, así como las pilas de almacenamiento del mineral y residuos generados por la minería, son una fuente potencial generadora de drenaje ácido de mina. (Ortiz, 2003)

1.1.1.4. Relaves

El desarrollo de drenaje ácido de mina en un embalse de relaves, generalmente está muy limitado durante la operación, desarrollándose lentamente a lo largo del tiempo, después que haya cesado la acumulación en el embalse. La presencia de las reacciones de oxidación está limitada por la acumulación continua de capas frescas de relaves saturados y alcalinos durante la operación. Después de que se ha concluido la acumulación y los relaves empiezan a drenar, los sulfuros se exponen al oxígeno, en ese momento se da inicio a la oxidación. Dado que las reacciones de oxidación requieren tanto la presencia de agua como oxígeno, la generación de ácido por lo general comienza en la superficie y en los lados de la represa, que son los primeros en drenar. Así, la oxidación se inicia en la superficie de la represa y progresa en la profundidad, a medida que los relaves drenan y la napa freática se va moviendo hacia el fondo del depósito. El secado y resquebrajamiento de la superficie de los relaves puede aumentar el suministro de oxígeno hacia los relaves que están en profundidad y mejorar los procesos de oxidación que se encuentran más profundos. (INAP, 2009).

Además de este tipo de fuentes generadoras de drenaje ácido de mina, tenemos otros procesos generadores que se dan en las etapas de trituración y molienda del mineral, donde al disminuir su granulometría tiene más área de exposición con el agua usada en estos procesos.

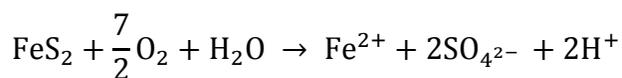
1.1.2. Etapas en el desarrollo de drenajes ácidos.

La combinación de la generación de ácido y las reacciones de neutralización del ácido generalmente conduce al desarrollo de drenaje ácido de roca. Con el tiempo, el pH disminuye a lo largo de una serie de mesetas gobernadas por la amortiguación de una gama de conjuntos minerales.

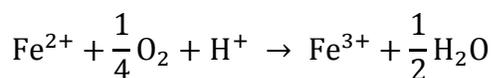
El desarrollo de drenajes ácidos se desarrolla en tres etapas:

Primera Etapa.

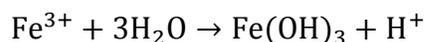
Se caracteriza por un rango de pH circumneutral es decir que contiene un pH entre 6.5 y 7.5, dándose el consumo de ácido por minerales de carbonato como la calcita.



Ecuación 1. Reacción de oxidación de la pirita



Ecuación 2. Reacción de oxidación de iones ferrosos a iones férricos



Ecuación 3. Reacción de precipitación del ion férrico

Las anteriores reacciones describen el proceso de oxidación de sulfuro, tanto para la Etapa I y la Etapa II, que produce la liberación de sulfato. A medida que se consume esta alcalinidad, el pH disminuye en las etapas dependiendo de la naturaleza de los minerales neutralizantes. (Broughton & Robertson, 1992).

Segunda Etapa

En general, en esta etapa los niveles de sulfato, acidez y trazas de metales aumentan, aunque para algunos metales (por ejemplo, Cu, Pb), las concentraciones pueden estar limitadas por los controles de solubilidad mineral. La amortiguación puede ser proporcionada por hidróxidos metálicos. A valores de pH de aproximadamente 4.5 e inferiores, predomina la oxidación mediada por bacterias, dando como resultado una rápida aceleración de la generación de ácido. (Broughton & Robertson, 1992).

Tercera Etapa

El taponamiento final generalmente se limita a la disolución de minerales de silicato, y los controles de solubilidad en las concentraciones de trazas de metales están en gran parte ausentes. En esta etapa varía la generación de ácido al aumentar la solubilidad del hierro y disminuye la precipitación de hidróxido férrico. (Morin, 2001)

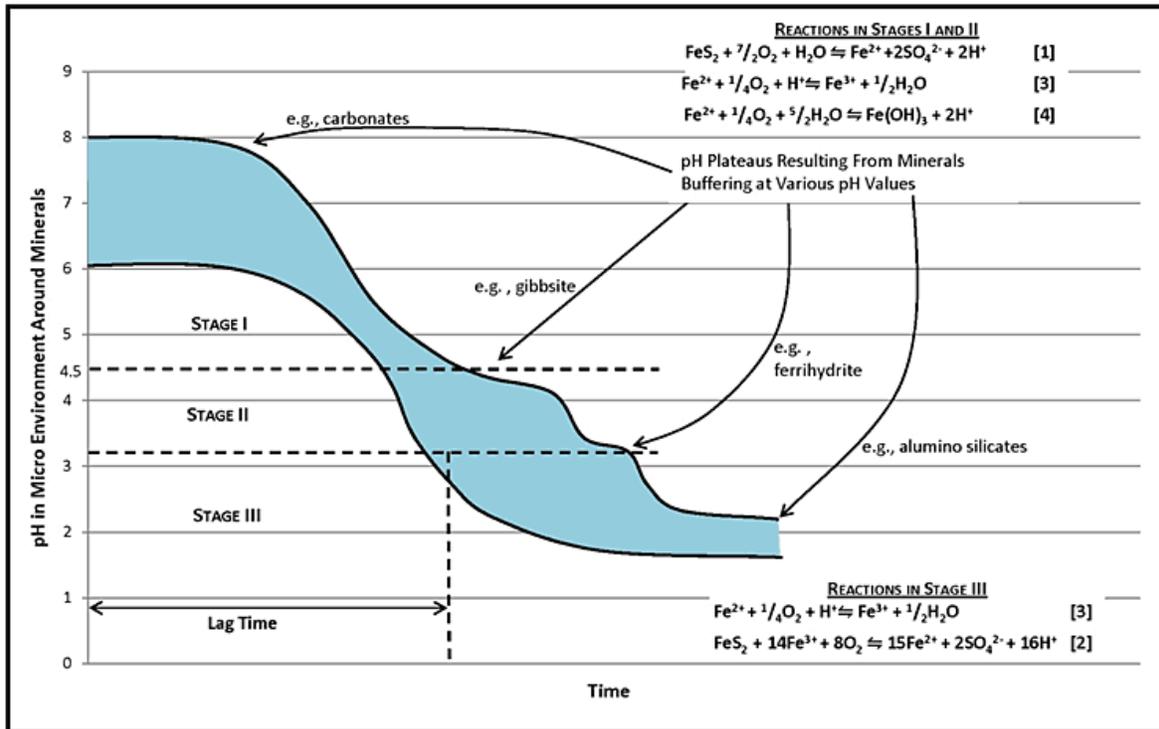


Figura 1. Etapas de formación de aguas ácidas

Fuente: (Aduvire, 2006).

- El mecanismo más importante es el indirecto, debido a que se autocataliza, si se inhibe la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* la producción de ácido se reduce al menos en un 75%
- Si el pH del agua asciende por encima de 5, de igual manera se inhibe la oxidación.
- Si el pH del agua desciende por debajo de 4,5 debe esperarse que todo el sulfuro de hierro termine oxidándose.
- Si el pH desciende por debajo de 2,5 se establece un equilibrio en el que la actividad bacteriana se estabiliza, ya que habrá alcanzado su óptimo de desarrollo, en donde la velocidad de reacción se ha incrementado entre 10⁵ y 10⁶ veces respecto al mecanismo directo. (Aduvire, 2006)

1.1.3. Lixiviación Bacteriana

La lixiviación bacteriana, la biooxidación de sulfuros metálicos a sulfatos metálicos solubles y ácido sulfúrico, es efectuada por cierto tipo de bacterias especializadas.

Tres tipos de especies de bacterias están involucradas principalmente: Thiobacillus ferrooxidans, Thiobacillus thiooxidans y Leptospirillum ferrooxidans.

- Thiobacillus ferrooxidans oxida compuestos de azufre reducidos a sulfato y hierro (II) a iones de hierro (III).
- En cambio las bacterias de Thiobacillus thiooxidans son capaces de oxidar únicamente compuestos reducidos de azufre
- Finalmente las bacterias de Leptospirillum ferrooxidans puede oxidar solo iones de hierro (II) (Quensen, Tiedje, & Boyd, 1999)

1.1.4. Clasificación de los drenajes mineros

El drenaje ácido de mina se forma por la oxidación de sulfuros minerales como piritita, pirrotina, marcasita, etc., una vez que estos entran en contacto con el oxígeno del aire o del agua. Depende de muchos factores la clasificación de los drenajes de mina, entre ellos tenemos al pH y el potencial de acidez o alcalinidad que tengan los minerales presentes en dichos drenajes. (Aduvire, 2006)

En un drenaje minero existe una mayor cantidad de minerales ácidos que los alcalinos, por lo que pueden formar grandes concentraciones de SO_4 , Fe, Mn, Al y otros iones; sin embargo el pH puede ser bajo o no, pero debido a la existencia de metales disueltos como Fe, Al y Mn, generan iones H^+ por hidrólisis (alta concentración iones H^+), procediendo a disminuir el pH a valores de 1,5 o 3. (Morin & Hutt, 2001)

CLASIFICACIÓN DE LOS DRENAJES DE MINA DE ACUERDO A SU pH Y POTENCIAL DE ACIDEZ/ALCALINIDAD

Tabla 1. Clasificación de los drenajes de mina por su pH.

| CLASE | pH | DESCRIPCIÓN |
|--------------|-------------|---|
| Ácido | <6 | <ul style="list-style-type: none"> - Acidez generada por oxidación de minerales, particularmente de sulfuros. - Nivel de metales disueltos mayor que en drenajes casi neutros. - Asociado a minas metálicas, carbón y piritas. |
| Alcalino | >9-10 | <ul style="list-style-type: none"> - Alta alcalinidad generada por disolución de minerales básicos (óxidos, hidróxidos y algunos silicatos). - Niveles de algunos metales mayores que en drenajes casi neutros. - Asociado con minería de diamantes, molienda de bauxita, cenizas de combustión de carbón. |
| Casi neutro | 6 a 9-10 | <ul style="list-style-type: none"> - Dependiendo de abundancia de metales, en determinados períodos puede ser ácidos o alcalinos. - Concentración de metales disueltos algunas veces puede exceder niveles tóxicos. |
| Otros | Irrelevante | <ul style="list-style-type: none"> - Puede afectar la concentración de metales. - Asociado a minería no metálica como potasa, sales, boratos, bentonitas, gravas, arcillas, entre otros. |

FUENTE: Moreno, (2012).

1.1.4.1. Relaves Mineros.

La palabra "relaves" describe el subproducto de varias industrias extractivas, incluidas las de aluminio, carbón, arenas petrolíferas, uranio y metales preciosos y básicos. (Lottermoser, 2007)

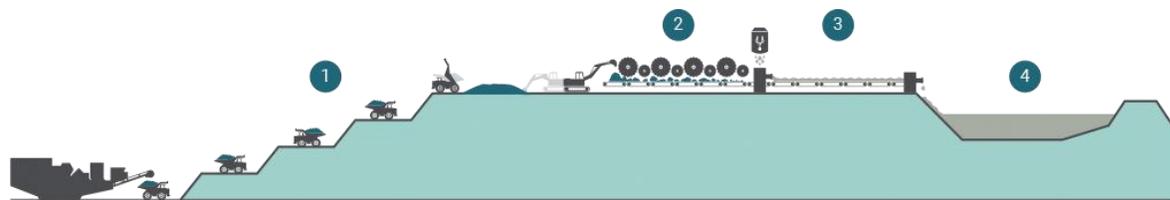
Los relaves son los materiales de desecho que quedan después de separados los metales o minerales valiosos de un mineral.

Entre los tipos de relaves mineros tenemos:

- Relaves del proceso de gravedad
- Relaves del proceso de flotación
- Relaves de proceso de lixiviación
- Incluye, entre otros, relaves de cobre, oro, hierro, plomo, tierras raras, fosfatos etc.

Hay que tener muy en cuenta que las rocas de desecho y la sobrecarga no son relaves.

Como el material es mayormente fino y húmedo, éste debe ser almacenado en botaderos de residuos industriales. Estos relaves deberán ser depositados en terrenos de relleno que han sido acondicionados para su almacenamiento.



| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|--|---|---|
| Las rocas que contienen minerales y metales se extraen de la tierra y se procesan para separar los minerales y metales. | La roca extraída es finamente molida y mezclada con agua y, a veces con productos químicos para separar minerales y metales. | Una vez que los minerales o metales deseados se extraen de la roca finamente molida, los desechos que quedan son en forma de lodo, conocidos como residuos. | Esta lechada puede procesarse hasta convertirse en un material similar a la arena y transportarse a una pila seca, o bombearse en estado húmedo a un depósito para su almacenamiento. |

Figura 2. Proceso de tratamiento mineral

Fuente: (Dogan, 2001)

Los residuos sólidos mineros, que resultan del proceso de flotación de minerales polimetálicos en las plantas concentradoras, son conocidos en la minería como relaves mineros, existiendo en sus dos modalidades, como pasivos mineros y activos mineros.

1.1.4.1.1. Propiedades físicas de los relaves

Las partículas de relaves comúnmente son angulares a muy angulares, y esta morfología impone un alto ángulo de fricción en los relaves secos. El tamaño del grano de los relaves es muy variable y difícil de generalizar, ya que está delineado por los requisitos específicos del proceso. Dentro de las pilas de relaves hay un aumento en la densidad aparente con la profundidad como resultado de la compactación, el desagüe y la diagénesis (Bjelkevik, 2005).

1.1.4.1.2. Propiedades químicas de los relaves

Los productos químicos tóxicos utilizados para extraer los materiales valiosos del mineral, como el cianuro utilizado en la extracción de oro, permanecen en los relaves al final del proceso y pueden filtrarse al agua subterránea. La roca puede contener naturalmente sustancias químicas peligrosas, como el arsénico y el mercurio, que se filtran en el agua mucho más fácilmente después de que la roca se ha molido y expuesto al viento y la lluvia.

El drenaje ácido de mina es el problema más frecuente y generalizado. Muchas minas de roca dura (incluidas las mayorías de las minas de oro) extraen minerales que están unidos con compuestos de sulfuro. Estos compuestos producen ácido sulfúrico en contacto con el aire y el agua, un proceso que ocurre a una velocidad muy baja en roca no perturbada, a una velocidad más alta en roca residual sin protección, (que tiene una gran superficie y ahora está expuesta al aire) y mucho mayor tasa en relaves mineros desprotegidos que tienen una superficie masiva. El resultado puede ser la producción de agua muy ácida, que además lixivía metales y otros productos químicos de la roca circundante. (Coil, Lester, & Higman, 2014)

1.1.4.2. Pasivos mineros

Los pasivos ambientales mineros involucran tanto los socavones o labores mineras, así como las escombreras y relaves de minas que culminaron su ciclo de operación o que han quedado en abandonadas, generando algunas afecciones al medio ambiente:

- Contaminación tanto en aguas superficiales como en aguas subterráneas.
- Contaminación de suelos en el área de influencia de estos depósitos.
- Impacto visual negativo.
- Riesgo constante de daños al ecosistema frente a los desastres naturales.
- Presencia de metales pesados en el medio que los rodea. (Romero & Flores, 2010)

1.1.4.3. Activos mineros

Los activos mineros hacen referencia en forma específica a los relaves provenientes del proceso de flotación de minerales polimetálicos, de minas en operación continua. Este tipo de relaves, contiene sólidos muy finos en suspensión, acompañado de minerales sulfurosos que son el resultado del circuito de flotación.

La proporción de relaves para concentrar es generalmente muy alta, su relación está alrededor de 200: 1 (Lottermoser, 2007).

1.2. Columnas de Lixiviación.

1.2.1. Evaluación del Drenaje Ácido de Mina

Este tipo de experimentos intenta ser aplicado a las investigaciones de vanguardia sobre el Drenaje ácido de mina al rededor del mundo. Ayuda a descubrir un mejor proceso para colectar la mayor información posible y la prevención de la contaminación por drenaje ácido minero.

Cuando intentamos predecir el DAM, podemos obtener ciertos resultados como:

- La generación potencial de ácido y cual la potencia neutralizante de los tipos de rocas que serán expuestos en el proceso minero

- Que potencial de contaminación de metales ocurre en los materiales que están expuestos
- En qué condiciones se realizara la transportación de contaminantes en el área minera. (Smart, y otros, 2002)

Para estas y otras preguntas criticas acerca de cómo la roca reaccionara a las perturbaciones, pueden ser aplicadas varias pruebas. Generalmente a estas pruebas se les conoce como test estáticos y test dinámicos.

1.2.1.1. Pruebas estáticas.

En esta etapa, con frecuencia, se efectúan análisis geoquímicos de rocas enteras o análisis elementales en muestras seleccionadas, en combinación con los análisis mineralógicos. Sobre la base de la comprensión teórica y de pruebas en muestras similares, puede ser posible estimar, a partir de estas pruebas, el potencial relativo de liberación de metales; por ejemplo, si hay presencia de productos secundarios de intemperismo, los cuales se sabe que son solubles en ambientes ligeramente alcalinos o ácidos, la muestra podría generar potencialmente drenaje contaminado. (Zamora, 2003)

Las pruebas estáticas son el primer paso para el entendimiento del potencial del Drenaje ácido en una mina propuesta. Este nivel de pruebas incluye la descripción de las diferentes características de los tipos de roca o materiales provenientes de los diferentes procesos de las plantas de procesamiento de las áreas mineras, con el propósito de detectar aquellos componentes que podrían generar ácido y aquellos que podrían neutralizar el potencial ácido en los desechos mineros. (Price & Errington, 1997)

Inicialmente, se mide el pH en pasta de la muestra, para determinar si antes del análisis ha ocurrido generación de ácido, Por lo general, si el valor del pH es mayor que 8, la muestra probablemente contenga carbonatos reactivos; si es menor que 5, probablemente haya habido generación de ácido en la muestra, o en el material circundante. (Zamora, 2003)

Una de las principales pruebas preliminares utilizada para medir el potencial ácido (PA), es llamada Contabilidad de Base ácida. Este proceso mide grandes porciones de materiales generantes de ácido y neutralizantes en las muestras obtenidas de las áreas mineras

propuestas. Los minerales que contienen sulfuro, particularmente los sulfatos, tales como la pirita, tienen mayor potencial para generar acidez cuando estos son expuestos al agua y al aire.

Los test estáticos generalmente involucran:

- Contenido de elementos traza (concentración total y concentración soluble).
- Balance Acido-Base.
- Potencial de neutralización de la masa, expresado como carbonato.
- Medición del pH en pasta.
- Mineralogía y otras propiedades geológicas (Price & Errington, 1997)

1.2.1.2. Relación Ácido – Base

La relación ácido-base (ABA) es un procedimiento analítico que proporciona valores para ayudar a evaluar la producción de ácido y ácido neutralizante potencial de las rocas, materiales de mina, escombreras, etc. Para predecir la calidad del agua después de la minería, se compara la cantidad de producción drenaje ácido de roca con la cantidad de ácido neutralizante y una muestra de la calidad del agua en el sitio, siendo esta ácida o alcalina. La relación ácido-base es una buena herramienta que permite evaluar la calidad de sobrecarga antes de la minería extractiva y para predecir la calidad del drenaje posterior a las labores mineras.

Esta relación como originalmente se ha desarrollado, ha sido designada para medir el potencial de neutralización (PN) y el contenido de azufre de los estratos de sobrecarga individual. Desde estas medidas, el potencial de máxima acidez (PNN) y el potencial de neutralización (PN) se calculan para cada capa geológica de la superficie de la tierra. El Potencial de neutralización es una medida de la cantidad de un ácido, compuesto de neutralizantes principalmente carbonatos, álcalis intercambiables y cationes alcalinotérreos. (Kania, 1998)

El uso de los datos de ácido-base para predecir la calidad del agua después de la minería implica numerosos supuestos:

- 1) Todo el azufre en una muestra va a reaccionar para formar ácido.

- 2) Todo el material en la muestra que consume ácido en el laboratorio generará alcalinidad en el campo.
- 3) La velocidad de oxidación de la pirita es menor o igual que la tasa de neutralización.
- 4) PN y S% por debajo de ciertos umbrales no influyen en la calidad del agua.

El test ácido – base (ABA) es un tipo de análisis cualitativo, el mismo que indica únicamente si hay la existencia o no de un generador de potencial ácido.

La determinación del Potencial de Acidificación se realiza principalmente basándose en el análisis químico de la muestra por azufre total y azufre como sulfato. De esta manera se calcula por diferencia el azufre como sulfuro, que sirve de base para el cálculo del PA. (CIMM T & S S.A., 2007)

Los valores de la producción ácida (PA) de la muestra tradicionalmente se expresan en kg de CaCO₃ por tonelada de material (t), se puede expresar de la siguiente forma:

$$PA = \frac{x}{1000} * 1000\text{kg} * \left(\frac{\text{peso molecular CaCO}_3}{\text{peso atómico S}} \right)$$

Ecuación 4. Producción ácida potencial.

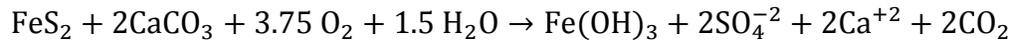
El Potencial de Neutralización (PN) representa la cantidad total de minerales neutralizantes presentes en el material, principalmente carbonatos, se determina mediante una digestión ácida de una porción de muestra durante 24 horas, a temperatura controlada y posterior titulación.

El potencial de neutralización (PN) se calcula a partir de la cantidad de ácido neutralizado por la muestra, en equivalentes de carbonato de calcio (CaCO₃) y se expresa en Mg / 1000 Mg (o partes / 1000 partes).

El método más simple y más utilizado para la determinación total del azufre es de alta temperatura del horno de combustión. Este método da un porcentaje de azufre presente en la

roca y luego se multiplica por una constante para determinar el MPA en mg / 1000 mg, que es comparable con la determinación PN. (Skousen, 2000)

Para la oxidación completa de la pirita y la neutralización de todo lo que genera acidez:



Ecuación 5. Oxidación y neutralización de la pirita.

Donde 1 mol de FeS₂ (64 g de azufre) se neutraliza con 2 moles de CaCO₃ (200 g de CaCO₃). Por lo tanto, la constante es 31.25 y se necesitan 31.25 mg de CaCO₃ para neutralizar 1000 mg de roca que contiene 1% de azufre pirítico.

Después de haber calculado los valores de (PN) y (PA), se calcula el potencial neto de neutralización (PNN) determinado para cada tipo de muestra seleccionada, obteniendo el Potencial Neto de Neutralización por diferencia:

$$\text{PNN} = \text{PN} - \text{PA}$$

Ecuación 6. Potencial neto de neutralización.

Los datos obtenidos del test estático, permite categorizar los materiales en tres grupos:

Tabla 2. Interpretación del Potencial de Neutralización Neto.

| Potencial representado | Criterio de interpretación | |
|--|----------------------------|-----------|
| Bajo o Nulo Potencial de Generación de Ácido | PNN>20 | PN/PA>3 |
| Potencial Marginal de Generación de Ácido | PNN<20 | 1<PN/PA<3 |
| Alto Potencial de Generación de Ácido | PNN<0 | PN/PA<1 |

Conceptualmente, un número positivo indica que la generación potencial productora es de tipo alcalino, mientras que un número negativo indica potencialmente la producción de ácido en la sobrecarga para el potencial neto de neutralización (PNN).

La relación de PN / PA, simplemente se calcula dividiendo PN por PA. Una relación de 1 es equivalente a un PNN de 0. Estos valores son de gran importancia ya que se pueden utilizar para el análisis e interpretación de cada una de las muestras obtenidas, en donde se pueden utilizar para identificar los materiales potencialmente tóxicos en la sobrecarga y ayudar en la planificación de manejo y control de los procesos generadores de drenaje ácido de mina

1.2.2. Pruebas de Columnas de Lixiviación

El objetivo principal de este tipo de prueba de columna, es proporcionar un método de laboratorio que prediga con mayor precisión la calidad del agua de drenaje de roca, incluyendo botaderos de minas subterráneas, cielo abierto, pilas de lixiviación y paredes de cantera. La prueba ayuda a simular con mayor exactitud las condiciones en las que se genera el drenaje ácido de mina en el campo. (Robertson, 1989)

Las muestras son típicamente expuestas a ciclos de humedecimiento y secado para acelerar la oxidación de los materiales sulfurados. Aunque estos ciclos pueden ser modificadas en un intento de replicar las condiciones climáticas del sitio donde se recolectaron las muestras, que implican típicamente ciclos de humectación, resultando significativamente una relación mayor de líquido a sólido, que en realidad puede ser experimentado dentro de una instalación de almacenamiento de residuos de roca. Las tasas de oxidación se estiman por el método de liberación de sulfato a través de la relación estequiométrica entre la masa de sulfato liberado en el tiempo a la cantidad de pirita oxidada. (AMIRA, 2002)

Hay diferentes tipos de pruebas de lixiviación en columna u otras pruebas similares diseñadas para obtener información similar.

El método de prueba de lixiviación en columna a escala de laboratorio, se utiliza con una masa conocida (generalmente 1-2 kg) de roca triturada con una granulometría menor a 4 mm, una masa agua destilada normalizada y un continuo enjuague semanal. Después del enjuague,

se mide el lixiviado, se muestrea y el análisis varía dependiendo del propósito de la prueba de columna.

Las pruebas para materiales de concentración en columnas de lixiviación tienen como propósito:

- ✓ Identificar cualquier cambio en la química del lixiviado bajo la temperatura del sitio de la mina y condiciones de lluvia.
- ✓ Proporcionar información sobre la diferencia en la velocidad de lixiviación en función del área de contacto.
- ✓ Maximizar la generación de drenaje ácido para evaluar la proporción o el potencial máximo acidez que se libera durante la intemperie.
- ✓ Permite evaluar la influencia de cualquier material que tenga la capacidad de neutralizar el ácido sobre la muestra obtenida.
- ✓ Imitar el entorno y las condiciones a las que pueden estar expuestos dichos materiales.
(Smart, y otros, 2002)



Figura 3. Columnas de lixiviación

Fuente: (LEAF, 2002)

CAPITULO 2

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. Datos generales

2.1.1. Ubicación geográfica

El proyecto minero Río Blanco se encuentra ubicado en la Cordillera Occidental de los Andes, al sur de Ecuador, entre las parroquias Molleturo y Chaucha, cerca de las comunidades de Río Blanco, Cochapamba, Zhin Alto y LLano Largo, en la provincia del Azuay, a unos 500 km al sur de la capital de Quito y a unos 60 km al noroeste de la ciudad de Cuenca.

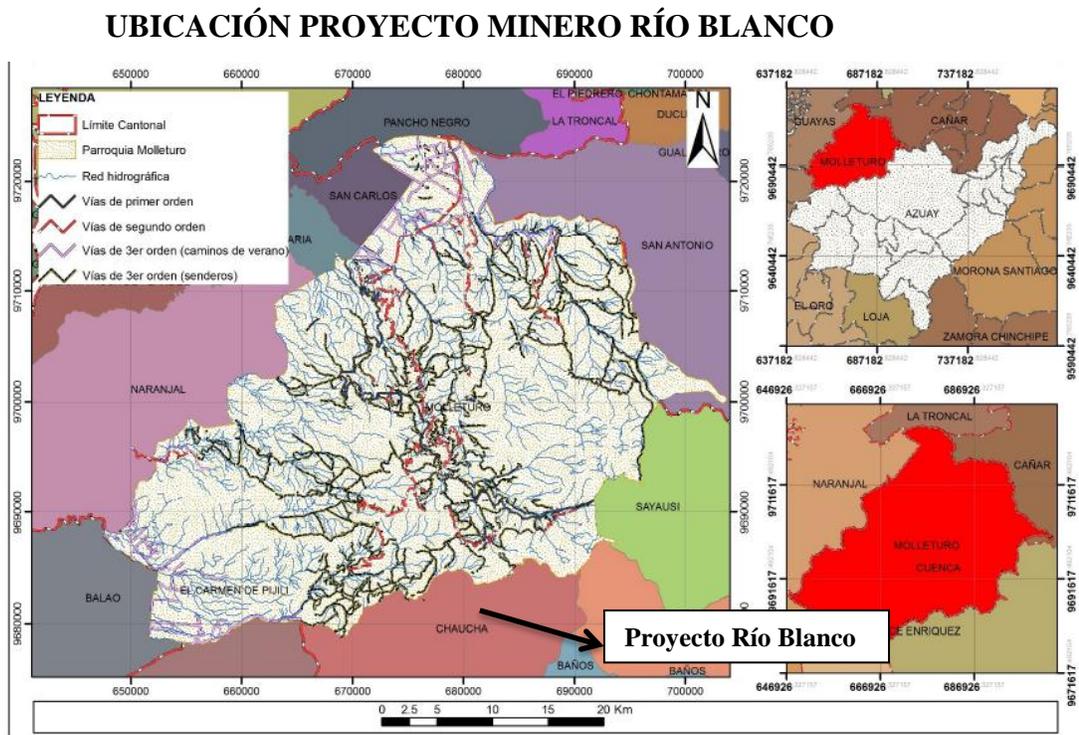


Figura 4. Mapa de ubicación del proyecto Río Blanco

Fuente (MAE, 2013).

El proyecto Río Blanco consta de tres concesiones mineras (Miguir, San Luis A2 y Canoas), comprende 4.979 hectáreas de concesión, que son otorgadas para conservación ambiental, la actividad minera se desarrolla en 40 hectáreas (menos del 1%) del total de la concesión. Se encuentra a una altura estimada de 3500m a 3900m sobre el nivel del mar.

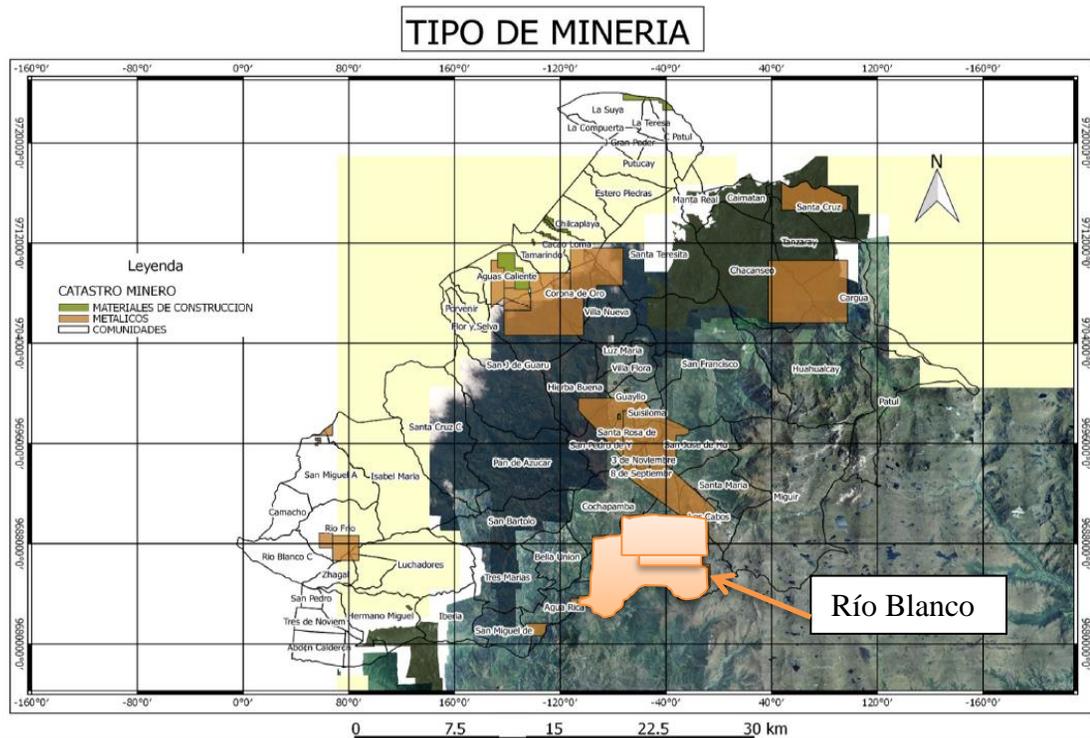


Figura 5. Ubicación de las concesiones del Proyecto minero Río Blanco

Fuente (MAE, 2013).

2.1.2. Clima.

El tipo de clima en el área del Proyecto se identificará y describirá en base a cartografía disponible y corroborada por la información de los grandes climas del Ecuador, en la publicación de la ORSTOM sobre el clima, precipitaciones y escorrentía.

2.1.2.1. Ecuatorial frío de alta montaña

Este tipo de clima se sitúa siempre por encima de los 3.000 m.s.n.m. La altura y la exposición son los factores principales que condicionan los valores de las temperaturas y las lluvias. Las

máximas temperaturas rara vez sobrepasan los 20° C, las mínimas tienen sin excepción valores inferiores a 0° C, mientras que las medias anuales, aunque son muy variables, fluctúan casi siempre entre 4 y 8° C. La gama de los totales pluviométricos anuales va de 800 a 2.000 mm y la mayoría de los aguaceros son de duración prolongada pero de baja intensidad. La humedad relativa en esta zona es siempre superior al 80 %. La vegetación natural, llamada “matorral” en el piso más bajo, es reemplazada en el piso inmediatamente superior por un espeso tapiz herbáceo frecuentemente saturado de agua, el “páramo”. (POURRUT, 1995)

2.1.2.2. Clima ecuatorial mesotérmico semi-húmedo

Es el clima más característico de la región interandina, a excepción de los valles abrigados y las zonas situadas por encima de los 3.200 m.s.n.m., ocupa la mayor extensión. Anualmente las temperaturas medias están comprendidas, generalmente, entre 12 y 20°C pero hay ocasiones en las que pueden ser inferiores en las vertientes menos expuestas al sol; las temperaturas mínimas descienden rara vez a menos de 0 °C y las máximas no superan los 30 °C. La humedad relativa, varía en función de la altura y de la exposición, con valores comprendidos entre el 65 y el 85 % y la duración de la insolación que puede ir de 1.000 a 2.000 horas en el año. Las precipitaciones anuales oscilan entre 500 y 2.000 mm y están repartidas en dos estaciones lluviosas, de febrero a mayo, y en octubre-noviembre. La estación seca principal, va desde el mes de junio a septiembre, que generalmente es muy marcada. La vegetación natural de esta zona ha sido en su mayoría sustituida por pastizales y cultivos (principalmente cereales, maíz y papa). (POURRUT, 1995)

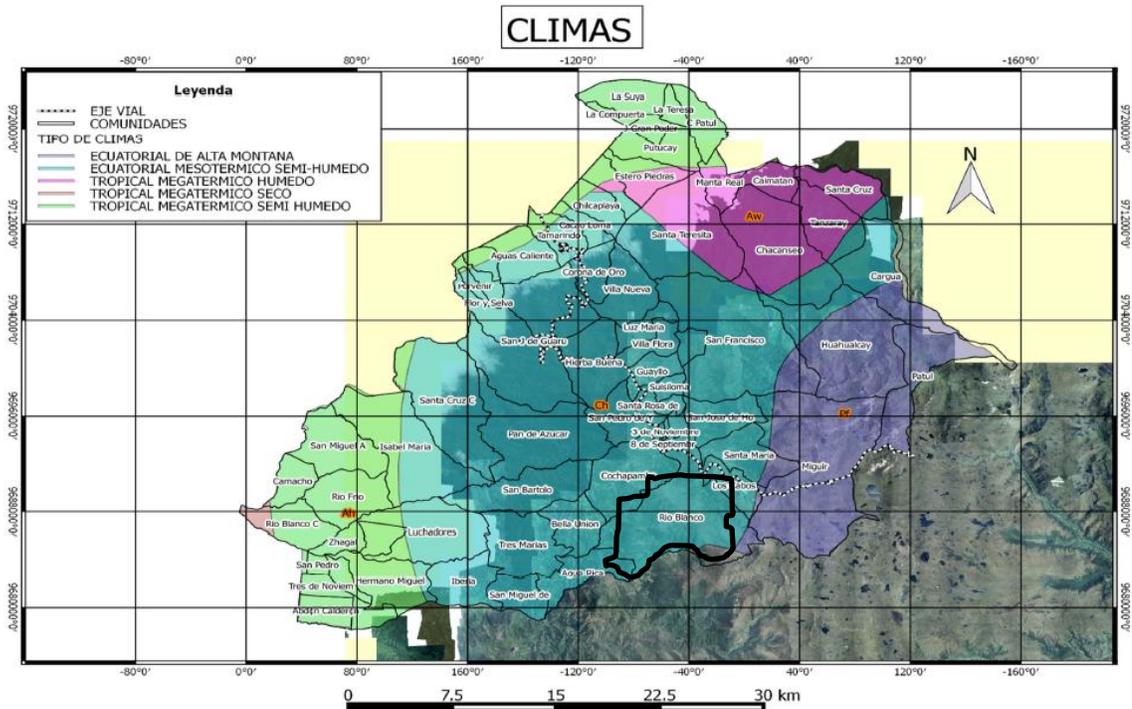


Figura 6. Clima de la zona donde se ubica el Proyecto minero Río Blanco

Fuente (MAE, 2013).

2.1.3. Temperatura.

Los anuarios meteorológicos no registran información de temperatura de las estaciones escogidas para el análisis, sin embargo, según datos generales y estudios realizados en el área del proyecto se ha estimado un rango de temperatura entre los 10 y 15°C.

2.1.4. Humedad Relativa.

En cuanto a humedad relativa, la zona no cuenta con estaciones meteorológicas instaladas para la medición de este parámetro, por ello se tomaron datos de estaciones dentro de toda la provincia. Se ha determinado una humedad relativa que varía entre 82% y 85 %.

2.1.5. Precipitación.

Según registros y mediciones multitemporales, las precipitaciones pluviales se producen entre los meses de octubre a mayo, con temporadas secas que se intercalan periódicamente. Entre los

meses de junio a septiembre, se tiene la época más seca del año con una mínima cantidad de lluvias. A fin de obtener la precipitación media multianual del área, se tomó como base el registro histórico de los valores de precipitación, durante un periodo de 10 años (2000 – 2009). Se aplicó el método de la Media Aritmética, obteniendo como resultado una Precipitación media anual aproximada de 1115,3mm. (POURRUT, 1995)

2.1.6. Componente biótico

2.1.6.1. Flora

El Ecuador presenta una amplia gama de ambientes altitudinales y ecológicos que han permitido la existencia de flora extremadamente diversa, “considerando el tamaño geográfico nuestro país tiene una cantidad desproporcionada de esta riqueza florística, se estima que el Ecuador probablemente tiene más especies de plantas por unidad de área que cualquier otro país de América del sur” (Cerón, 2003) Al presentarse esta amplia y diversa gama de ambientes, todos los bosques son de gran importancia, debido a sus impresionantes hábitats y variedad de endemismo, entre ellos podemos destacar el “Bosque de Neblina”, que presenta una gran variedad de organismos y servicios ambientales como: purificador de aire, refugio y alimento de varias especies faunísticas, de igual manera proveen de alimento al ser humano, permitiendo la retención de agua y por ende evitando sequías, evitan el proceso erosivo, ya que no dejan que el agua y el viento arrastren el suelo. Estos bosques han sufrido, en los últimos treinta años, cambios drásticos debido a la deforestación por madereras, a la vez que han adquirido mayor impulso las plantaciones de monocultivos industriales. Por esto resulta necesario que los proyectos a realizarse en estas áreas, vayan orientados además del beneficio económico, a la protección y buen manejo de los pocos recursos naturales existentes en las zonas. Las actividades que implican el desarrollo o utilización de los recursos naturales, como las construcciones de vías o infraestructuras, ocasionan impactos directos sobre las áreas donde se implantan. Por esta razón es necesario generar información de base (antes de ejecutar cualquier tipo de proyecto) sobre el estado de conservación de los ecosistemas que podrían verse afectados. Esta información permitirá tomar acciones de prevención, mitigación o restauración, según sea el impacto ocasionado. (Cerón, 2003)

2.1.6.2. Fauna

El Ecuador es excepcional en términos de biodiversidad y es considerado uno de los países mega diversos del mundo, ya que constituye una de las 18 naciones, que juntas suman un poco más de las dos terceras partes de la vida en nuestro planeta, en los cuáles están incluidos los ecosistemas terrestres, de agua dulce y marina, con una gran variedad de regiones climáticas y zonas de vida con más ecosistemas y ambientes naturales en el mundo, presentando la más alta diversidad de organismos por unidad de área, un ejemplo de esta afirmación son las aves con 1584 especies, los peces continentales 951 especies, los anfibios con 497 especies y los mamíferos con 403 especies, puesto que la gran biodiversidad ecuatoriana es consecuencia de la complejidad de sus ecosistemas. El piso Alto Andino que incluye las zonas ubicadas sobre los 2800 msnm. En la cordillera occidental como en la cordillera real, los sectores altos se denominan páramos, los mismos que se caracterizan por la excesiva humedad y llovizna permanente. En el suelo se encuentran registradas 64 especies de mamíferos que representan el 16% del total registrado en Ecuador, siendo el orden más representativo el de los roedores; registrándose alrededor de 140 especies de aves, con el 8,5% de especies registradas para el Ecuador, en tanto que la herpetología del piso, hacia las zonas de mayor altitud y el límite más bajo, el número de especies disminuye considerablemente, algunas especies que habitan en el piso templado extienden su rango de distribución hasta el piso alto andino, de las cuales 14 son de distribución única para este piso. (Albuja et al., 2012)

2.1.7. Geología

El proyecto se encuentra ubicado en las estribaciones de la cordillera occidental en el sector denominado "El Cajas" en la provincia del Azuay. La zona de estudio está localizada en el callejón interandino y en las estribaciones Orientales de la cordillera Occidental, situada sobre el terreno continental de Chaucha y en la Formación Piñón respectivamente. El Terreno Continental Chaucha comprende materiales de origen volcánico (flujos de lavas calco-alcalinas) cubiertos por niveles que contienen materiales variables como tobáceos, dacíticos a riolíticos, generando un relieve con inclinaciones escarpadas, fuertes y moderadas, de posible edad Terciaria. La Formación Piñón comprende rocas ígneas básicas, diabasas, basaltos, tobas, lavas acojinadas o almohadillas, posiblemente de edad Gálica. (Feininger, 1981)

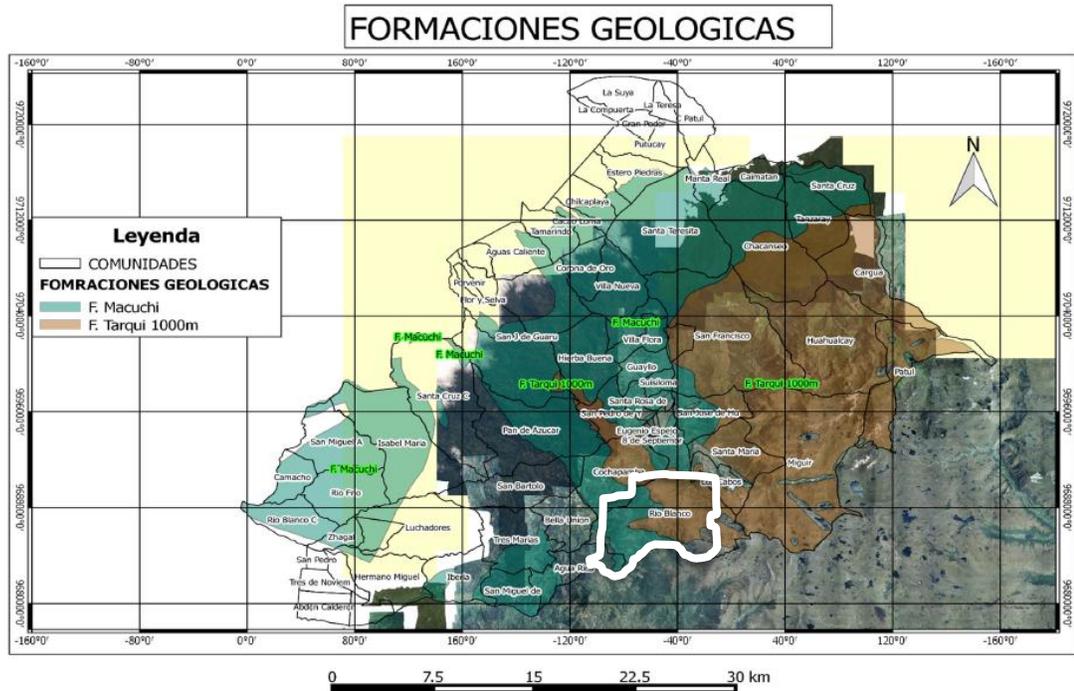


Figura 7. Formaciones geológicas del Proyecto minero Río Blanco

Fuente (MAE, 2013).

Estos terrenos se encuentran intruídos por cuerpos granitoides más jóvenes. Las unidades más antiguas las integran las fajas metamórficas y la Unidad Pallatanga, con tendencias andinas, sus contactos se infieren fallados. Las Unidades más jóvenes son las que comprenden depósitos volcánicos y volcano clásticos del Grupo Saraguro de edad Eocénica a Oligocénica.

2.1.7.1. Formación Tarqui, PT (Pleistoceno)

Comprende una secuencia volcánica gruesa, la cual puede ser dividida en tres unidades estratigráficas: flujos oscuros de grano fino de composición andesíticas, sobre los cuáles yace una secuencia de tobas de composición diacítica y riolita. Estos piroclastos son alternados con flujos delgados de composición similar. La unidad superior está compuesta por flujos de riolita homogénea de grano medio que aflora en la parte alta de los valles formando colinas bajas, bien definidas.

2.1.7.2. Formación Macuchi, KM (Cretáceo)

Antiguamente se le agrupaba dentro de la Formación Piñón o Formación Diabasaporfirítico. Estudios recientes han determinado que probablemente la Formación Macuchi ocurre en el flanco oeste de la Cordillera Occidental, excluyendo los volcánicos cretácicos continentales del Sur del país que ahora se llaman Formación Célica. Ésta formación tiene una altura aproximada de 2.800 m.s.n.m., metamorfozada en diversos sitios. Debido a su ubicación geográfica, tiene una cubierta de vegetación espesa, contando con la presencia de buenos afloramientos únicamente en las partes bajas de quebradas y ríos. En la parte alta se encuentran brechas y tabas, estimando una potencia de 3.000 m. en el sector y recubierta parcialmente por volcánicos ácidos de la Formación Tarqui. (Bristow & Hoffstetter, 1977)

2.1.7.3. Geomorfología.

El proyecto minero Río Blanco se localiza en la parte austral de la Cordillera Occidental, mayormente la morfología del área es dominada por una particular y amplia meseta de altura, más conocida como los “páramos del Cajas”. Su relieve es muy diversificado a consecuencia de la complejidad de la morfogénesis que presenta la cordillera de los Andes, cuando emergió a finales del Cretáceo y que luego sufrió los efectos de sedimentación en las cuencas que se encontraban aisladas, un fuerte volcanismo durante el periodo Terciario, los efectos de las glaciaciones cuaternarias y la intensa actividad tectónica que ha dado como consecuencia un compleja estructura morfológica en colinas, morfología aplanada, escarpes de ángulo alto y finalmente los efectos del rejuvenecimiento morfológico actual de los ríos y sus afluentes. (Villota, 1997)

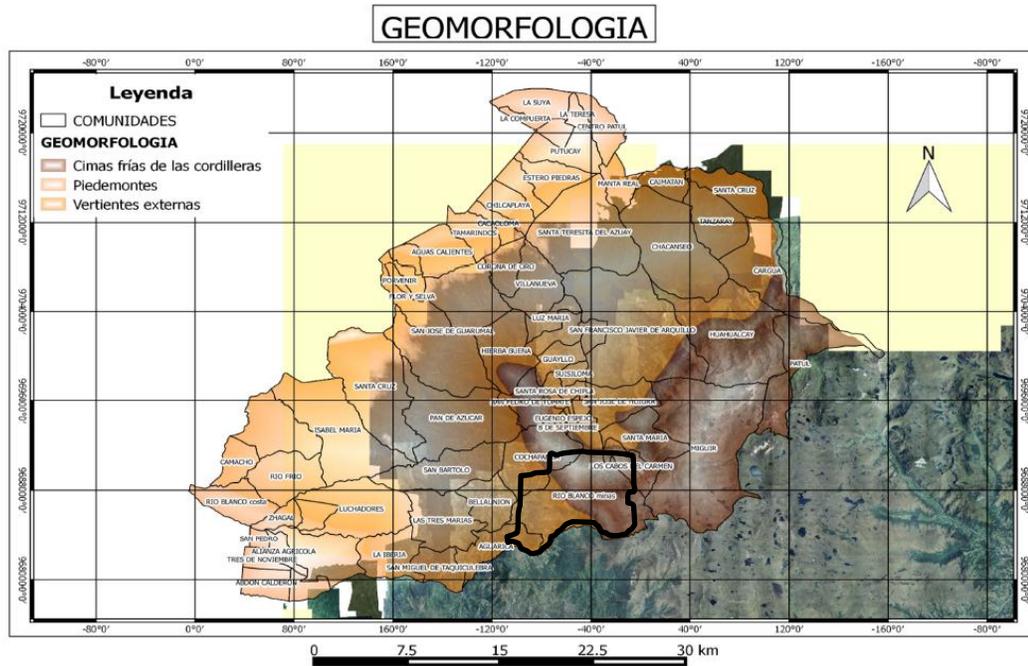


Figura 8. Geomorfología del Proyecto minero Río Blanco

Fuente (MAE, 2013).

CAPITULO 3

DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN

El presente trabajo pretende realizar la predicción de la generación de drenaje ácido minero, mediante la aplicación de test estáticos y cinéticos, usando material (rocas), los mismos que se obtuvieron del Proyecto Minero Río Blanco.

El material obtenido cuenta con una densidad de 2.43 gr/cm³ en un total de 10kg, los mismos que fueron sometidos a diferentes procesos que se detallan a continuación.

Mediante los test estáticos , se trata de reproducir los procesos y las condiciones de los lugares de mina que pueden generar acidez, analizando el potencial ácido (PA) y potencial de neutralización (PN) generado por los materiales a analizar, que en este caso serían tres: alimento, concentrado y relave.

Los valores obtenidos permitirán realizar una clasificación primaria de los materiales, de acuerdo a su capacidad de generadora de ácido. Los análisis de PA y PN se efectuaron mediante titulación potenciométrica, en el laboratorio de química de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay.

Para los test dinámicos se elaboraron las columnas de lixiviación con el material óptimo, se controlará semanalmente los parámetros químicos de lixiviados como el pH y conductividad eléctrica, permitiendo determinar la calidad del agua de drenaje y su variación en el tiempo, mediante procesos de meteorización similares a los que están expuestos en la vida real, los cuáles nos permitirán analizar el comportamiento del pH, Eh y conductividad.

3.1. Preparación de la muestra.

3.1.1. Preparación mecánica.

El material proveniente del yacimiento del proyecto minero "Río Blanco" fue sometido a una serie de procesos de preparación mecánica, pasando en primera instancia por la trituradora de rodillos para reducir considerablemente su tamaño, seguido de la trituradora de rodillos y finalmente por el molino de bolas, obteniendo como resultado un material muy fino de un tamaño alrededor a 0.3 pulgadas.



Figura 9. Trituradora de mandíbulas



Figura 10. Molino de bolas

3.1.2. Tamizaje.

El tamizado es un método de separación de partículas que se basa solamente en el tamaño de las mismas. En el tamizado se vierten los sólidos sobre una superficie perforada o tamiz, que deja pasar las partículas pequeñas o “finos”, y retiene las de tamaños superiores o “no deseables”. El tamaño de las partículas del mineral es de mucha importancia para el proceso de flotación, ya que interviene de forma directa en la recuperación del mineral valioso.

Cuando se opera con valores extremadamente pequeños, la eficiencia del proceso de flotación se ve impactada negativamente, con tamaños de partículas muy finas alrededor de (250 μm), siendo deficiente la recuperación de los minerales de interés.

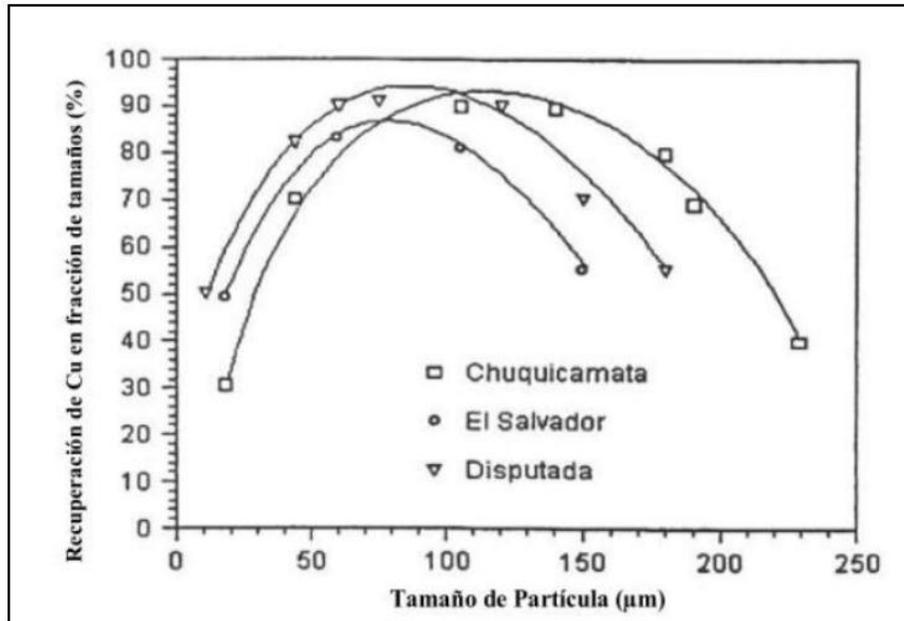


Figura 11. Recuperación de cobre en varias granulometrías de diferentes plantas concentradoras

Fuente (Concha, 2015)

En el gráfico anterior podemos apreciar la curva granulométrica que hace referencia al tamaño de partícula vs el porcentaje de recuperación de tres empresas mineras que han aplicado diferentes tamaños de partículas minerales para el proceso de flotación, logrando mayor efectividad de recuperación en el proceso con un tamaño de partículas de (100µm).

Por esta razón es necesario que el material sea necesariamente muy fino, en este caso se trabajó con el material que pasa por la malla #100 (150 µm), de esta manera todo el material que se obtuvo del proceso de trituración del molino de bolas fue sometido al tamizaje, para asegurarnos que el material obtenido cumple con los requerimientos necesarios para poder ser utilizado de manera eficiente en el proceso de flotación.



Figura 12. Agitador Ro-Top

3.1.3. Flotación.

La flotación mediante espumas es un proceso de tipo físico – químico que se da por la concentración de minerales finamente molidos, donde su proceso comprende el tratamiento químico de una pulpa mineral, con el fin de generar ciertas condiciones favorables para la adhesión de algunas partículas que contienen el mineral de interés a las burbujas de aire. El principal objetivo es la separación de especies minerales, aprovechando sus propiedades de afinidad (hidrofílicas) o de repulsión (hidrofóbicas) por el agua. Las especies valiosas o útiles constituyen una fracción menor del mineral, mientras que las especies no valiosas o estériles son las que constituyen la mayor parte.

Songor Carrión 34

El proceso de flotación de minerales proveniente del material del proyecto Río Blanco, se lo realizó en una celda tipo DENVER, la misma que se encuentra en el laboratorio de la escuela de Ingeniería en Minas donde se utilizó lo siguiente:

- ✓ 300 gr de material
- ✓ 450 cm³ de agua
- ✓ 3 gotas de Xantato Amílico de Potasio Z-6
- ✓ 2 gotas de espumante ER-370
- ✓ Tiempo total de flotación fue aproximadamente 13 minutos
- ✓ En cada ciclo de flotación se recuperaba aproximadamente:
 - 80 gr de concentrado en pulpa
 - 220 gr de relave en pulpa.



Figura 13. Celda de flotación DENVER

Songor Carrión 35

Mediante todo el proceso de flotación, se obtuvo aproximadamente 1000 gr de concentrado en pulpa y 2700 de relave en pulpa, el cuál fue sometido a un proceso de secado durante 5 días.



Figura 14. Productos de la flotación de minerales.



Figura 15. Secado del material proveniente de flotación.

Una vez que el material de concentrado estuvo seco, se realizó la homogenización del material, para ser colocado en las columnas de lixiviación.



Figura 16. Homogenización del material

Luego de que el material que va a ser analizado ha pasado por una serie de procesos, el siguiente paso es la realización de los test estáticos y test dinámicos de las muestras.

3.2. Test Estáticos.

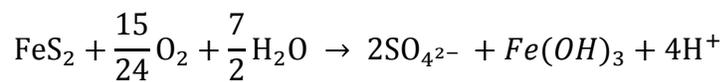
Los Test Estáticos nos dirigen al primer acercamiento para una correcta realización de la predicción del drenaje ácido de mina, donde se compara el potencial de generación de ácido de la muestra (PA) y el potencial de neutralización (PN). La medición de estas muestras se las realizará con un potenciómetro marca JENWAY modelo 3510 en los laboratorios de química de la Facultad de Ciencia y Tecnología.



Figura 17. Potenciómetro usado para realizar los análisis de PN y PA.

3.2.1. Potencial ácido.

Para la determinación del potencial ácido (PA) se obtiene el balance de la siguiente ecuación global:



Ecuación 7. Ecuación Global

Donde para cada mol de pirita equivale a 32.065 el peso molecular, sustituyendo tenemos: (2 x 32.065= 64.13 g de azufre) generados por protones equivalentes a (2 moles de ácido sulfúrico). Con estas consideraciones obtenemos que para neutralizar 2 moles de H₂SO₄ se necesita 2

moles de CaCO₃ (equivalente a 200 gr), teniendo como resultado el valor de potencial ácido en kg de CaCO₃ / tonelada de material. (Bahamóndez, 2012)

$$PA = 31,25 * \% \text{ Sulfuro}$$

Ecuación 8. Formula del potencial ácido

El sulfuro presente en cada una de las muestras analizadas es el siguiente cuadro:

Tabla 3. Potencial ácido

| | % Sulfuro | Potencial ácido |
|-------------|-----------|-----------------|
| Alimento | 2,1162 | 66,13125 |
| Concentrado | 4,5782 | 143,06875 |
| Relave | 1,9403 | 60,63437 |

3.2.2. Potencial de Neutralización.

Para el análisis del potencial de neutralización, fue necesario realizar las pruebas por duplicado, donde se hicieron 2 tipos de pruebas para cada material de alimento, concentrado y relave, dando un total de 6 muestras analizadas, preparadas en un Erlenmeyer con los siguientes valores:

- ✓ 10 gramos de la muestra.
- ✓ 100 ml de agua destilada.

El peso de la muestra seleccionada es obtenido mediante la diferencia de pesos en la balanza analítica, para obtener de una manera más exacta los valores de cada una de las muestras como se indica a continuación:

Tabla 4. Peso exacto de la muestra selecciona para determinación de PN

| | Alimento 1 | Alimento 2 | Concentrado 1 | Concentrado 2 | Relave 1 | Relave 2 |
|--|------------|------------|---------------|---------------|----------|----------|
| Peso vacío (gr) | 121,3425 | 122,4352 | 120,8886 | 122,7749 | 121,9711 | 123,5781 |
| Peso lleno (gr) | 131,3825 | 132,5052 | 130,9486 | 132,7949 | 132,0211 | 133,6081 |
| Diferencia de peso de la muestra (gr) | 10,04 | 10,07 | 10,06 | 10,02 | 10,05 | 10,03 |

Luego de que la solución reposara durante un lapso aproximado de 15 horas, se procedió a realizar la filtración y aforar a 100 ml de agua destilada, seguidamente ésta fue sometida a un proceso de agitación en la máquina centrifugadora modelo CENTRIFUGE 5804, donde al transcurrir 6 minutos se realizó la titulación con ácido clorhídrico (HCl), añadiendo 0,1 ml de ácido hasta lograr obtener un pH cercano a 3,5.



Figura 18. Titulación con ácido clorhídrico.

Los valores que se obtuvieron de la medición del pH al momento de realizar la titulación potenciométrica se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 5. Comportamiento del pH al agregar ácido clorhídrico

| Volumen de titulación HCl (ml) | pH | | | | | |
|--------------------------------|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------|-------------|
| | Alimento 1 | Alimento 2 | Concentrado 1 | Concentrado 2 | Relave 1 | Relave 2 |
| 0 | 6.73 | 6.67 | 7.18 | 7.16 | 7.12 | 7.09 |
| 0,1 | 6.24 | 6.16 | 6.98 | 6.94 | 6.64 | 6.63 |
| 0,2 | 6.09 | 6.02 | 6.41 | 6.48 | 6.42 | 6.43 |
| 0,3 | 5.45 | 5.39 | 6.05 | 6.11 | 6.15 | 6.17 |
| 0,4 | 4.37 | 4.31 | 5.74 | 5.79 | 5.91 | 5.94 |
| 0,5 | 3.84 | 3.77 | 5.11 | 5.06 | 5.42 | 5.44 |
| 0,6 | 3.70 | 3.64 | 4.56 | 4.52 | 4.93 | 4.95 |
| 0,7 | <u>3.46</u> | <u>3.44</u> | 3.95 | 3.93 | 4.07 | 4.10 |
| 0,8 | 3.39 | 3.36 | 3.67 | 3.64 | 3.68 | 3.70 |
| 0,9 | 3.26 | 3.25 | 3.59 | 3.61 | <u>3.54</u> | <u>3.56</u> |
| 1 | 3.23 | 3.21 | <u>3.53</u> | <u>3.55</u> | 3.43 | 3.45 |

Los valores que se encuentran subrayados, son los valores con los cuáles se realizará un promedio entre el mismo tipo de muestra.

Para tener una mejor idea de cómo se dan las reacciones de neutralización a lo largo de la curva de pH, se presenta a continuación la reacción de algunos minerales alcalinos y su rango de pH de amortiguación.

Tabla 6. Rango pH de amortiguación de algunos minerales consumidores de ácido que reaccionan estabilizando el pH

| | Nombre | Formula | pH de amortiguación |
|-------------------------|-------------------|--|---------------------|
| CARBONATOS | Calcita | CaCO ₃ | 5,5 – 6,9 |
| | Siderita | FeCO ₃ | 5,1 – 6,0 |
| | Malaquita | Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂ | 5,1 – 6,0 |
| OXIDOS | Gibsita | Al(OH) ₃ | 3,7 – 4,3 |
| | Limonita/goethita | FeOOH | 3,0 – 3,7 |
| | Ferrihidrita | Fe(OH) ₃ | 2,8 – 3,0 |
| | Jarosita | KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ | 1,7 – 2,0 |
| ALUMINOSILICATOS | | | 0.5 – 1.5 |

Fuente: (Bahamóndez, 2012)

Con los valores obtenidos anteriormente en la titulación, se calcula el potencial de neutralización (PN) establecido de CaCO₃/t para cada muestra, utilizando la siguiente formula:

$$PN = \frac{V_{HCl} * N_{HCl} * eq(CaCO_3)}{\text{Peso de muestra (gr)}} * \frac{CaCO_3 (gr)}{\text{muestra (gr)}} * \frac{1000Kg}{1 ton}$$

Ecuación 9. Potencial de Neutralización de Kg CaCO₃/ton

En donde:

- V_{HCl} = Volumen de ácido (ml)
- N_{HCl} = Normalidad de HCl = 0.1187
- Eq. (CaCO₃) = Equivalente químico de carbonato de calcio= 50 eq. -g

Tabla 7. Potencial de Neutralización de Kg CaCO₃/ton

| POTENCIAL DE NEUTRALIZACIÓN (PN) de kg CaCO₃/ton de mineral | | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Alimento | | Concentrado | | Relave | |
| HCl | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 |
| 0,1 | 59,114 | 58,937 | 58,996 | 59,232 | 59,055 | 59,172 |
| 0,2 | 118,227 | 117,875 | 117,992 | 118,463 | 118,109 | 118,345 |
| 0,3 | 177,341 | 176,812 | 176,988 | 177,695 | 177,164 | 177,517 |
| 0,4 | 236,454 | 235,750 | 235,984 | 236,926 | 236,219 | 236,690 |
| 0,5 | 295,568 | 294,687 | 294,980 | 296,158 | 295,274 | 295,862 |
| 0,6 | 354,681 | 353,625 | 353,976 | 355,389 | 354,328 | 355,035 |
| 0,7 | 413,795 | 412,562 | 412,972 | 414,621 | 413,383 | 414,207 |
| 0,8 | 472,908 | 471,500 | 471,968 | 473,852 | 472,438 | 473,380 |
| 0,9 | 532,022 | 530,437 | 530,964 | 533,084 | 531,493 | 532,552 |
| 1 | 591,135 | 589,374 | 589,960 | 592,315 | 590,547 | 591,725 |

Obtenidos los resultados del valor requerido de CaCO_3 para neutralizar cada muestra, se debe tomar el dato del volumen de ácido clorhídrico obteniendo un pH de 3,5. Por cada muestra establecida se realizaron 2 análisis, tomando en consideración que el valor final de CaCO_3 a utilizar, será el promedio entre los 2 ensayos realizados, siendo éstos los que equivaldrán al valor del Potencial de Neutralización (PN) de cada muestra.

Tabla 8. Valores finales del Potencial de Neutralización en kg de CaCO_3/ton

| Muestra | POTENCIAL DE NEUTRALIZACIÓN (PN) de kg CaCO_3/ton |
|----------------|---|
| Alimento | 413,178 |
| Concentrado | 591,138 |
| Relave | 532,0225 |

3.3. Test Dinámicos

Comprenden una Celda Húmeda que acelera la tasa de meteorización en estado natural de una muestra rocosa, diagnosticando los resultados que puedan ser producidos. Los ensayos dinámicos sirven para confirmar los resultados obtenidos de los ensayos estáticos, determinando las velocidades con las que se genera la acidez, la oxidación de sulfuros, la neutralización y para determinar los parámetros y técnicas de control/tratamiento. (García, 1998)

3.3.1. Infraestructura de las columnas de lixiviación.

3.3.1.1. Diseño de la estructura.

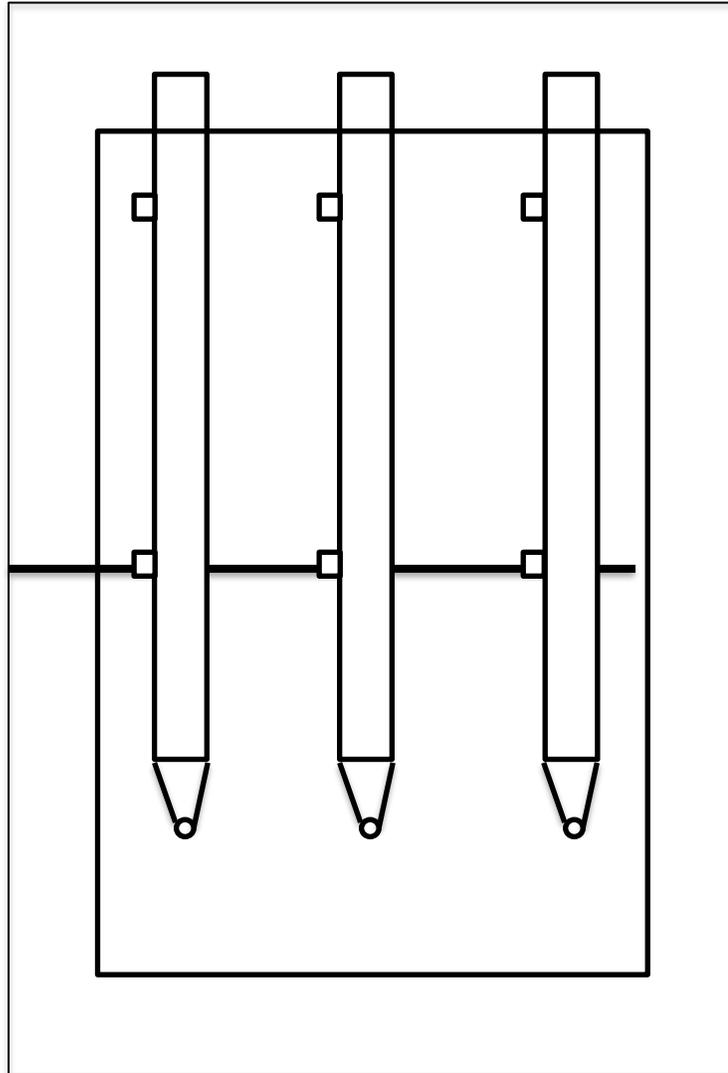


Figura 19. Diseño de columnas de lixiviación.

Las columnas de lixiviación donde se va a colocar el material minero proveniente del Proyecto Río blanco, está conformada por 3 tubos de PVC, con un longitud de 1.20 m y un diámetro de

1", colocadas verticalmente sobre una base de hierro móvil de forma cúbica de 2 m de altura por 0.6 m de ancho.

3.3.2. Construcción de las columnas de lixiviación.

Para este experimento se usará tubos de PVC (policloruro de vinilo) para las columnas de lixiviación, por ser un plástico muy resistente, cada columna consta de 3 puntos para la toma de muestras a ser analizadas periódicamente, distribuidos a lo largo de la columna; al inicio, en la mitad y al final del tubo, adecuado con llaves de paso que facilitan la toma de muestras.



Figura 20. Construcción de columnas de lixiviación.



Figura 21. Columnas de lixiviación.

3.3.3. Dosificación en las columnas de lixiviación.

El experimento de la predicción de drenaje ácido será realizado en tres columnas de lixiviación, con una dosificación igual para las 3, en las que estarán los materiales de alimento, concentrado y relave distribuido de la siguiente forma:

- En la parte inferior y al fondo de la columna de lixiviación, una malla para la filtración únicamente del agua drenada.
- 600 gr de material grueso
- 400 gr de material fino, pasante por la malla #100, (alimento, concentrado y relave).
- 2500 ml de agua

El material grueso es mezclado con el material fino, de esta manera facilitará la permeabilidad del agua, con el fin de que no se produzca ningún tipo de obstrucciones.



Figura 22. Material grueso.



Figura 23. Mezcla de material grueso y fino.



Figura 24. Llenado de columnas de lixiviación.

3.4. Medición de pH y conductividad.

Las mediciones de pH y conductividad fueron realizadas con el fin de verificar si el agua de las muestras generan acidez y en que lapso de tiempo se producirá dicho proceso, las mediciones se empezaron a realizar una semana después que las columnas de lixiviación fueron cargadas con el material expuesto a ser analizado, durante un periodo de 162 días.

3.4.1. Medición de pH

Mediante la medición del pH podemos establecer el nivel de acidez o nivel de alcalinidad de alguna sustancia, contiene una escala numérica que nos permite medir la acidez o basicidad de la misma. Las mediciones de pH se realizaron con un potenciómetro marca OAKTON, situado en el laboratorio de química de la facultad de Ciencia y Tecnología en la Universidad del Azuay, donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 9. Medición de pH

| MEDICIÓN DE pH | | | | | |
|----------------|----------------------------------|------|----------|-------------|--------|
| Muestra | Fecha | Días | Alimento | Concentrado | Relave |
| 1 | Martes, 16 de Abril de 2019 | 1 | 6,59 | 7,12 | 7,05 |
| 2 | Miércoles, 24 de Abril de 2019 | 9 | 6,48 | 7,06 | 7,01 |
| 3 | Jueves , 02 de Mayo de 2019 | 17 | 6,33 | 7,02 | 6,94 |
| 4 | Jueves, 09 de Mayo de 2019 | 24 | 6,29 | 6,98 | 6,87 |
| 5 | Viernes, 17 de Mayo de 2019 | 32 | 6,21 | 6,88 | 6,79 |
| 6 | Jueves 30 de Mayo de 2019 | 45 | 6,3 | 7,28 | 6,71 |
| 7 | Miércoles, 19 de Junio de 2019 | 65 | 6,65 | 7,26 | 7,04 |
| 8 | Lunes, 24 de Junio de 2019 | 70 | 6,68 | 7,22 | 7,07 |
| 9 | Viernes, 28 de junio de 2019 | 74 | 6,73 | 7,14 | 7,15 |
| 10 | Miércoles, 03 de Julio de 2019 | 79 | 6,79 | 7,12 | 7,09 |
| 11 | Jueves, 11 de Julio de 2019 | 87 | 6,77 | 7,07 | 7,21 |
| 12 | Viernes, 19 de Julio de 2019 | 95 | 6,63 | 7,09 | 7,06 |
| 13 | Martes, 23 de Julio de 2019 | 99 | 6,61 | 7,11 | 7,01 |
| 14 | Viernes, 02 de Agosto de 2019 | 109 | 6,55 | 7,07 | 6,98 |
| 15 | Lunes, 16 de Septiembre de 2019 | 154 | 6,45 | 6,84 | 6,92 |
| 16 | Martes, 24 de Septiembre de 2019 | 162 | 6,43 | 6,62 | 6,87 |



Figura 25. Medición de pH.

3.4.2. Conductividad

Con este parámetro se pudo determinar la calidad del agua, obteniendo la información necesaria sobre la presencia de minerales, las mediciones fueron realizadas en el laboratorio de química de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay, con un conductímetro de marca BOECO, obteniendo los siguientes valores.

Tabla 10. : Datos conductividad.

| CONDUCTIVIDAD μs | | | | | |
|-----------------------------|----------------------------------|------|----------|-------------|--------|
| Muestra | Fecha | Días | Alimento | Concentrado | Relave |
| 1 | Martes, 16 de Abril de 2019 | 1 | 745 | 569 | 456 |
| 2 | Miércoles, 24 de Abril de 2019 | 9 | 681 | 531 | 438 |
| 3 | Jueves , 02 de Mayo de 2019 | 17 | 598 | 487 | 451 |
| 4 | Jueves, 09 de Mayo de 2019 | 24 | 632 | 503 | 528 |
| 5 | Viernes, 17 de Mayo de 2019 | 32 | 657 | 519 | 560 |
| 6 | Jueves 30 de Mayo de 2019 | 45 | 539 | 490 | 473 |
| 7 | Miércoles, 19 de Junio de 2019 | 65 | 316 | 506 | 499 |
| 8 | Lunes, 24 de Junio de 2019 | 70 | 671 | 469 | 473 |
| 9 | Viernes, 28 de junio de 2019 | 74 | 586 | 533 | 421 |
| 10 | Miércoles, 03 de Julio de 2019 | 79 | 565 | 518 | 450 |
| 11 | Jueves, 11 de Julio de 2019 | 87 | 253 | 454 | 452 |
| 12 | Viernes, 19 de Julio de 2019 | 95 | 621 | 511 | 415 |
| 13 | Martes, 23 de Julio de 2019 | 99 | 642 | 480 | 396 |
| 14 | Viernes, 02 de Agosto de 2019 | 109 | 615 | 503 | 435 |
| 15 | Lunes, 16 de Septiembre de 2019 | 154 | 684 | 528 | 418 |
| 16 | Martes, 24 de Septiembre de 2019 | 162 | 634 | 512 | 408 |



Figura 26. Medición de la conductividad.

3.4.3. Cálculo Eh (potencial de oxidación).

Para el cálculo de Eh se utilizará la siguiente fórmula:

$$Eh = 1.23 - 0.59pH$$

Ecuación 10. : Cálculo de Eh.

Tabla 11. Datos de Eh.

| CÁLCULO DE Eh | | | | | |
|---------------|----------------------------------|------|----------|-------------|---------|
| Muestra | Fecha | Días | Alimento | Concentrado | Relave |
| 1 | Martes, 16 de Abril de 2019 | 1 | 0,84119 | 0,80992 | 0,80933 |
| 2 | Miércoles, 24 de Abril de 2019 | 9 | 0,84768 | 0,81346 | 0,81641 |
| 3 | Jueves , 02 de Mayo de 2019 | 17 | 0,85653 | 0,81582 | 0,82054 |
| 4 | Jueves, 09 de Mayo de 2019 | 24 | 0,85889 | 0,81818 | 0,82467 |
| 5 | Viernes, 17 de Mayo de 2019 | 32 | 0,86361 | 0,82408 | 0,82939 |
| 6 | Jueves 30 de Mayo de 2019 | 45 | 0,8583 | 0,80048 | 0,83411 |
| 7 | Miércoles, 19 de Junio de 2019 | 65 | 0,83765 | 0,80166 | 0,81464 |
| 8 | Lunes, 24 de Junio de 2019 | 70 | 0,83588 | 0,80402 | 0,81287 |
| 9 | Viernes, 28 de junio de 2019 | 74 | 0,83293 | 0,80874 | 0,80815 |
| 10 | Miércoles, 03 de Julio de 2019 | 79 | 0,82939 | 0,80992 | 0,81169 |
| 11 | Jueves, 11 de Julio de 2019 | 87 | 0,83057 | 0,81287 | 0,80461 |
| 12 | Viernes, 19 de Julio de 2019 | 95 | 0,83883 | 0,81169 | 0,81346 |
| 13 | Martes, 23 de Julio de 2019 | 99 | 0,84001 | 0,81051 | 0,81641 |
| 14 | Viernes, 02 de Agosto de 2019 | 109 | 0,84355 | 0,81287 | 0,81818 |
| 15 | Lunes, 16 de Septiembre de 2019 | 154 | 0,84945 | 0,82644 | 0,82172 |
| 16 | Martes, 24 de Septiembre de 2019 | 162 | 0,85063 | 0,83942 | 0,82467 |

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Para la elaboración de los test estáticos, se realizó las pruebas de consumo de ácido de las muestras en un volumen determinado, con el fin de obtener los datos acerca del potencial de neutralización, presentado en diagramas con relación al pH, mientras que para los test dinámicos se realizaron diagramas para indicar el comportamiento del pH, conductividad y Eh, realizando dichos test para los materiales de alimento, concentrado y relave de las muestras seleccionadas anteriormente.

4.1. Test estáticos.

4.1.1. Potencial de neutralización (PN)

El volumen de ácido agregado es el componente principal para la variación del pH, como se puede observar en las diferentes curvas de volumen representadas en los diagramas (Figuras 27- 32), adicionado el HCl (0,1 N) vs pH, observando su variación para cada una de las muestras.

Conforme el pH va disminuyendo debido a la adición de ácido clorhídrico, los minerales alcalinos que se encuentran presentes, reaccionan en las muestras experimentadas manteniendo el pH relativamente constante; pero cuando el proceso termine agotando los minerales que consumen ácido, el pH continuará su disminución hasta llegar a su valor aproximado de 3,5.

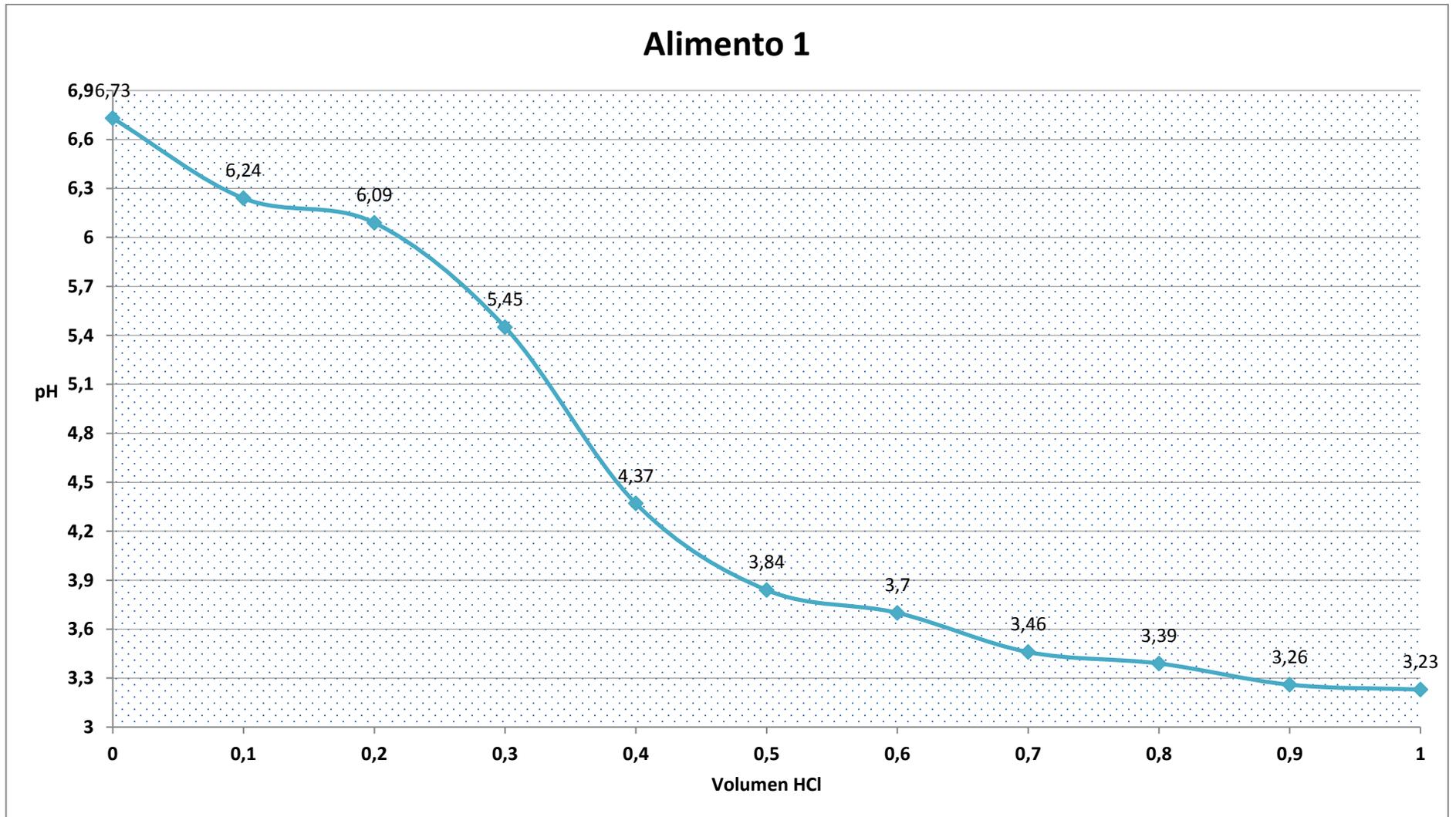


Figura 27. Variación de pH generada por adición de HCl (Alimento 1).

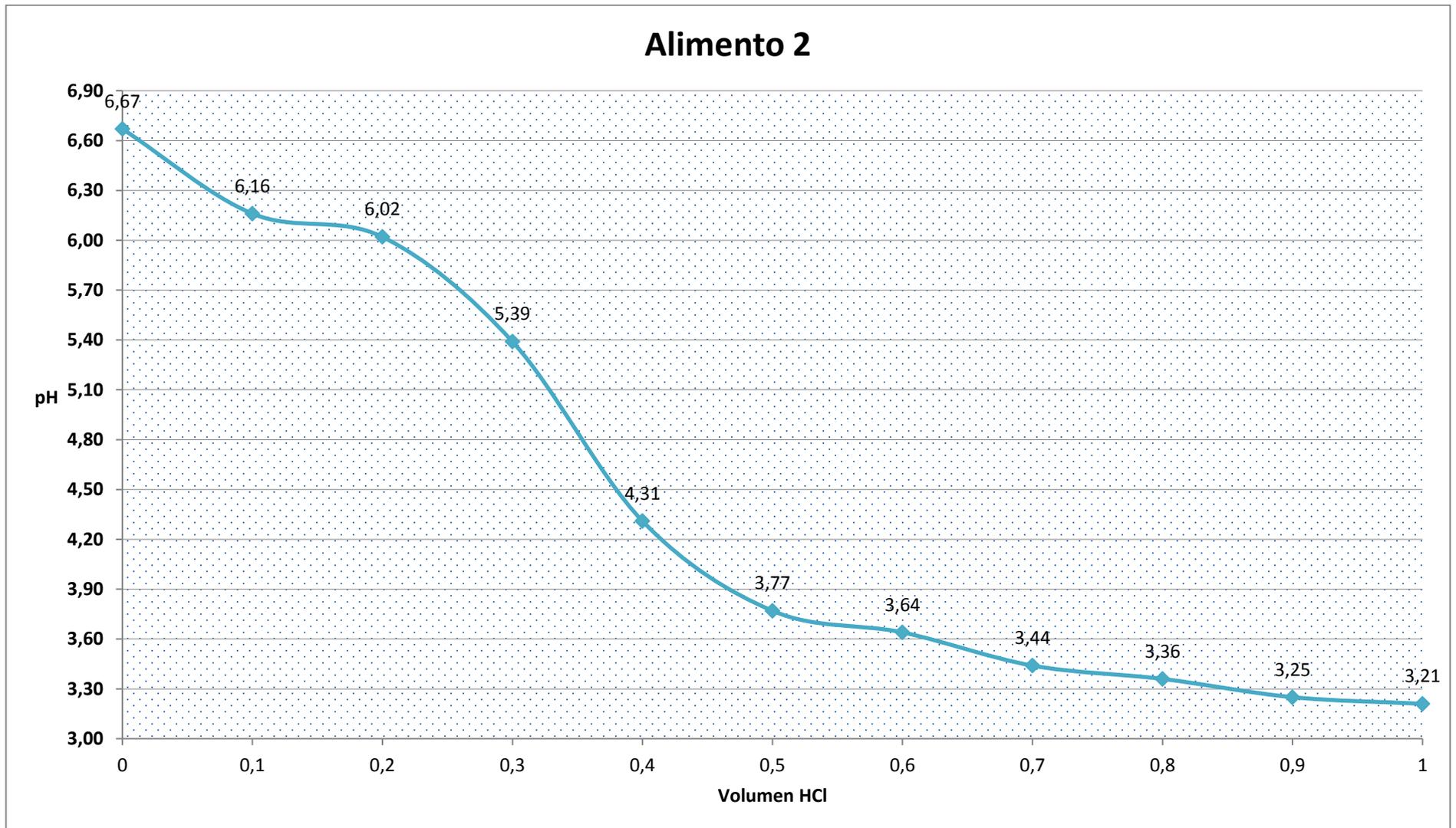


Figura 28. Variación de pH generada por adición de HCl (Alimento 2).

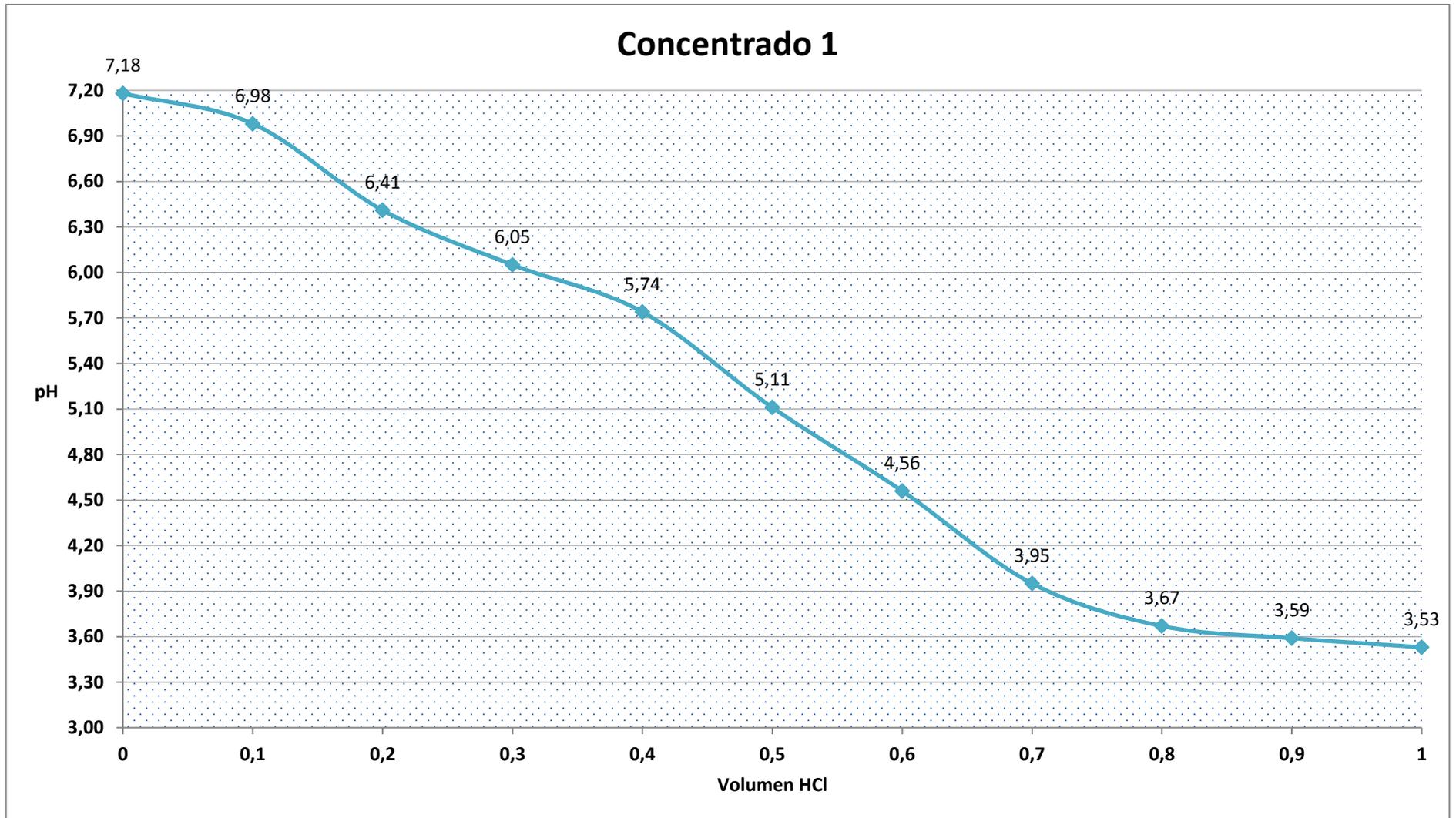


Figura 29. Variación de pH generada por adición de HCl (Concentrado 1).

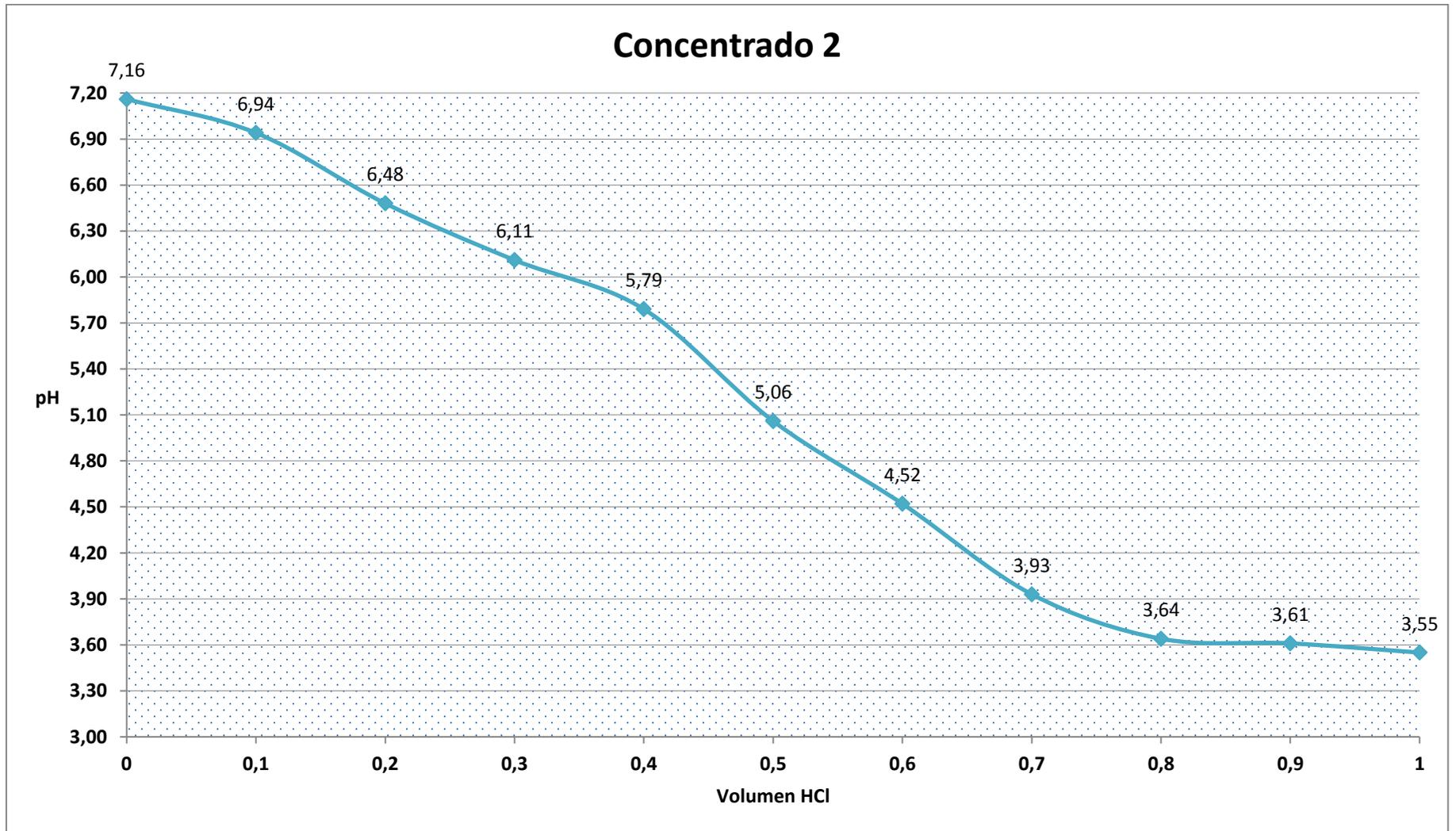


Figura 30. Variación de pH generada por adición de HCl (Concentrado 2).

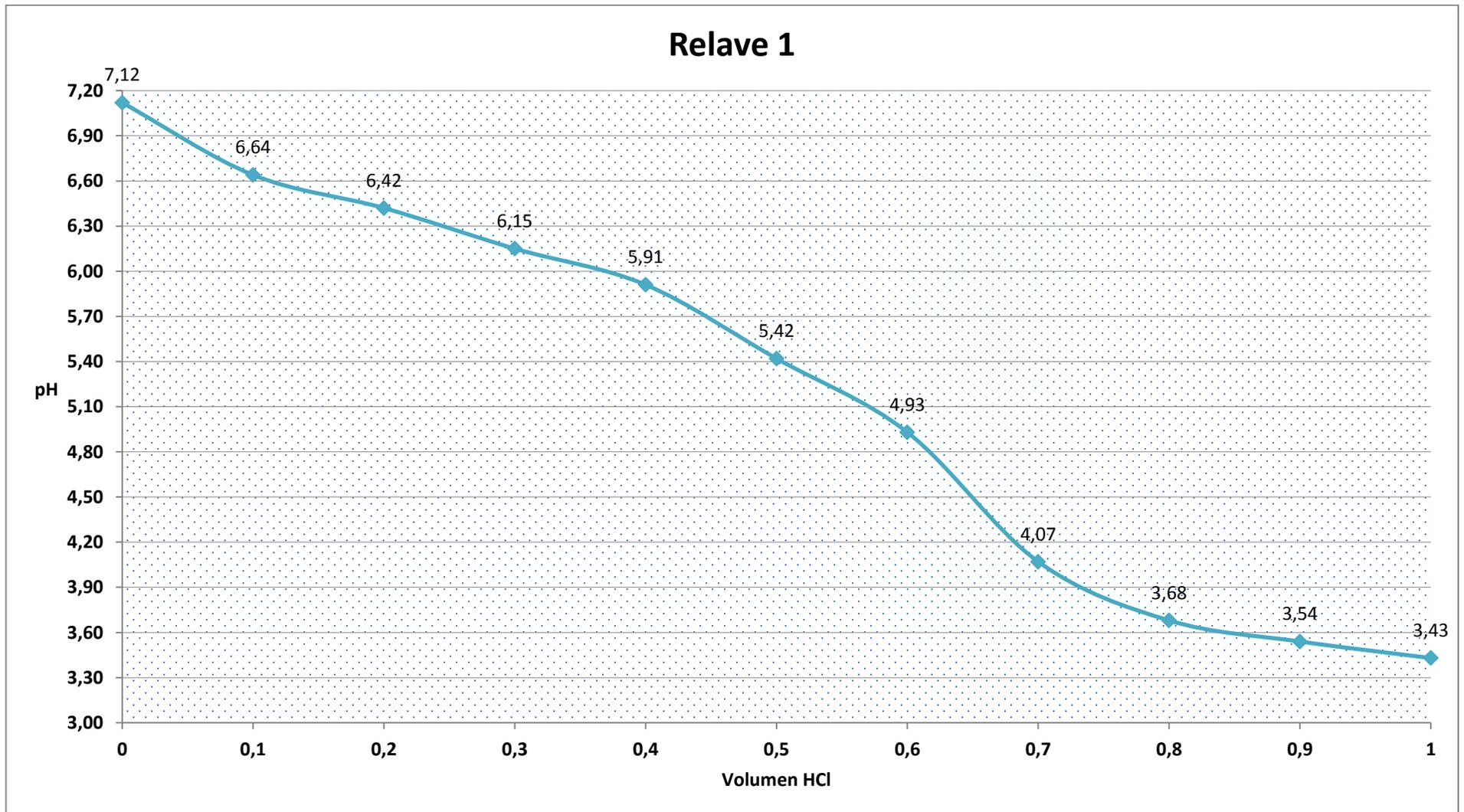


Figura 31. Variación de pH generada por adición de HCl (Relave 1).

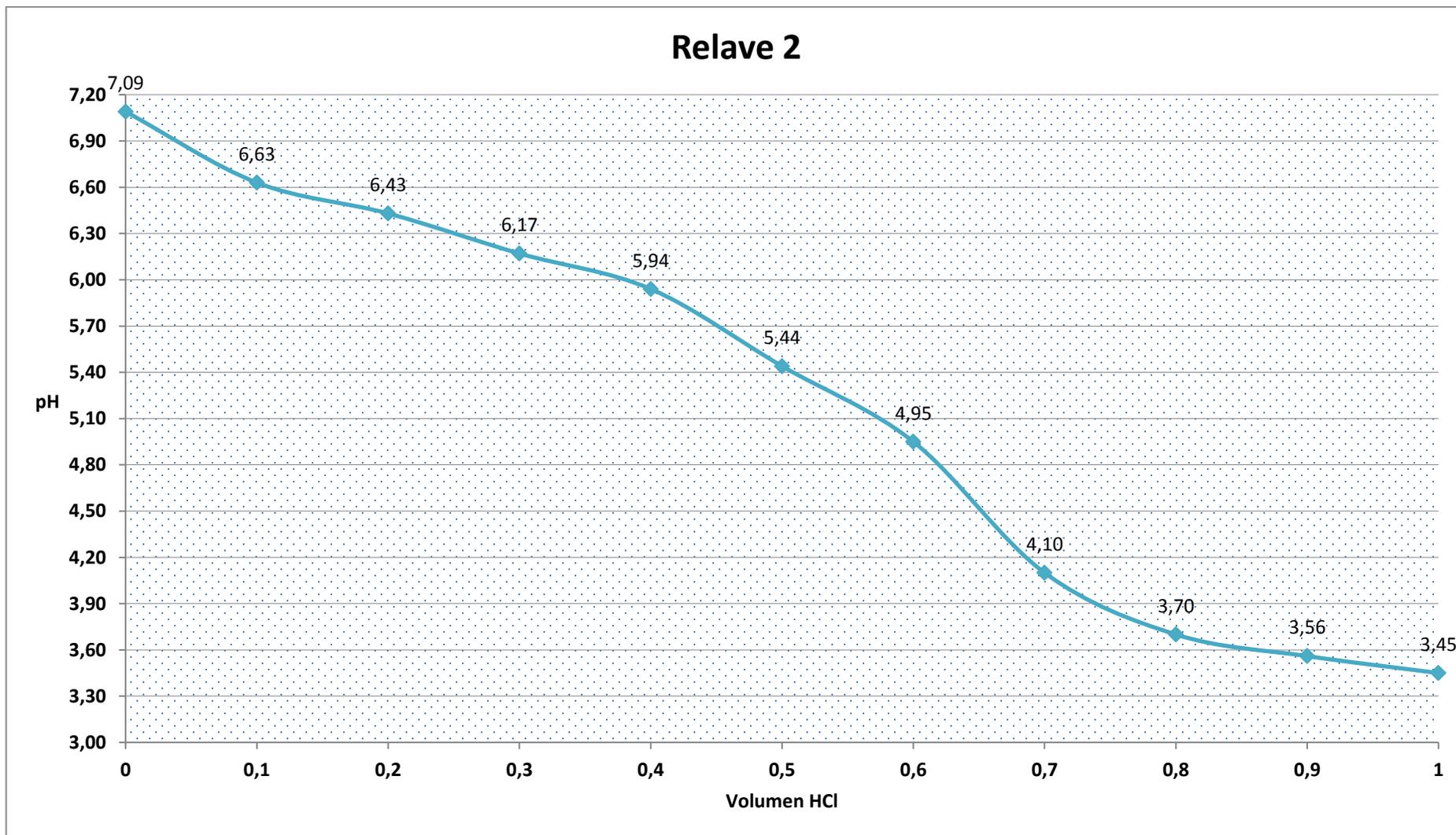


Figura 32. Variación de pH generada por adición de HCl (Relave 2).

De estos diagramas podemos deducir que durante la adición del ácido clorhídrico (HCl), los minerales alcalinos presentes en las muestras reaccionan frente al ácido, manteniendo el pH constante; cuando los minerales consumidores de ácido han sido agotados, el pH continúa con su descenso hasta el fin del experimento con un valor de 3,5.

4.1.2. Potencial ácido (PA).

Tabla 12. Potencial ácido

| | % Sulfuro | Potencial ácido |
|-------------|-----------|-----------------|
| Alimento | 2,1162 | 66,13125 |
| Concentrado | 4,5782 | 143,06875 |
| Relave | 1,9403 | 60,63437 |

4.1.3. Potencial de Neutralización Neto (PNN)

Con los valores obtenidos del potencial de neutralización (PN) y potencial de generación ácido (PA), calculamos el potencial de neutralización neto (PNN) el cual nos indica si las muestras analizadas son generadoras de drenaje ácido y en que magnitud contaminan al medio ambiente.

Tabla 13. Generadores de potencial de acidez

| Muestra | PN Kg CaCO3/t | PA Kg CaCO3/t | PNN Kg CaCO3/t | PN/PA | OBSERVACION |
|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|------------|--------------------------------|
| Alimento | 413,178 | 66,13125 | 347,04675 | 6,24784803 | Muestra no generadora de ácido |
| Concentrado | 591,138 | 143,06875 | 448,06925 | 4,1318457 | Muestra no generadora de ácido |
| Relave | 532,0225 | 60,63437 | 471,38813 | 8,77428 | Muestra no generadora de ácido |

La diferencia entre el PN – PA nos permite clasificar si las muestras son generadoras o no generadoras de ácido bajo los siguientes criterios:

- Cuando el PNN es mayor a 20 kg CaCO3/t, no se genera ácido.
- Si PNN es menor a 20 kg CaCO3/t, es potencial generador de ácido.

- El PNN está entre -20 y +20 kg CaCO₃/t, el potencial de generación ácido es incierto.

La razón dada entre PN y PA nos da un criterio más sobre la generación de drenaje ácido:

- Cuando la relación dada PN/PA es mayor a 2, se considera como no generadoras de ácido.
- Si PN/PA está entre el rango de 1 y 2, se clasifican como muestras inciertas, ya que existe la posibilidad de que puedan generar drenaje ácido de mina.
- En cambio cuando PN/PA presenta un valor menor a 1, son consideradas como generadores potenciales de drenaje ácido. (Bahamóndez, 2012).

Mediante la evaluación y análisis de estos dos métodos podemos determinar que las muestras analizadas de alimento, relave y concentrado no son generadores potenciales de drenaje ácido de mina. Los test estáticos cuentan con una gran ventaja en su ejecución ya que son de bajo costo y se los puede realizar en poco tiempo, permitiendo analizar una gran cantidad de muestras.

4.2. Test dinámicos

Este tipo de test es realizado consecutivamente de los test dinámicos, ya que sirven para confirmar que los datos analizados anteriormente se encuentran desarrollados correctamente, de esta manera podemos tener una idea más segura sobre las muestras que generan o no drenaje ácido.

El tiempo juega un papel muy importante, ya que influye directamente en la capacidad generadora de ácido entre los distintos materiales, demostrando que las muestras de alimento, concentrado y relave no son generadores potenciales de drenaje ácido, ya que en los tres ensayos el pH registrado más bajo es de 6.21 analizado durante un lapso de 162 días, teniendo en cuenta que existe la posibilidad de que un periodo de tiempo posterior al analizado, se den las condiciones óptimas para que se pueda generar la acidez, descendiendo el pH.

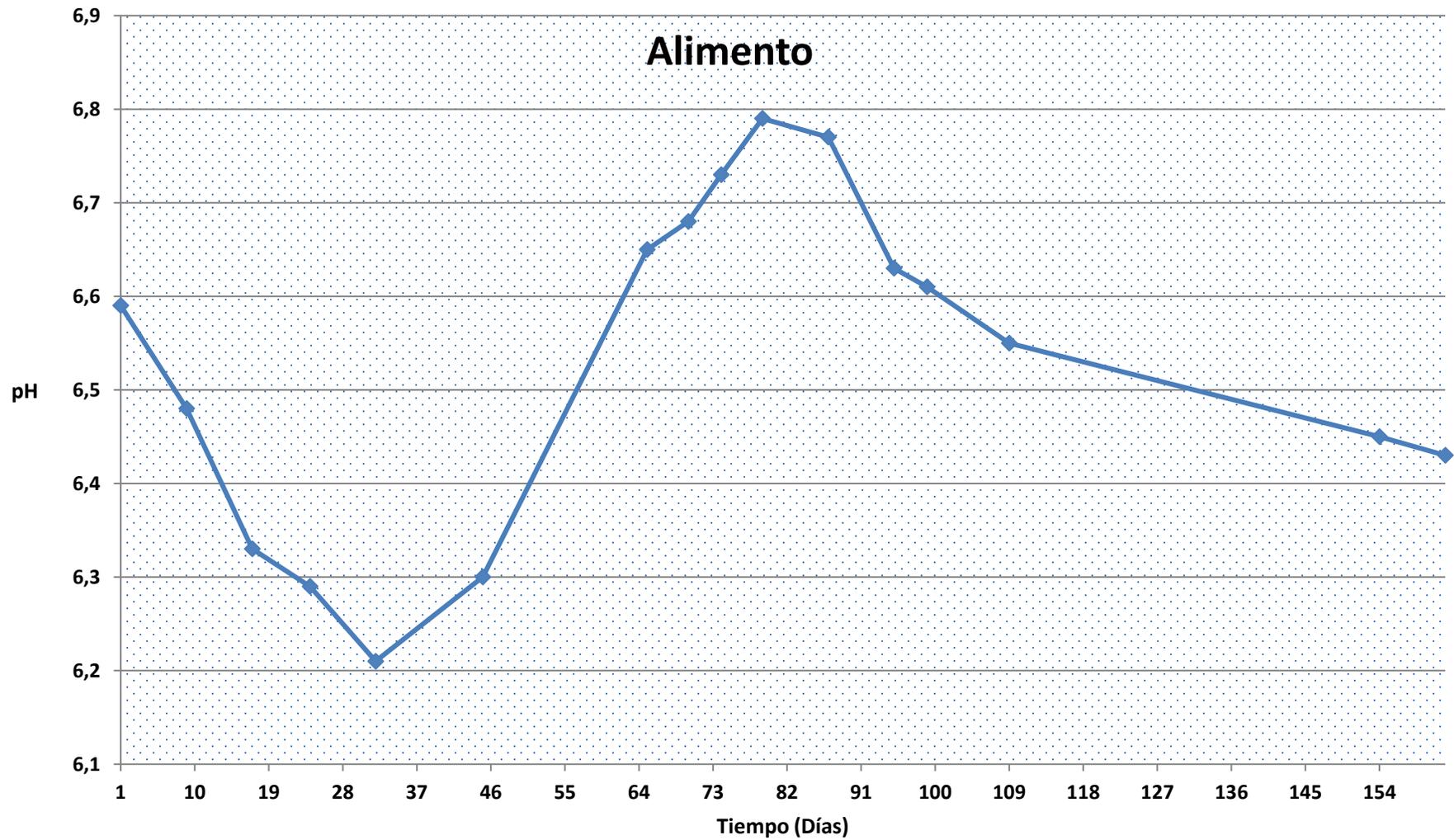


Figura 33. Comportamiento del pH en un lapso de tiempo determinado. (Alimento).

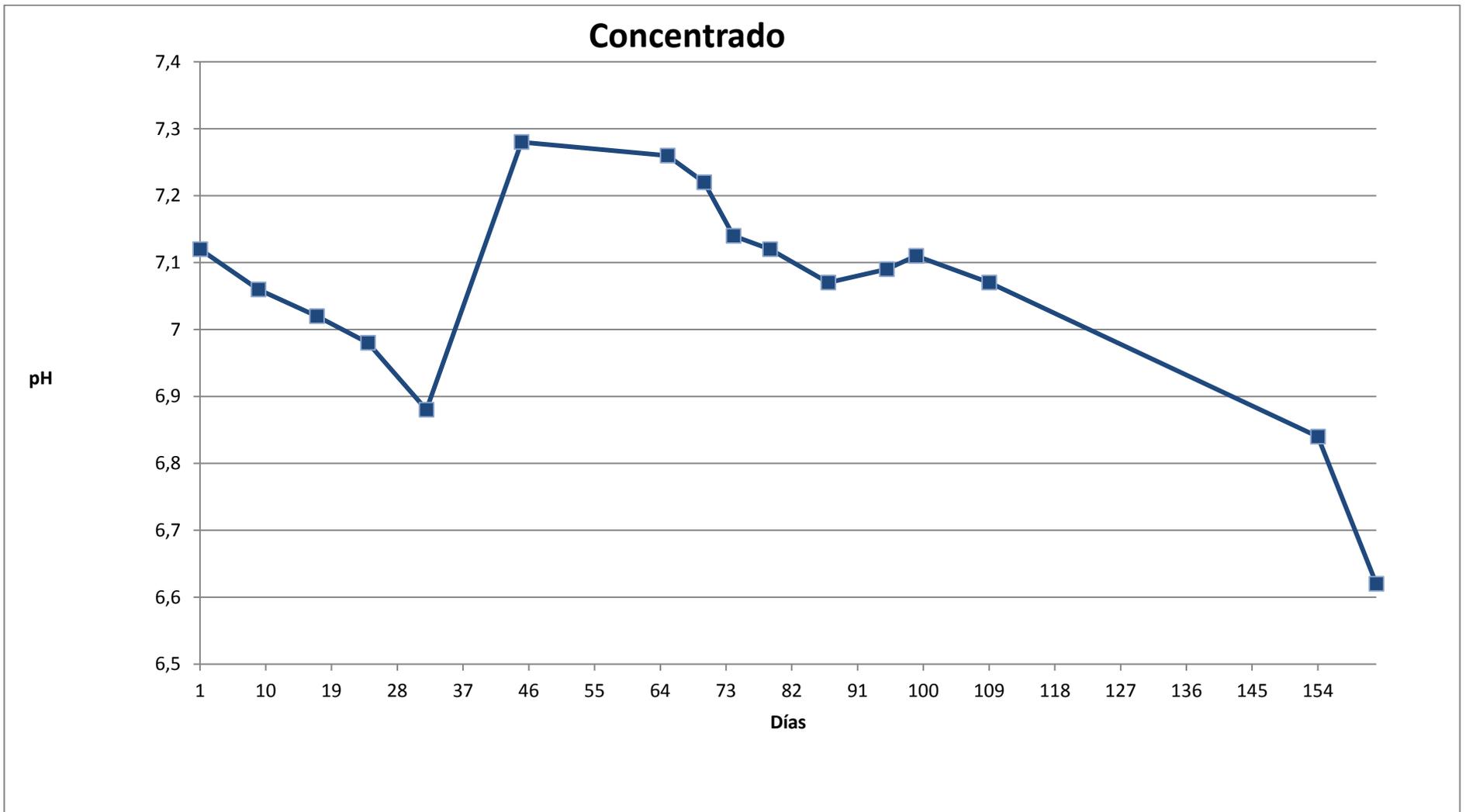


Figura 34. Comportamiento del pH en un lapso de tiempo determinado. (Concentrado).

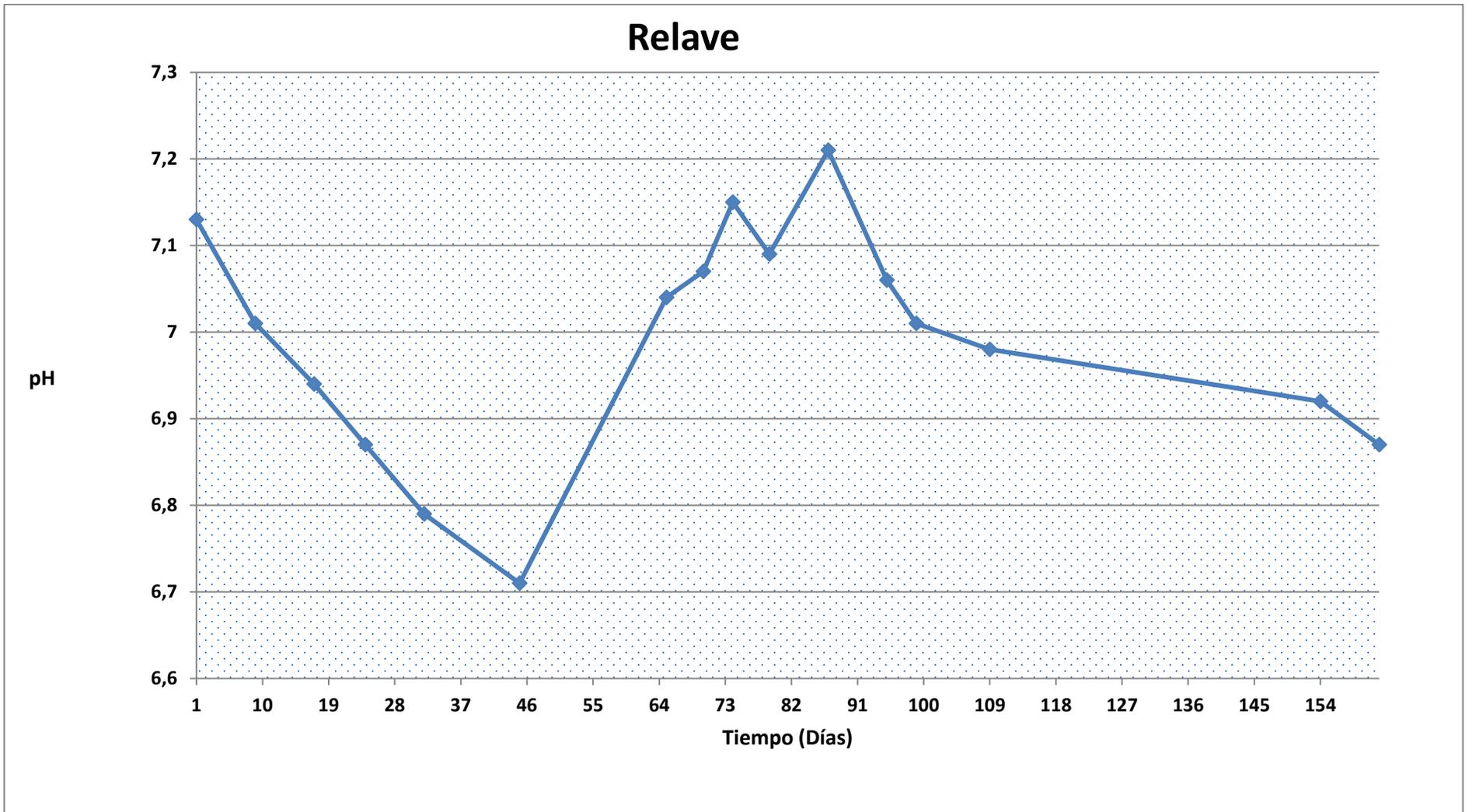


Figura 35. Comportamiento del pH en un lapso de tiempo determinado. (Relave).

4.2.1. Interpretación de curvas de pH

La curva que contiene los valores del pH analizadas del material de alimento, nos indica un leve descenso del pH hasta llegar al valor de 6.21 correspondiente al día 32 desde el inicio de su análisis, siendo el punto más bajo registrado del pH durante el lapso de tiempo que se analizaron las muestras, a partir de este valor el pH comienza su ascenso hasta llegar a 6.79 ubicado en el día 79, registrando este valor como el pico más alto, después de este tiempo el pH desciende lentamente manteniéndose relativamente constante en el punto medio entre los valores mencionados anteriormente.

Continuando con el análisis del pH de la segunda muestra que corresponde al concentrado, genera el descenso lentamente hasta el día 32 donde se registra un punto bajo de 6.88 y empieza a ascender su pH hasta alcanzar el punto más alto con un valor de 7.28 en el día 45, seguidamente disminuye lentamente en donde llega a su punto más bajo en el día 162 con un pH de 6.62.

Finalmente la curva pH para el material de relave, al igual que en los dos casos anteriores mantiene un descenso durante 45 días, siendo el punto más alto, continua su ascenso alcanzando el punto más alto de pH correspondiente a 7.21 en un lapso de tiempo de 87 días, donde empieza nuevamente a descender muy lento manteniéndose entre el punto medio de los dos valores.

Una vez que se ha obtenido las gráficas del pH, se realiza las gráficas de conductividad que se realizó el análisis conjuntamente, para poder determinar su comportamiento a lo largo del periodo de tiempo en que se realizaron las diferentes pruebas.

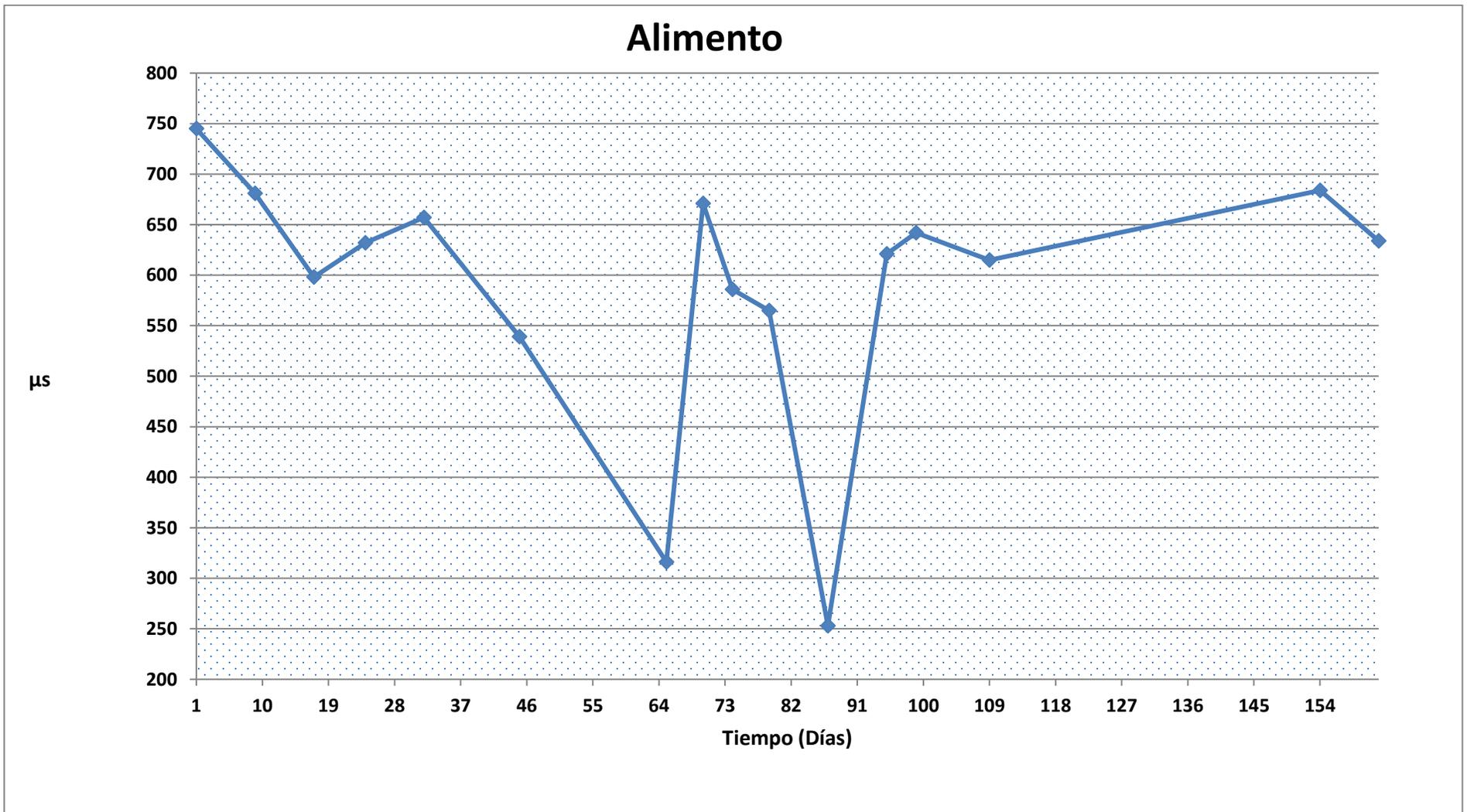


Figura 36. Comportamiento de la conductividad en un lapso de tiempo determinado. (Alimento)

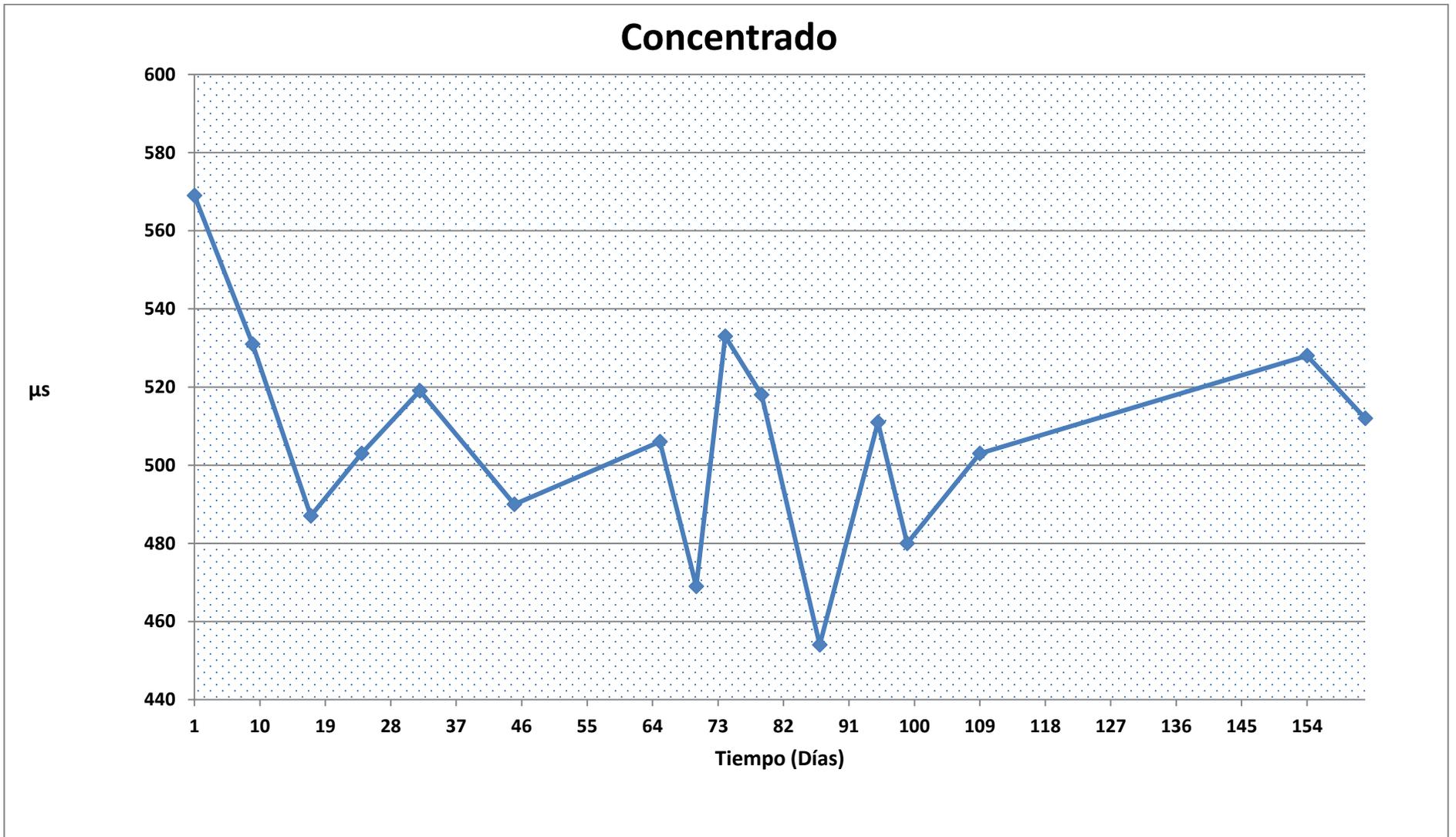


Figura 37. Comportamiento de la conductividad en un lapso de tiempo determinado. (Concentrado)

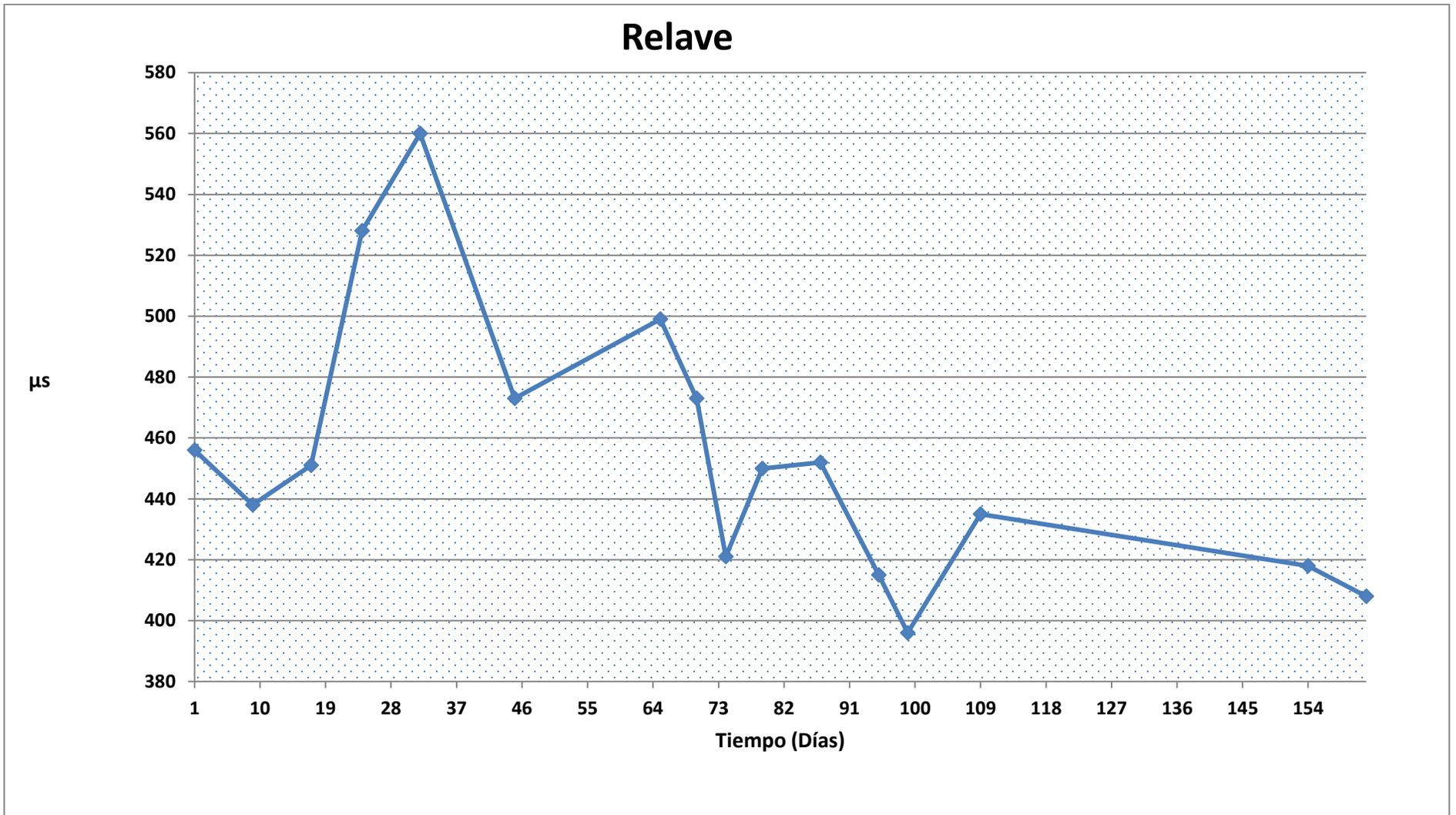


Figura 38. Comportamiento de la conductividad en un lapso de tiempo determinado. (Relave)

4.2.2. Interpretación de las Conductividad.

En el material de alimento, la curva de la conductividad inicia en el primer día con un valor de 745 μs , donde los valores empiezan a descender hasta llegar a un valor de 16 en el día 65 a partir de la fecha de inicio, seguidamente asciende hasta alcanzar el valor de 671 μs , a partir de este día desciende nuevamente hasta el día 87 con un valor de 253 μs siendo el punto más bajo obtenido, finalmente asciende hasta el punto de 642 en el día 99, desde entonces el valor de la conductividad se mantiene relativamente constante.

En segundo lugar la curva correspondiente al material de concentración empieza en el punto más alto de 745 μs obtenido durante el primer día y alcanzando su punto más bajo con un valor de 454 μs en el día 87, de ahí en adelante mantiene un valor constante intermedio entre los valores mencionados anteriormente, donde se dio fin al periodo de análisis de muestra.

Para finalizar el análisis e interpretación de las gráficas de conductividad, el material de relave inicia con un valor de 456 μs en el primer día, seguidamente comienza su ascenso hasta alcanzar el punto más alto con un valor de 560 μs establecido en día 32, a partir de ese punto empieza a bajar hasta registrar valores relativamente constantes con respecto a su inicio, presentando un valor estimado de 408 μs a lo largo del tiempo en que se realizó el análisis.

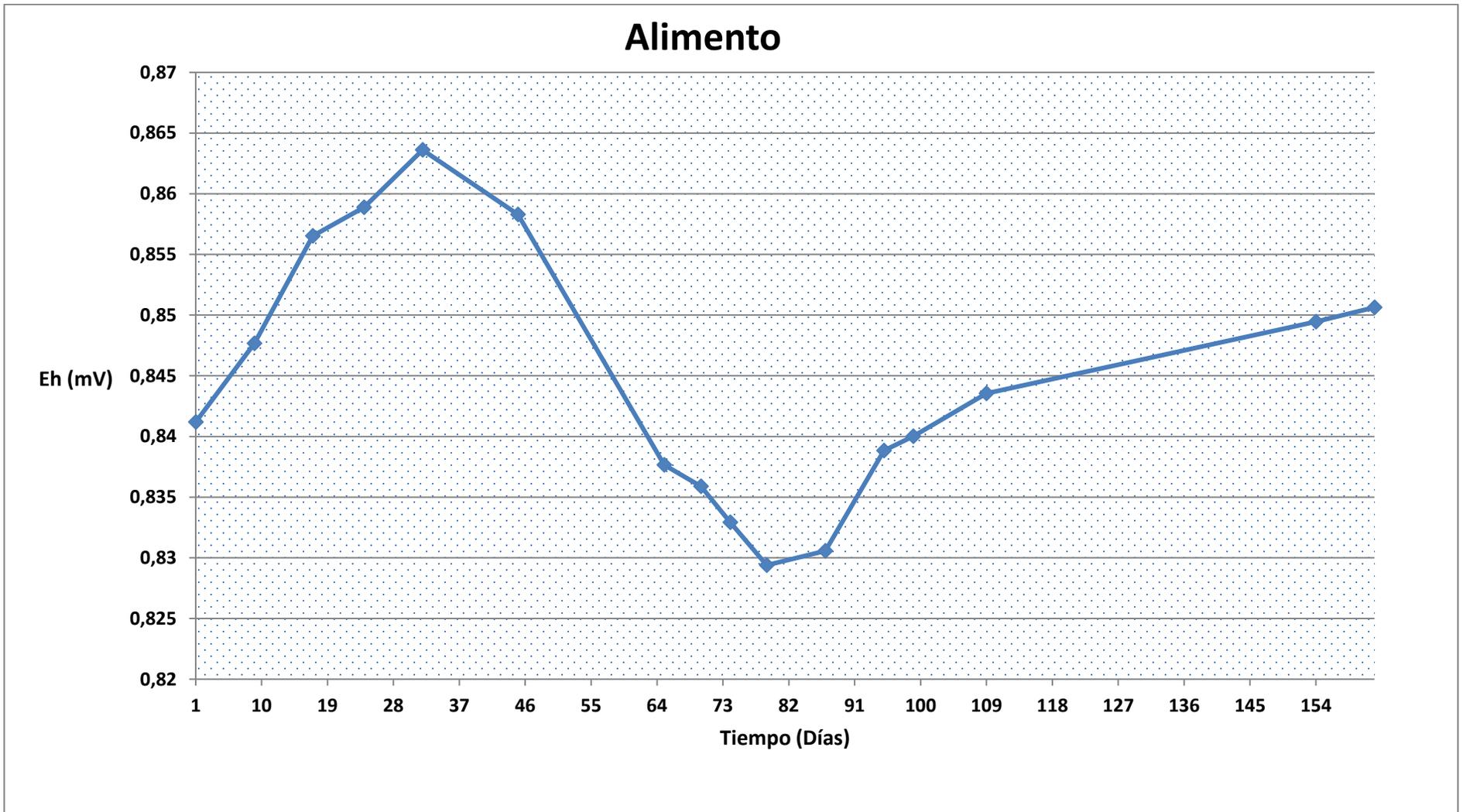


Figura 39. Comportamiento del Eh en un lapso de tiempo determinado. (Alimento)

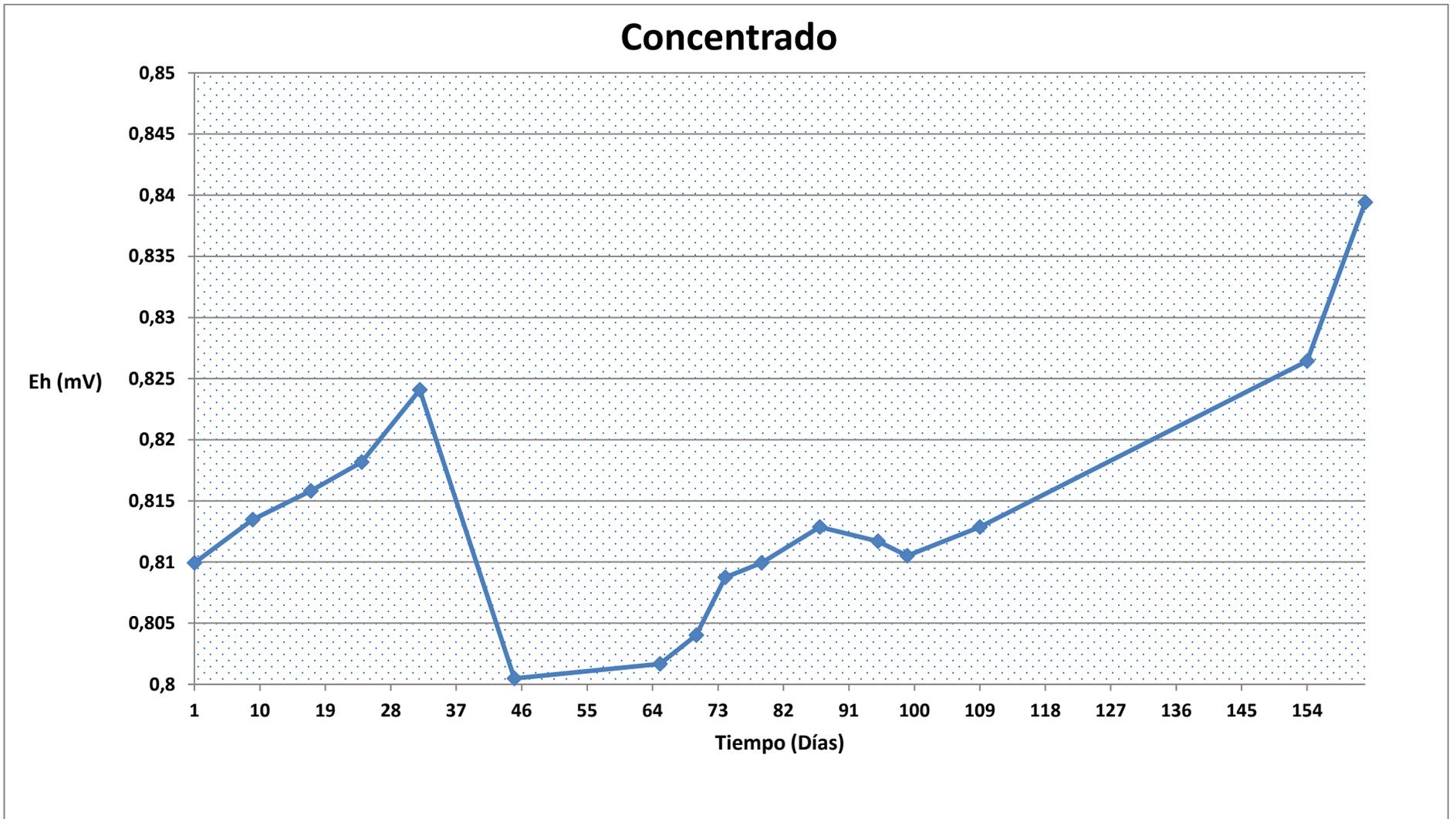


Figura 40. Comportamiento del Eh en un lapso de tiempo determinado. (Concentrado)

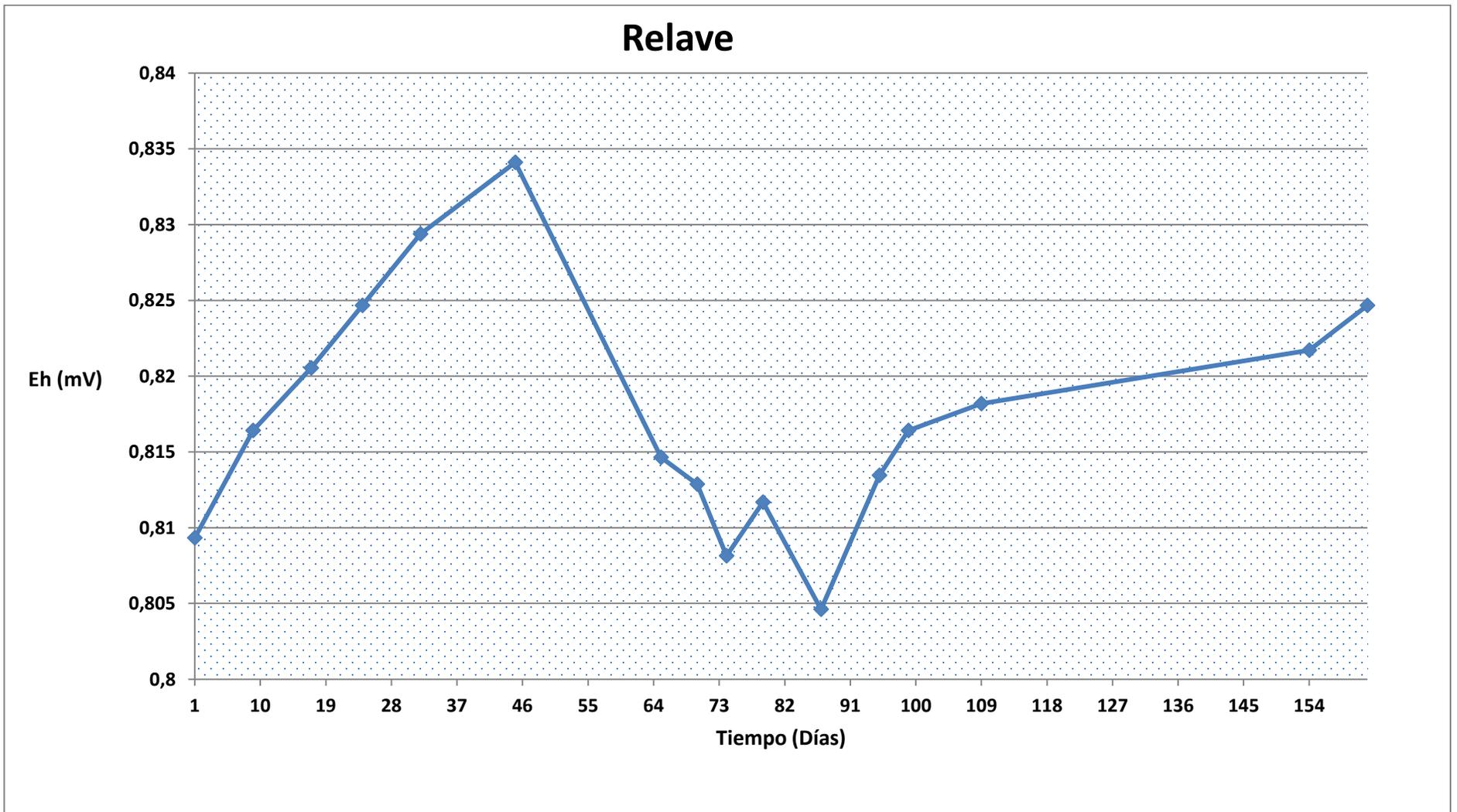


Figura 41. Comportamiento del Eh en un lapso de tiempo determinado. (Relave)

4.2.3. Interpretación del comportamiento de las curvas de Eh.

Los valores de Eh se generaron a partir de los valores establecidos de pH, utilizando la fórmula descrita en el capítulo anterior, la misma que presenta su resultado en mili voltios (mV).

Para el caso del material de alimento, el Eh durante la toma de análisis, inicia con un valor de 0,84119 en el día 1, manteniéndose constante a lo largo del proceso de experimentación, variando moderadamente su valor pero sin influir de manera directa.

La curva generada para el material de concentrado, se mantiene dentro de un rango moderado entre 0.8 mV y 0.84 mV, ascendiendo y descendiendo lentamente durante el tiempo estimado de análisis de muestras.

Finalmente el diagrama que contiene la curva del material de relave, empieza con un valor de Eh de 0.80933 mV, ascendiendo hasta llegar al punto más alto de 0.83411 mV, luego continua su descenso y se mantiene constante como en los casos anteriores de alimento y concentrado si variar en gran magnitud.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- En la aplicación de los test estáticos para los materiales de alimento, concentrado y relave, el potencial de neutralización neto fue de 347.047, 448.07 y 492.45 kg de CaCO₃/ton de mineral fue respectivamente, siendo estos valores mayores a 20 kg CaCO₃/t, y basándose en los criterios mencionados en el capítulo anterior de que las tres muestras analizadas **NO SON GENERADORAS DE ÁCIDO**.
- La relación entre el PN/PA para el alimento, concentrado y relave, es de 6.25, 4.13 y 8.12 respectivamente, siendo muestras **NO GENERADORAS DE ÁCIDO** cuando los valores son mayores al valor de 2.
- Los test dinámicos complementan la veracidad de la información realizada para los test estáticos, obteniendo los valores más bajos en la medición de pH con valores de 6.21, 6.71 y 6.62 para el alimento, concentrado y relave, determinando que **NO GENERAN ACIDEZ** en lapso de tiempo que duraron los análisis.
- Para los tres casos a partir del día 95, el pH se mantiene relativamente constante, realizando la modificación del pH en menor magnitud.
- La conductividad para las tres muestras mencionadas anteriormente, durante el primer día de análisis determinan un alto valor de conductividad, pero a partir del día 45, se mantienen un descenso permanente por debajo de los valores iniciales.
- El Eh realizado para el alimento, relave y concentrado, se encuentra establecido dentro de un rango moderado que delimitan la zona en la que el agua es estable en función de Eh (0 - 1.2) y pH (5 - 9) obteniendo los datos de Eh entre 0.8 y 0.84, confirmando una vez más de que no están generando ningún tipo de acidez.

Songor Carrión 75

- Los materiales de alimento, concentrado y relave, provenientes del Proyecto Minero Río Blanco, han sido sometidos a una serie de análisis y pruebas experimentales, obteniendo un resultado de NO GENERADORES DE DRENAJES ÁCIDOS.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar el test estático de la manera más cuidadosa, sin realizar ningún tipo de contaminación para las muestras que se realizaran los análisis correspondientes, ya que estos test son mucho más costosos que los test dinámicos.
- En la ejecución del test estático se debe tener gran cuidado en la titulación potenciométrica para determinación del potencial de neutralización (PN), realizando con la mayor exactitud posible, ya que de esto dependerá la efectividad de los datos a obtener.
- Realizar los test estáticos usando un duplicado de muestras, así se podrá comprobar si las muestras duplicadas contienen la información correcta.
- El material que se utilizara para cargar las columnas de lixiviación, debe ser mezclado con material más grueso, para que permita la circulación del líquido a lo largo de las columnas de lixiviación.
- Se debe calibrar los equipos de medición cada vez que se vaya a realizar el análisis, realizando la debida limpieza para que no alteren el resultado de las muestras.
- Este tipo de análisis se debe ejecutar en las diferentes empresas mineras, con el fin de realizar la predicción de la generación de drenaje ácido y los impactos que pueden generar al medio ambiente y así prevenir la mitigación de impactos ambientales.

BIBLIOGRAFÍA.

- Aduvire, O. (2006). Drenaje Ácido de Mina, generacion y tratamiento. Madrid.
- Albuja, L. (2012). Fauna de vertebrados del Ecuador (No. R591. 986 A1156f Ej. 1 024969). Escuela Politécnica Nacional (Quito, Ecuador).
- AMIRA. (2002). *Manual de ARD de prueba - Proyecto P387A predicción y el control cinético de drenaje ácido de minas.*
- Bjelkevick, A. (2005). Water Cover Closure Design for Tailings Dams: State of the ArtReport.
- Bristow, C., & Hoffstetter, R. (1977). *Mapa Geologico Parcial Del Ecuador (basado en Los Mapas de la DGGM) Ecuador. Lexique Stratigraphique International, Vol. 5, Amerique Latine, Fasc. 5a2.-Paris: Centre National de la Rec.*
- Broughton, L., & Robertson, A. M. (1992). Drenaje ácido de rocas de las minas: dónde estamos ahora. . Manchester, Reino Unido.
- Cerón, C. (2003). Manual de botánica sistemática, etnobotánica y métodos de estudio en el Ecuador. Herbario “Alfredo Pérez” QAP, Escuela de Biología de la Universidad Central del Ecuador.
- CIMM T & S S.A. (2007). *APLICACIÓN DE TEST ABA Y Y EVALUACIÓN DE GENERACIÓN NETA DE ACIDEZ A MUESTRAS DE GEOLOGIA DE COMPAÑÍA MINERA DEL PACIFICO.* Chile.
- Coil, D., Lester, E., & Higman, B. (2014). Desechos de la minería. *Ground Truth Trekking.*
- Dogan, P. (2001). *Caracterización de residuos mineros para la predicción de drenaje ácido de minas.*
- Feininger, T. (1981). La geología histórica del Cretácico y Paleogeno de la costa Ecuatoriana. Rev. Politécnica Escuelâ Politec. Nat. Quito, 1.
- GAD, M. (2014). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (publicación No. 261).* Obtenido de http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/0160027390001_PDOT_MOLLETURO%202015_1_23-10-2015_02-11-39.pdf.
- Grande, J., Borrego, J., & Morales, J. (2010). Relaciones entre la conductividad y el pH en canales expuestos a procesos de drenaje de minas: estudio de una gran masa de datos utilizando estadísticas clásicas. Los recursos hídricos.

- INAP. (2009). Principales orígenes del drenaje ácido. *Ingeoexpert*, 15-16.
- Kania, T. (1998). Métodos de laboratorio para la contabilidad ácido-base: una actualización. Capítulo 6. En la predicción del drenaje de minas de carbón y la prevención de la contaminación en Pennsylvania. .
- Lottermoser, B. (2007). Residuos de minas: caracterización, tratamiento e Impactos ambientales. . Berlin.
- MAE. (2013). *Modelo de Fenología General Para la Representación de Ecosistemas del Ecuador Continental*. Quito: Ministerio de Ambiente.
- Morin, K. (2001). Relocation of net-acid-generating waste to improve post-mining water. Waste Management.
- Morin, K., & Hutt, N. (2001). Relocation of net-acid-generating waste to improve post-mining water chemistry Waste Management.
- Ortiz, M. (2003). Aproximación a la minería y metalurgia de Minas de Riotinto desde la antigüedad hasta el Siglo XIX. Tesis doctoral, Universidad de Huelva.
- Pamo, E. L. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y minero*, 113(1), 3-21.
- POURRUT, P. (1995). *El Agua en el Ecuador. Clima, precipitaciones, escorrentía*. Orstom. Corporación Editorial Nacional. Quito.
- Price, B., & Errington, E. (1997). Guía sobre lixiviación de metales y drenaje ácido de la minería en la Columbia Británica .
- Quensen, D., Tiedje, J., & Boyd, S. (1999). Bromoethanesulfonate, sulfate, molybdate, and ethanesulfonate inhibit anaerobic dechlorination of polychlorobiphenyls by pasteurized microorganisms. .
- Romero, B., & Flores, C. (2010). Manual de Reutilización de Pasivos Ambientales Mineros del Proceso de Flotación de Minerales. Lima-Perú.
- Sáinz, A., Grande, J., ML, D. I., & Sánchez-RodasD. (2002). *Caracterización de descargas secuenciales de lixiviados de desechos mineros en los ríos Tinto y Odiel Diario de Gestión Ambiental*.
- Skousen, J. (2000). Pruebas estáticas para predecir el drenaje de minas en la predicción del drenaje ácido de minas en el este de los Estados Unidos. Tecnología de drenaje ácido. Iniciativa (AETI).

Smart, R., Skinner, W., Levay, G., Gerson, A., Thomas, J., Sobieraj, H., y otros. (2002). Manual de prueba ARD: Predicción del proyecto P387A y control cinético del drenaje ácido de minas : AMIRA, I.

Valente, T. (2004). *Modelos de Caracterización de Impacto Ambiental para Escombreras Relativas. Tesis de Doctorado, Universidad de Minho.*

Villota, H. (1997). *Una nueva aproximación a la clasificación fisiográfica del terreno. Revista CIAF, Bogotá, v.15, p.83-115.*

Zamora, G. (2003). Predicciones de drenaje ácido de roca mediante test geoquímicos estáticos y dinámicos. *Revista Metalúrgica.*

ANEXOS

Anexo 1. Listado de abreviaturas

DAR: Drenaje ácido de roca

DAM: Drenaje ácido de mina

PA: Potencial de acidez

PN: Potencial de neutralización

PNN: Potencial de neutralización neto

Anexo 2. Resultado del análisis químico del alimento



REPORTE DE RESULTADOS QUÍMICOS

Código: SGCUDAL-F-004
Versión: 3
Fecha: 2014/06/10

| | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|--|
| ORDEN No.: 366 | FECHA RECEPCIÓN: 21/03/2019 | FECHA DE ENTREGA: |
| CODIGO LAB: Q | CLIENTE: Luis Songor | DIRECCIÓN: |
| RUC/CEDULA: 1104060866 | MUESTRA: | CANTIDAD: |
| CONDICION DE LA MUESTRA: Ambiente | MUESTREADO POR: Cliente | ANALISIS SOLICITADO: Na, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Cd |

IDENTIFICACION DE LA (S) MUESTRA(S):

| | |
|--------------|------|
| Muestra Q-01 | AL |
| Muestra Q-02 | RL |
| Muestra Q-03 | CAJA |
| Muestra Q-04 | CN |

RESULTADOS

Muestra: Muestra Q-01

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|-----------|----------|-------------------|-----------|----------------------|-----------|
| Sodio | % | ABSORCION ATOMICA | 0,07 | 0,05 mg/kg | N/A |
| Potasio | % | ABSORCION ATOMICA | 1,91 | 0,03 mg/kg | N/A |
| Calcio | % | ABSORCION ATOMICA | 3,14 | 0,94 mg/kg | N/A |
| Magnesio | % | ABSORCION ATOMICA | 0,13 | 0,018 mg/kg | N/A |
| Manganeso | ppm | ABSORCION ATOMICA | 36,58 | 0,012 mg/kg | N/A |
| Hierro | % | ABSORCION ATOMICA | 0,75 | 0,003 mg/kg | N/A |
| Cobre | % | ABSORCION ATOMICA | 4,52 | 0,019 mg/kg | N/A |
| Zinc | ppm | ABSORCION ATOMICA | 7,73 | 0,002 mg/kg | N/A |
| Oro | ppm | ABSORCION ATOMICA | 19,23 | 0,025 mg/kg | N/A |
| Cromo | ppm | ABSORCION ATOMICA | 114,79 | 0,002 mg/kg | N/A |

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de UDA LABORATORIOS. El laboratorio mantendrá la confidencialidad de los resultados.



Av. 24 de Mayo 7-771 Heredia Mala.
Teléfono: (0224) 2511111

Anexo 3. Resultado del análisis químico del relave



REPORTE DE RESULTADOS QUÍMICOS

Código: SGCUDAL-F-004
Versión: 3
Fecha: 2014/06/10

| | | | | | |
|--------|-----|-------------------|------|-------------|-----|
| Níquel | ppm | ABSORCION ATOMICA | 3,03 | 0,012 mg/kg | N/A |
| Plomo | ppm | ABSORCION ATOMICA | 9,55 | 0,002 mg/kg | N/A |
| Cadmio | ppm | ABSORCION ATOMICA | <ld | 0,003 mg/kg | N/A |

Muestra: Muestra Q-02

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|-----------|----------|-------------------|-----------|----------------------|-----------|
| Sodio | % | ABSORCION ATOMICA | 0,07 | 0,05 mg/kg | N/A |
| Potasio | % | ABSORCION ATOMICA | 1,80 | 0,03 mg/kg | N/A |
| Calcio | % | ABSORCION ATOMICA | 15,73 | 0,94 mg/kg | N/A |
| Magnesio | % | ABSORCION ATOMICA | 0,23 | 0,018 mg/kg | N/A |
| Manganeso | ppm | ABSORCION ATOMICA | 168,38 | 0,012 mg/kg | N/A |
| Hierro | % | ABSORCION ATOMICA | 0,76 | 0,003 mg/kg | N/A |
| Cobre | % | ABSORCION ATOMICA | 4,49 | 0,019 mg/kg | N/A |
| Zinc | ppm | ABSORCION ATOMICA | 12,15 | 0,002 mg/kg | N/A |
| Oro | ppm | ABSORCION ATOMICA | 7,58 | 0,025 mg/kg | N/A |
| Cromo | ppm | ABSORCION ATOMICA | 85,23 | 0,002 mg/kg | N/A |
| Níquel | ppm | ABSORCION ATOMICA | 1,84 | 0,012 mg/kg | N/A |
| Plomo | ppm | ABSORCION ATOMICA | 9,95 | 0,002 mg/kg | N/A |
| Cadmio | ppm | ABSORCION ATOMICA | <ld | 0,003 mg/kg | N/A |

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de UDA LABORATORIOS. El laboratorio mantendrá la confidencialidad de los resultados.



Anexo 4. Resultado del análisis químico del concentrado



UDA
LABORATORIOS

REPORTE DE RESULTADOS QUÍMICOS

Código: SGCUDAL-F-004
Versión: 3
Fecha: 2014/06/10

Muestra: Muestra Q-04

| Análisis | Unidades | Método | Resultado | Límites de Detección | Requisito |
|-----------|----------|-------------------|-----------|----------------------|-----------|
| Sodio | % | ABSORCION ATOMICA | 0,10 | 0,05 mg/kg | N/A |
| Potasio | % | ABSORCION ATOMICA | 3,63 | 0,03 mg/kg | N/A |
| Calcio | % | ABSORCION ATOMICA | 20,19 | 0,94 mg/kg | N/A |
| Magnesio | % | ABSORCION ATOMICA | 0,49 | 0,018 mg/kg | N/A |
| Manganeso | ppm | ABSORCION ATOMICA | 61,38 | 0,012 mg/kg | N/A |
| Hierro | % | ABSORCION ATOMICA | 1,70 | 0,003 mg/kg | N/A |
| Cobre | % | ABSORCION ATOMICA | 117,24 | 0,019 mg/kg | N/A |
| Zinc | ppm | ABSORCION ATOMICA | 35,63 | 0,002 mg/kg | N/A |
| Oro | ppm | ABSORCION ATOMICA | 34,58 | 0,025 mg/kg | N/A |
| Cromo | ppm | ABSORCION ATOMICA | 270,40 | 0,002 mg/kg | N/A |
| Niquel | ppm | ABSORCION ATOMICA | 6,72 | 0,012 mg/kg | N/A |
| Plomo | ppm | ABSORCION ATOMICA | 19,92 | 0,002 mg/kg | N/A |
| Cadmio | ppm | ABSORCION ATOMICA | <ld | 0,003 mg/kg | N/A |

OBSERVACIONES:

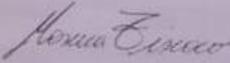
Abreviaturas:

<ld: menor al límite de detección

N/A: No Aplica



Técnico Responsable




Coordinadora Laboratorios

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de UDA LABORATORIOS. El laboratorio mantendrá la confidencialidad de los resultados.

