



**Red DESIR**

**MÁSTER INTERNACIONAL  
APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS  
RECURSOS MINERALES**

**TESIS DE MAESTRÍA**

**ESTUDIO DE COMPONENTES BIOLÓGICOS DE LA FENOMENOLOGÍA DE  
GENERACIÓN DE DRENAJE ACIDO DE MINAS, UTILIZANDO LA TÉCNICA DE  
RESPIROMETRÍA**

**MA DEL ROCIO MARTÍNEZ LOZANO**

**MARZO DE 2007**



**Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia  
FEUP**



## **Red DESIR**

# **MÁSTER INTERNACIONAL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS MINERALES**

**Línea:  
MEDIO AMBIENTE Y MINERIA**

## **TESIS DE MAESTRÍA**

**ESTUDIO DE COMPONENTES BIOLÓGICOS DE LA FENOMENOLOGÍA DE  
GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO DE MINAS, UTILIZANDO LA TÉCNICA DE  
RESPIROMETRÍA**

**MA DEL ROCIO MARTÍNEZ LOZANO**

**MARZO DE 2007**



**Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia  
FEUP**



**ESTUDIO DE COMPONENTES BIOLÓGICOS DE LA FENOMENOLOGÍA DE  
GENERACIÓN DE DRENAJE ACIDO DE MINAS, UTILIZANDO LA TÉCNICA DE  
RESPIROMETRÍA**

**MEMORIA DE LA TESIS DE MAESTRÍA  
QUE PARA OPTAR AL TÍTULO DE MÁSTER EN  
“APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS MINERALES”  
IMPARTIDO POR LA RED DESIR**

**PRESENTA  
MA. DEL ROCIO MARTÍNEZ LOZANO**

**UNIVERSIDAD DE SONORA**

**DIRECTOR  
DR. ANTONIO MANUEL ANTÚNES FIUZA**

**REALIZADA EN  
LA FACULTADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS, EN PORTUGAL**

**A MARZO DE 2007  
LIMA PERÚ**



**Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia  
FEUP**

CURSO 2005-2006

**MÁSTER INTERNACIONAL  
APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS  
MINERALES**

Como director del Trabajo,

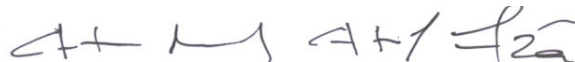
Autorizo la presentación de la Tesis de Maestría

**ESTUDIO DE COMPONENTES BIOLÓGICOS DE LA FENOMENOLOGÍA DE  
GENERACIÓN DE DRENAJE ACIDO DE MINAS, UTILIZANDO LA TÉCNICA DE  
RESPIROMETRÍA**

Realizado por  
**MA. DEL ROCIO MARTÍNEZ LOZANO**

Bajo mi dirección  
y

**Dr. ANTONIO MANUEL ANTÚNES FIÚZA**



Firmado:

Fecha: 22/02/2007

## Red DESIR

Constituido el tribunal nombrado por el Coordinador Internacional del Programa de Máster Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales, el día 26 de Marzo de 2007

Presidente: Carlos Enrique Rodríguez Vigo.  
Secretario: Lionel Fidel Small  
Vocal: Oscar Alfredo Rodríguez Muñoz

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis de Maestría el día 26 de Marzo de 2007



EL PRESIDENTE



LOS VOCALES



EL SECRETARIO

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Diós haberme permitido vivir esta experiencia y superarme en el ramo profesional y por todas las oportunidades de superación que ha puesto en mi camino.

Mis más sincero agradecimiento a mi asesor y director de tesis al Dr. Antonio Manuel Antúnes Fiúza por todo su apoyo y comprensión para la realización de mi proyecto, así como a Dr. María Cristina da Costa Vila, Ing. José Soeiro Carvalho, Maria de Lurdes Proença de Amorim Dinis y a la Faculdade de Engenharia do Porto, en Portugal, especialmente al Departamento de Minas.

Agradezco el apoyo recibido por el programa Alfa, así como a todos los que con su esfuerzo y dedicación han logrado el desarrollo del proyecto Maestría Internacional para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Minerales.

Mi agradecimiento a todos mis maestros de la Maestría Internacional por compartir sus conocimientos conmigo.

Mi agradecimiento por el apoyo brindado a la Empresa Minera Luismin, S.A de C.V., en México por darme la oportunidad de aplicar los conocimientos adquiridos en mi desarrollo profesional en el área de ingeniería ambiental, mi más sincera gratitud a: MC. Hilda Pérez Andrade, Ing. Luis H. Muruato y al Ing. Eduardo Luna, así como a todos mis compañeros que me han brindado siempre su apoyo.

Agradezco a mis amigas Ing. Sandra Villacorta Chambí y a la Ing. Teresa del Rocío Estupiñan Martínez por todo el apoyo brindado en mi instancia en Lima Perú y por su valiosa amistad.

Agradezco a mis padres el Sr. Ambrosio Martínez Calderón y la Sr. Lidia Lozano Medrán por apoyarme en todos mis proyectos de vida, así como a mis hermanos.

Para todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

***Dedicatoria***  
***A mis padres***

## RESUMEN

En el presente trabajo se estudiaron los componentes que participan en la generación de drenaje ácido de minas, en residuos que provienen de la industria minera y fue desarrollado en la Faculdade de Engenharia do Porto, en Portugal, para ello se realizaron ensayos que permitan obtener la caracterización geoquímica y física en cada uno de los residuos, además de aplicar los métodos estáticos y de cinética para evaluar la predicción de generación de drenaje ácido, como iniciativa en la investigación se aplicó la técnica de respirometría que tiene como finalidad cuantificar la concentración de oxígeno y bióxido de carbono que se consumen en la reacción de oxidación, en residuos que son susceptibles de general drenaje ácido, esta evaluación permite identificar la participación inicial de los microorganismos del genero *thiobacillus* que participan como catalizadores en la reacción.

## ABSTRACT

In the present work, the components that play a part in the generation of acid mine drainage, in wastes derived from the mining industry, were studied and was developed in the Faculdade de Engenharia do Porto, in Portugal. For this study, assays were conducted and enabled the physical and geochemical characterization of each of the wastes to be obtained. In addition, the static and kinetic methods were applied to evaluate the prediction of the generation of acid mine drainage. As an initiative in the investigation, the respirometry method was applied with the objective being to quantify the concentration of oxygen and carbon dioxide that is consumed as part of the oxidation reaction in wastes that are susceptible to the generation of acid mine drainage. This evaluation permits identification of the initial participation of microorganisms from the genera *thiobacillus* that take part as catalysts in the reaction.



<b>INDICE</b>	<b>PÁGINA</b>
Agradecimientos-----	i
Dedicatoria-----	ii
Resumen-----	iii
Abstract-----	iii
1. Introducción-----	1
1.1 Presentación-----	1-2
1.2 Conocimientos previos o estado del arte-----	3-4
1.2.1 Estudio de componentes en la generación de drenaje ácido de minas-----	4
1.2.1.1 Oxidación de sulfuros-----	4-6
1.2.1.2 Oxidación bacteriana-----	7-14
1.2.1.3 Factores que afectan la actividad de las bacterias-----	14-17
1.2.1.4 Predicción de drenaje ácido de minas-----	17
1.2.1.5 Criterios de selección de muestra-----	18
1.3 Planteamiento del problema-----	19
1.3.1 Descripción de las unidades mineras-----	19-24
1.3.1.1 Generalidades de la unidad minera Panasqueira-----	19-21
1.3.1.2 Generalidades de la unidad minera Neves Corvo-----	21-23
1.4 Objetivo-----	25
1.4.1 Objetivos particulares-----	25
2. Metodología-----	26-27
3. Proceso experimental-----	28
3.1 Selección y toma de muestra-----	28
3.1.1 Toma de muestra de la unidad minera Panasqueira-----	28
3.1.2 Toma de muestra de la unidad minera Neves Corvo-----	29
3.2 Analítica-----	29
3.2.1 Ensayos estáticos-----	29
3.2.1.1 Balance ácido base-----	30-32
3.2.1.2 Balance ácido base modificado-----	33-34
3.2.1.3 Ensayos de producción líquida de ácido-----	35-37
3.2.1.4 Descripción de equipos utilizados en análisis estáticos-----	38-39
3.2.2 Ensayos cinéticos-----	40-42
3.2.2.1 Extracción de iones en equipo Soxhlet-----	43
3.2.2.2 Extracción de iones en columna-----	44-49
3.2.2.3 Respirometría-----	50-54
3.2.2.3.1 Metodología aplicada en el proceso de respirometría-----	54-62
3.2.2.3.2 Procesamiento de información-----	63
4. Resultados-----	64
4.1 Ensayos químicos-----	64-73
4.2 Ensayos físicos-----	74
4.3 Evaluación del potencial de generación de drenaje ácido de minas-----	75
4.3.1 Ensayos estáticos-----	75
4.3.2 Resultados de ensayos de cinética-----	76
4.3.2.1 Extracción de iones con equipo Soxhlet-----	76-82
4.4 Resultados de ensayos de respirometría-----	83-88
5. Discusión de resultados-----	89
5.1 Resultados obtenidos de la unidad minera Panasqueira-----	89-90
5.2 Resultados obtenidos de la unidad minera Neves Corvo-----	91
6. Conclusiones-----	92
6.1 Síntesis de resultados y conclusiones-----	92-94
7. Recomendaciones-----	95
8. Referencias bibliográficas-----	96-98

## INDICE DE GRAFICOS

## PÁGINA

Grafico 1: Resultados de análisis de metales por rayos x-----	67
Grafico 2: Resultados de análisis de metales por rayos x-----	68
Grafico 3: Resultados de análisis de óxidos-----	68
Grafico 4: Resultados de análisis de metales por rayos x-----	70
Grafico 5: Resultados de análisis de metales por rayos x-----	71
Grafico 6: Resultados de análisis de óxidos en residuos-----	73
Grafico 7: Medición de parámetros fisicoquímicos en equipo Soxhlet-----	78
Grafico 8: Comportamiento de temperatura y pH en ensayos en columna-----	79
Grafico 9: Comportamiento de conductividad y total de sólidos disueltos en ensayos en columna-----	80
Grafico 10: Comportamiento de temperatura y pH en ensayos en columna-----	81
Grafico 11: Comportamiento de conductividad y total de sólidos disueltos en ensayos en columna---	82
Grafico 12: Concentración de oxígeno en respirometría-----	84
Grafico 13: Diferencia de consumo de oxígeno con respecto al blanco-----	86
Grafico 14: Inicio del proceso pseudos-estacionario-----	87
Grafico 15: Concentración de bióxido de carbono en respirometría-----	88

## INDICE DE FIGURAS

## PÁGINA

Figura 1: Localización de las minas Panasqueira y Neves Corvo-----	24
Figura 2: Residuos de la unidad minera Panasqueira-----	29
Figura 3: Balanza analítica-----	38
Figura 4: Valoración titulométrica-----	38
Figura 5: Medición de parámetro pH-----	38
Figura 6: Residuos de la unidad minera Panasqueira-----	43
Figura 7: Residuos de la unidad minera Neves Corvo-----	43
Figura 8: Calibración en equipo de fluorescencia de rayos x-----	45
Figura 9: : Análisis por fluorescencia de rayos x-----	45
Figura 10: Residuos en columna de la unidad minera Panasqueira-----	48
Figura 11: Residuos en columna de la unidad minera Neves Corvo-----	48
Figura 12: Columna con drierite-----	56
Figura 13: Columna con Moisture-Gone <sup>tm</sup> -----	57
Figura 14: Condensador-----	57
Figura 15: Bomba modelo PP-2-----	58
Figura 16: Medidor de flujo-----	58
Figura 17: Reactor tipo batch-----	59
Figura 18: Analizador de oxígeno y bióxido de carbono-----	60
Figura 19: Proceso de respirometría-----	62
Figura 20: Lixiviados en presa de residuos mineros, unidad minera Panasqueira-----	75

## INDICE DE TABLAS

## PÁGINA

Tabla 1: Mineralogía con contenidos de sulfuros-----	5
Tabla 2: Condiciones de los microorganismos del genero thiobacillus-----	6
Tabla 3: Microorganismos activos en la biolixiviación de minerales-----	9
Tabla 4: Efecto de la temperatura sobre los principales grupos de microorganismos-----	10
Tabla 5: Volúmenes de residuos generados por la unidad minera Panasqueira-----	21
Tabla 6: Volúmenes de residuos generados por la unidad minera Neves Corvo-----	23
Tabla 7: Metodología en la realización de ensayos-----	27
Tabla 8: Metodología de la técnica de análisis ABA-----	32
Tabla 9: Metodología de la técnica de análisis ABA modificado-----	34
Tabla 10: Metodología para la determinar la producción líquida de ácido-----	36
Tabla 11: Especificaciones técnicas del potenciómetro-----	39
Tabla 12: Factores y condiciones en la predicción de drenaje ácido de minas-----	42
Tabla 13: Metodología de extracción de iones por Soxhlet-----	43
Tabla 14: Metodología en la extracción de lixiviados en columna-----	46
Tabla 15: Especificaciones técnicas del conductímetro-----	47
Tabla 16: Parámetros considerados en los análisis de respirometría-----	56
Tabla 17: Especificaciones técnicas de equipo de medición de oxígeno y dióxido de carbono-----	61
Tabla 18: Metales presentes en residuos de la unidad minera Panasqueira-----	65
Tabla 19: Resultados en residuos colocados en columnas-----	66
Tabla 20: Metales presentes en residuos de la unidad minera Neves Corvo-----	72
Tabla 21: Resultados del ensayo granulométrico -----	74
Tabla 22: Datos experimentales de la unidad minera Panasqueira-----	76
Tabla 23: Extracción de iones por Soxhlet de la unidad minera Panasqueira-----	77
Tabla 24: Caracterización de agua de lluvia-----	83

## ANEXOS

- Anexo A. Resultados de ensayos por métodos estáticos
- Anexo B. Resultados de ensayos por métodos de cinética
- Anexo C. Programa MatLab utilizado para ensayos respirométricos.
- Anexo D. Resultados de elementos metálicos
- Anexo E. Resultados de ensayos granulométricos

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 PRESENTACIÓN

En la búsqueda de la sustentabilidad de la actividad minera, surge la necesidad de atender la problemática ambiental que presentan todas aquellas empresas con problemas de generación de drenaje ácido de minas, debido a los grandes volúmenes de residuos que éstas generan en el proceso de extracción y beneficio de minerales, por tal motivo hoy en día se suman a la solución de estos problemas las Instituciones Educativas, los Centros de Investigación y el mismo Sector Industrial.

La Industria Minera en los últimos años se ha preocupado en la minimización de impactos ambientales, teniendo como base el cumplimiento de la legislación ambiental, así como la implementación de sistemas de certificación con reconocimiento nacional e internacional.

La generación de drenaje ácido de minas, es uno de los problemas ambientales que con mayor preocupación se tiene en la Industria Minera, siendo éste uno de los aspectos ambientales que genera mayor impacto, esto debido a la disolución de metales pesados que son transportados en sus lixiviados hacia el medio ambiente, esto se da debido al contacto de minerales con altos contenidos de sulfuros, agua y oxígeno, favoreciendo las condiciones para la oxidación del ión sulfuro, en presencia de bacterias del genero *thiobacillus thiooxidans*, que actúan como catalizadoras en la reacción de oxidación, poniendo de manifiesto la escasa o nula presencia de materia que pueda neutralizar la acidez producida como lo es la presencia de carbonato de calcio.

La solución de problemas ambientales ha llevado a las Instituciones Educativas a enfocar su campo de estudio a la búsqueda de soluciones de la problemática ambiental que vive el Sector Industrial, por lo que en el presente trabajo se muestra el estudio de componentes biológicos de la fenomenología de generación de drenaje ácido de minas, utilizando la técnica de respirometría, esta permite evaluar parámetros que participan en la cinética de generación de drenaje ácido como es el consumo de oxígeno y bióxido de carbono, principalmente, además se contempla la aplicación de la metodología que establece la guía

de predicción de generación de drenaje ácido de minas, por la Environmental Protection Agency (EPA), de los Estados Unidos, para ellos se suman al presente estudio la unidad minera Panasqueira ubicada en la Vertiente Sur de la Cordillera Montañosa de la Sierra de Estrela a una altitud cerca de 700 metros, a 300 kilómetros al Norte de Lisboa y a 35 kilómetros de la pequeña ciudad de Fundão, en Portugal, así como la Unidad Minera Neves Corvo localizada en la zona de Alentejo al Sur de Portugal y al Oeste de la denominada Faja Pirítica Iberica (FPI), a 230 kilómetros al Sureste de Lisboa y a una altura de aproximadamente 200 metros sobre el nivel del mar.

La predicción del potencial de generación de drenaje ácido de minas es puesto de manifiesto en el presente trabajo, y para ello se contempla la realización de ensayos de predicción de drenaje ácido de minas como son: ensayos estáticos y de cinética. En la determinación de ensayos estáticos se pretende determinar el potencial de generación de drenaje ácido de minas, mientras que en los ensayos de cinética evaluar el tiempo de generación de drenaje ácido, para ellos se contemplan ensayos en columna, extracción de iones en equipo Soxhlet y la aplicación de la técnica de respirometría.

La respirometría es una técnica basada en la medición del consumo de oxígeno que se requiere para llevar a cabo el proceso de oxidación de un substrato que es predecible de generar drenaje ácido de minas, pudiendo evaluar el inicio de la participando de microorganismos del genero de *thiobacillus thiooxidans* que actúan como catalizadoras acelerando el proceso de oxidación, a través de la medición de bióxido de carbono que indica la presencia de microorganismos del genero *thiobacillus*, ya que estas obtienen su carbono celular del bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el cual es obtenido del ambiente, por tal motivo su proceso es aerobio y su principal fuente de energía es tomada de ión ferroso (Fe<sup>+2</sup>), o de especies reducidas del azufre. La respirometría ahorra el tiempo y el trabajo asociado con los experimentos de agotamiento de sustratos y provee puntos de referencia de alta calidad para la valoración de parámetros biocinéticos. El proceso descrito para esta técnica es aplicado en residuos que provienen de las unidades Mineras Panasqueira y Neves Corvo.

## 1.2 CONOCIMIENTOS PREVIOS O ESTADO DEL ARTE

La contaminación de metales pesados, compuestos orgánicos e inorgánicos en suelos y cuerpos de agua superficial y subterránea, es uno de los principales problemas que se presentan en los sitios donde son depositados los residuos mineros procedentes del proceso de beneficio y extracción de minerales metálicos y no metálicos.

La explotación y beneficio de los recursos minerales históricamente no controlados desde el punto de vista ambiental, han ocasionado la existencia de contaminantes en el suelo y cuerpos de agua en la que la población a través de la biodisponibilidad de los contaminantes en los recursos naturales se ha visto afectada.

Para enfrentar cada uno de los problemas planteados, es imprescindible realizar estudios caso a caso, utilizando los conocimientos y herramientas científicas, así como los criterios entregados por la experiencia de situaciones similares. Ello permitiría simplificar los procedimientos en muchos casos, para concentrar la atención en aquellos que requieren la máxima precaución y vigilancia, además de la aplicación de medidas de remediación. De esta manera se lograría una efectiva protección, junto con el mejor uso del tiempo y recursos de los sectores públicos y privados.

El conocimiento de la participación que tienen los parámetros que participan en el proceso de oxidación en residuos de la industria minera como son: oxígeno, agua, azufre y microorganismos del género *thiobacillus*, aplicando la técnica de respirometría, contribuirá en el aporte de información en la cinética de oxidación de residuos provenientes de la Industria Minera con potencial de generar drenaje ácido de minas.

Cabe mencionar que la técnica de respirometría ha sido utilizada para evaluar el comportamiento de la cinética de descontaminación llevada a cabo por los microorganismos, principalmente en suelos y agua contaminados con hidrocarburos y compuestos orgánicos policíclicos.

Asumiendo la búsqueda de soluciones que permitan evaluar el impacto que ocasionan la generación de drenaje ácido de minas, las unidades mineras Panasqueira y Neves Corvo han permitido el desarrollo de este proyecto de investigación.

Es importante destacar que los resultados que se muestran en el presente reporte son un inicio en la investigación en la que permitirá evaluar parámetros que participan en la generación de drenaje ácido.

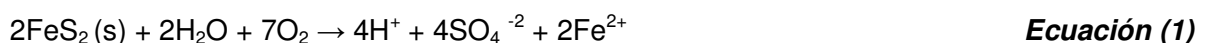
## 1.2.1 ESTUDIO DE COMPONENTES EN LA GENERACION DE DRENAJE ACIDO DE MINAS

### 1.2.1.1 OXIDACIÓN DE SULFUROS

El ácido es generado en los sitios mineros donde se encuentran minerales con contenidos de sulfuros. La oxidación de minerales con contenidos de sulfuros y la formación de ácido sulfúrico está en función de las condiciones naturales que prevalezcan en el medio ya que al estar en contacto los minerales con sulfuros, oxígeno y la humedad favorecen las condiciones para que se lleve a cabo el proceso de oxidación en presencia de bacterias que prevalecen en medio ácidos.

En la generación de drenaje ácido de minas se presentan las siguientes reacciones de oxidación en presencia de la **pirita**, según (Skousen et al. 1998; Nordstron y Alpes, 1999; Mills, 1999; USEPA, 1996 y 2000; entre otros).

En la ecuación 1, el ión azufre presente ( $S^{2-}$ ), es oxidado para formar iones de hidrógeno y sulfato, la disociación de los productos, da la formación de ácido sulfúrico en solución. El ión ferroso ( $Fe^{2+}$ ), es algunas veces soluble en las reacciones futuras. La oxidación del ión ferroso a ión férrico como se muestra en la ecuación 2, ocurre bajo condiciones de pH bajos.



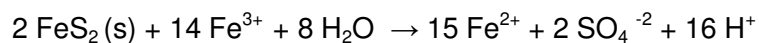
Los minerales que con mayor frecuencia se presentan en los sitios mineros con contenidos de sulfuros se muestran en la *Tabla 1*.

**Tabla 1:** Mineralogía con contenidos de sulfuros.

<b>MINERAL</b>	<b>COMPOSICIÓN</b>
Pirita	FeS <sub>2</sub>
Marcasita	FeS <sub>2</sub>
Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>
Calcita	CaCO <sub>3</sub>
Esfalerita	ZnS
Galena	PbS
Milerita	NiS
Pirrotina	Fe <sub>0,83-1</sub> S
Arsenopirita	FeAsS
Cinabrio	HgS

*Fuente: Ferguson y Erickson 1988.*

A niveles de pH de 3.5 y 4.5 la oxidación de iones son catalizados por una variedad de *metallogenium*, que son bacterias filamentosas. Para pH de 3.5 algunas reacciones son catalizadas por la bacteria *thiobacillus ferrooxidans*, otras bacterias capaces de actuar como catalizadores en el proceso de oxidación del material con contenidos de sulfuros se presentan en la *Tabla 2*. El ión férrico es formado al estar en contacto con la pirita presentándose la ecuación 3.



**Ecuación (3)**

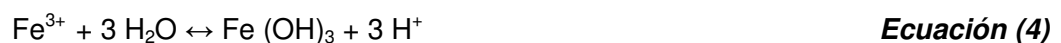


**Tabla 2:** Condiciones de los microorganismos del genero *thiobacillus*.

Microorganismos	pH	Temperatura	Aerobia	Nutrición
Thiobacillus Thioparus	4.5-10	10-37	+	Autotróficas
T. Ferrooxidans	0.5-6	12-25	+	Autotróficas
T. Thiooxidans	0.5-6	10-37	+	Autotróficas
T. Neapolitanus	3.0-8.5	8-37	+	Autotróficas
T. Denitrificans	4.0-9.5	10-37	+/-	Autotróficas
T. Novellus	5.0-9.2	25-35	+	Autotróficas
T. Intermedius	1.9-7.0	25-35	+	Autotróficas
T. Perometabolis	2.8-6.8	25-35	+	Autotróficas
Sulfolobus acidocalderius	2.0-5.0	55-85	+	Autotróficas
Desulfovibrio desulfuricans	5.0-9.0	10-45	-	Heterotróficas

Fuente: Thompson 1988.

La disolución de la pirita por el ión férrico en conjunto con la oxidación de los iones ferrosos constituye el ciclo de disolución de la pirita. Los iones férricos precipitan a hidróxidos como se indica en la ecuación 4.



Los precipitados de hidróxidos de hierro ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), pueden identificarse por su coloración que puede ser amarillo, naranja o rojo.

La pirita ( $\text{FeS}_2$ ) es un sulfuro ampliamente distribuido y se lo puede hallar en asociación con muchos metales como cobre, plomo, zinc, arsénico, plata, oro, entre otros.

### **1.2.1.2 OXIDACIÓN BACTERIANA**

La oxidación biológica de sulfuros de cobre ha sido el proceso más estudiado. El cobre se disuelve transformándose en sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ). La calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) es el sulfuro de cobre más difícil de oxidar. Bajo la influencia de *thiobacillus ferrooxidans* la velocidad de oxidación de este sulfuro se incrementa hasta en 12 veces más que el proceso netamente químico. Los sulfuros secundarios de cobre-calcita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), son oxidados más fácilmente bajo el impacto de las bacterias.

Uno de los primeros estudios realizados sobre la participación de las bacterias como catalizadoras en proceso de generación de drenaje ácido de minas, data desde 1947, según estudios realizados por Colmer, A.R., y Hinkle, M.E, la participación de los microorganismos en la generación de drenaje ácido, es puesto de manifiesto en el reporte preliminar de ciencia, 106, el 19 Septiembre de 1947, 253-256.

En 1951 a 1952, en Portugal, fueron almacenados temporalmente mineral que contenía uranio, estos residuos presentaron lixiviación acida en presencia de lluvia, por lo que se inicia la construcción de una planta de tratamiento. La presencia de lixiviación se generó en un periodo de tiempo de 6 a 12 meses, acción que no se esperaba. Las investigaciones referente a este proceso fueron desarrolladas en el Reino Unido, por lo que llegaron a la conclusión que la lixiviación se debe a la acción bacteriana del tipo *thiobacillus ferrooxidans*.

El uso de microorganismos como extractores de metales a partir de minerales fueron estudiados al comienzo de los años 50. En 1954, Brynes y Col publicaron un trabajo en el que se describen experimentos en los cuales bacterias acidófilas del género *thiobacillus* aisladas de las aguas de la mina Bingham Canyon (Kennebecott, Estados Unidos), oxidaban a piritas y sulfuros de cobre, estos organismos fueron identificados como *thiobacillus ferrooxidans* y *thiobacillus thiooxidans* por Bryner y Jameson en 1958, aunque anteriormente ya habían sido considerados como la causa principal de aparición de aguas ácidas contaminantes en las minas de carbón. Se demostró entonces que las *thiobacillus ferrooxidans* oxidaban al azufre libre, al hierro ferroso, a la pirita, a la molibdenita, esta última

en presencia de pirita y varios minerales sulfurados de cobre. Esta observación llevó a la aceptación de la primera patente en este campo, en el cual se reivindicaba un proceso de lixiviación cíclico empleado bacterias acidófilas oxidantes del hierro. Los autores de esta patente eran Zimmerley y Col y los derechos fueron reservados a Kennecott Copper Co.

Las bacterias pueden dividirse en cuatro categorías principales según su fuente de carbono y la forma a través de la cual cumplen con sus necesidades energéticas.

Las bacterias autótrofas tienen la facultad de crecer sólo sobre materiales inorgánicos, utilizando como fuente de carbono el anhídrido carbónico y como fuente de energía la luz del sol (fotosintéticas), o la oxidación de compuestos inorgánicos (quimiosintéticas), en la *Tabla 3*, se muestran condiciones de participación de las bacterias del género *thiobacillus* en el proceso de oxidación de minerales.

**Tabla 3:** Microorganismos activos en la biolixiviación de minerales.

Grupo	Nombre	Características fisiológicas
Mesófilos	Thiobacillus Ferrooxidans	Oxida a: $Fe^{2+}$ , $S^0$ , $S_2O_3^{2-}$ , $U^{4+}$ . Sulfuros metálicos.
	Thiobacillus Thiooxidans	Oxida a: $H_2S$ , $S^0$ y $S_2O_3^{2-}$ , $H_2SO_4$ , no oxida a sulfuros metálicos.
	Leptospirillum Ferrooxidans	Oxida a: $Fe^{2+}$ , pero no a $S^0$
Termófilos extremos	Sulfolobus acidocaldarius	Oxida a: $Fe^{2+}$ y $S^0$ reduce el $Fe^{3+}$ anaerobicamente.
	Acidianus brierleyi	Oxida a: $Fe^{2+}$ , $S^0$ , $MoS_2$ y $CuFeS_2$ , reduce $MoS_2$ anaerobicamente.
Termófilos moderados	Sulfobacillus thermosulfidooxidans	Oxida a: $Fe^{2+}$ y $S^0$ , forma endosporas.

Las autótrofas obligadas utilizan sólo carbono inorgánico y su crecimiento se inhibe, generalmente por la presencia de compuestos orgánicos, por otro lado los autótrofos mixotróficos pueden utilizar tanto las fuentes orgánicas como inorgánicas de carbono, todos los autótrofos incorporan bióxido de carbono en su materia celular.

Entre los microorganismos quimiosintéticos, los *thiobacillus* son importantes al considerar las bacterias que están presentes en el ambiente minero. El organismo *thiobacillus ferrooxidans* es capaz de oxidar sulfuros a sulfatos y a ácido sulfúrico.

El efecto de la temperatura en el crecimiento de los microorganismos esta presente en tres fases, temperatura optima, en esta fase el crecimiento y reproducción son los máximos, en la temperatura mínima es la mas baja para la cual es posible hacer crecer un cultivo y la temperatura máxima es aquella a la cual hay una inhibición debida a interacciones no deseadas con el metabolismo del organismo, en la *Tabla 4*, se muestra cada una de las fases.

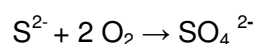
**Tabla 4:** Efecto de la temperatura sobre los principales grupos de microorganismos.

Descripción	Optima	Mínima	Máxima
Psicrófilos	15-20	0	30
<b>Mesófilos</b>	<b>25-40</b>	<b>5-25</b>	<b>43</b>
Termófilos	50-55	25-40	60-90

Muchas investigaciones sostienen la idea que las bacterias solo participan de una forma indirecta en la oxidación de minerales con presencia de sulfuros, otros sugieren que las bacterias están implicadas en el proceso de una manera mucho más directa, esto por el oxígeno que se consume en el proceso de oxidación en sulfuros de hierro, y el control del metal que pasa a solución, esto se atribuye a la presencia de microorganismos quimiolitrotróficas, en los últimos años los investigadores han observado directamente la superficie de los minerales y han tratado de conocer si las bacterias se fijan al sólido o no.

*Mecanismo directo:* En este proceso la bacteria *thiobacillus ferrooxidans* oxida a los sulfuros inorgánicos y a otros compuestos de azufre con valencias reducidas a sulfatos, como se indica en la ecuación 5, siendo además capaz de oxidar al hierro ferroso a férrico.

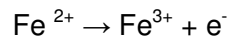
Thiobacillus Ferrooxidans



**Ecuación (5)**

En general los sulfuros metálicos son insolubles en los medios lixiviantes ácidos, mientras los respectivos sulfuros son casi todos insolubles. La oxidación del ión ferroso se representa a través de la ecuación 6.

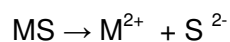
Thiobacillus Ferrooxidans



**Ecuación (6)**

La energía disponible a partir de las reacciones anteriores la utiliza la bacteria para cubrir a su vez todas sus necesidades energéticas, cuando estas oxidaciones se producen a través de interacciones bacteria/substrato en la que toman parte distintas enzimas, entonces se dice que existe un mecanismo directo de actuación del microorganismo.

En la actualidad no se ha definido si es necesario que el microorganismo tenga un contacto físico directo con el sólido, hay quienes piensan que el sustrato debe ser solubilizado de alguna manera antes de que se produzca la oxidación metabólica, en el caso de sustratos sólidos como cuando se atacan sulfuros metálicos, su concentración es sinónimo del tamaño de partícula y del área superficial, puesto que el sólido esta disponible solo en la superficie. En el interior del sólido no se esta expuesto a la actividad bacteriana, hasta que el material más externo haya sido disuelto. En el caso de sulfuros puros de cadmio, cobalto, cobre, níquel y zinc, la velocidad de disolución del metal es proporcional al producto de solubilidad del respectivo sulfuro, esta relación directa sugiere que la bacteria debe permanecer en la superficie del sólido, en el que se presenta la disociación que se muestra en la ecuación 7.



**Ecuación (7)**

De esta manera, el ión azufre ( $\text{S}^{2-}$ ), liberado del sulfuro metálico, es capturado por el sistema enzimático de la bacteria y oxidado a sulfato según la ecuación 5.

Por este proceso se dice que los microorganismos prefieren estar más próximos a la superficie del mineral, esta proximidad asegura el acceso inmediato del microorganismo al sustrato solubilizado, tan pronto como esta disponible en el proceso de disolución, ya que esta es necesaria para la oxidación de los sulfuros metálicos insolubles mejor que la fijación de la bacteria al mineral.

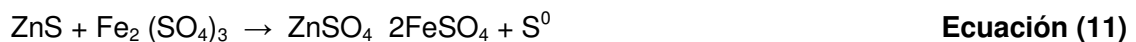
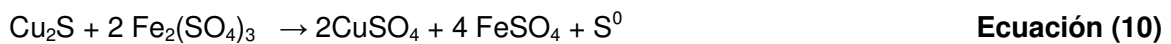
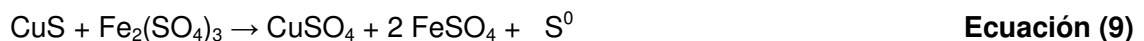
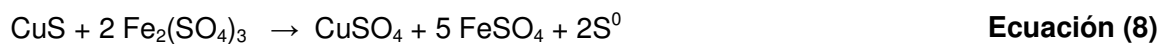
Las investigaciones realizadas por Murry y Berry, referente a definir si los microorganismos tienen un contacto físico directo sobre el sólido se definen a continuación:

- Las observaciones microscópicas avalan un mecanismo de contacto directo para la lixiviación bacteriana.
- Hay evidencias de una fijación preferencial de las bacterias a las fases que contienen hierro y azufre reducido.
- La fijación corresponde a la disolución de hierro y cobre.
- El área superficial es importante en la actividad bacteriana, puesto que un incremento en la superficie de exposición da lugar a una mayor área para dicha fijación
- Existe evidencia de la producción de biomasa en los lugares de fijación.

La fijación selectiva de los microorganismos es muy interesante, aunque muy difícil de comprobar y demostrar, esta fijación la atribuyen a que los microorganismos son atraídos solo hacia las fases del mineral que contienen sustancias oxidables, también se considera que en un inicio los microorganismos se pueden fijar de una forma discriminada sobre la superficie del mineral, pero solo sobreviven aquellas que están sobre sustancias oxidables, muriendo todas las que no están sobre estas sustancias.

*Mecanismos indirectos:* La acción indirecta de solubilización biológica de materiales tiene lugar por la interacción de minerales con productos intermedios o finales del metabolismo de los microorganismos, no hay por tanto reacciones enzimáticas y el agente de lixiviación es el único producto producido o regulado por el organismo.

Esta regulación puede apreciarse en la reacción de oxidación de los sulfuros metálicos como se indica en las ecuaciones 8, 9, 10 y 11, ya que pueden oxidarse químicamente a sulfatos por medio del sulfato férrico sin participación alguna de las bacterias.



Estas reacciones tienen lugar en la naturaleza bajo condiciones normales de lixiviación. El sulfuro ferroso puede ser re-oxidado por las *thiobacillus ferrooxidans*, para que nuevamente el hierro férrico pueda actuar como un agente oxidante. En los procesos de lixiviación indirecta la acción del microorganismo se limita, entonces a la catálisis de oxidación del ión ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ), a ión ferrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ), que por otra parte es una reacción lenta en ausencia de estas bacterias.

El azufre elemental, es oxidado a ácido sulfúrico por la misma *thiobacillus ferrooxidans* y más rápidamente por la *thiobacillus thiooxidans* como se muestra en la ecuación 12.





La rápida producción de ácido por las *thiobacillus thiooxidans* como se muestra en la ecuación 13, bajará el pH durante la lixiviación y acelera el proceso, mejorando además, las condiciones ambientales de vida de las *thiobacillus ferrooxidans*. Adicionalmente los compuestos metálicos solubles en ácido son extraídos como sulfatos.

### **1.2.1.3 FACTORES QUE AFECTAN LA ACTIVIDAD DE LAS BACTERIAS**

Es de suma importancia conocer los factores que intervienen para el desarrollo de las bacterias en el proceso de oxidación.

#### *a) Concentración de iones hidrógeno y potencial*

- La oxidación biológica del ión ferroso y de los sulfuros metálicos dependen de movimientos de protones y de electrones, por tanto el pH y el potencial redox (Eh), tienen un efecto definitivo sobre el metabolismo.
- Las bacterias oxidantes del hierro como las *thiobacillus ferrooxidans*, no crece sobre los iones ferroso ( $Fe^{2+}$ ), a pH mayor de 3, aunque una vez que el crecimiento se ha iniciado, el pH puede incrementarse hasta 5, sin que se inhiba el crecimiento de las bacterias, considerando los valores de pH la bacteria *thiobacillus thiooxidans* es más resistente que la *thiobacillus ferrooxidans* pudiendo vivir a pH hasta 0.5.
- En cuanto al potencial redox (Eh), las bacterias quimioautótrofas están restringidas a un ámbito de vida con unas condiciones oxido reducción intermedia.

#### *b) Nutrientes*

- El nitrógeno amoniacal, el fósforo, el azufre y el magnesio son esenciales para el crecimiento de las *thiobacillus ferrooxidans*. El magnesio es necesario para la fijación del bióxido de carbono y el fósforo se requiere para el metabolismo energético y para las primeras etapas de la oxidación del hierro.

- El azufre es importante al ser un compuesto de algunos aminoácidos necesarios para estas bacterias, junto con los elementos ya mencionados el microorganismo necesita otros elementos aunque de forma minoritaria como potasio y calcio que son vitales para su crecimiento.

c) *Oxígeno y bióxido de carbono*

- La disponibilidad de oxígeno es uno de los principales factores que se requiere en la generación de drenaje ácido de minas por tanto el proceso es considerado aerobio ya que se requiere de este elemento para llevar a cabo la reacción de oxidación, sin embargo estudios recientes han demostrado que las *thiobacillus ferrooxidans*, *thiobacillus thiooxidans* y las *sulfolobus* utilizan al ión férrico y concretamente las *sulfolobus* pueden también utilizar al ión molibdato como aceptor final de electrones.
- En relación al anhídrido carbónico, su solubilidad es baja en soluciones ácidas y, por tanto, puede ser un factor limitante en el crecimiento del microorganismo. La fijación del anhídrido carbónico por las bacterias litotróficas es un proceso de reducción que necesita energía, por tanto, sería termodinámicamente imposible sin la asimilación de energía metabólica.

d) *Temperatura*

- La temperatura es importante en este proceso ya que se establecen rangos óptimos de crecimiento y actuación de los distintos microorganismos en el proceso de oxidación. Para la oxidación de hierro ferroso por las *thiobacillus ferrooxidans* los valores óptimos están comprendidos entre 28 y 35 °C y para la lixiviación de sulfuros metálicos su temperatura óptima es 35 °C.

e) *Tamaño de partícula*

- Los sulfuros metálicos pueden ser oxidados por distintas bacterias, la química de superficies que toman parte en estos procesos aun no se ha estudiado.
- En las suspensiones acuosas de partículas sólidas, los iones que van a ser oxidados son suministrados por la superficie del mineral, la concentración de estos iones está

controlada por muchos factores como son: la solubilidad, las reacciones de hidrólisis, la presencia de electrolitos inertes, la tensión superficial, el potencial redox y el tamaño de partícula o el área superficial del sólido.

- Uno de los principales requisitos para la oxidación de minerales por el efecto de los microorganismos es la disponibilidad del sustrato, la situación ideal se produce cuando dicho sustrato es soluble, como en el caso del sulfato ferroso, con sustratos insolubles es de primordial importancia se disponga del adecuado desarrollo superficial en el sólido.
- En el sustrato sólido los microorganismos no pueden atacar en su interior, hasta que todo el material externo se ha disuelto, por tal motivo la concentración del sustrato esta relacionada con las expresiones del tamaño de partícula, del área superficial específica y del área superficial total por unidad de volumen del medio de lixiviación, sin incrementar la masa de la partícula.
- Cuando se lixivian minerales pobres lo establecido en el apartado anterior no puede ser aplicado, ya que una disminución en el tamaño de partícula, no solo produce mas superficie de mineral, sino también una mayor área superficial en el mineral que es económicamente rentable de lixiviar.

f) *Formación de compuestos insolubles*

En la lixiviación pueden ocurrir tres transformaciones del sólido.

- El sólido puede solubilizarse y el metal obtenido precipitar, desde la solución, como otro compuesto distinto.
- El sólido puede solubilizarse y el metal obtenido quedar en la solución.
- Un ión o molécula de la solución puede entrar en la red cristalina del sólido para formar un nuevo sólido.

Durante la lixiviación bacteriana de sulfuros metálicos se solubilizan grandes cantidades de hierro, que mas tarde pueden precipitar parcialmente y cubrir la superficie de las partículas sólidas, esta capa puede inhibir la acción de los microorganismos.

#### **1.2.1.4 PREDICCIÓN DE DRENAJE ÁCIDO DE MINAS**

Los ensayos analíticos para la predicción de drenaje ácido de minas, pueden ser de la naturaleza estáticos o dinámicos.

Los objetivos de los análisis de predicción de drenaje ácido son:

- Determinar el volumen de generación de drenaje ácido en los residuos mineros.
- Predecir la calidad de los derrames con base a la cinética de formación de ácido mediante la experimentación.
- Determinar la caracterización física, química y fisicoquímica de los residuos mineros.
- Determinar parámetros físicos de los residuos mineros.
- Ensayos para la determinación de predicción de drenaje ácido de minas por métodos estáticos.
- Ensayos para la determinación de predicción de drenaje ácido de minas en procesos de cinética.

### **1.2.1.5 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MUESTRA**

La selección de muestra es muy importante ya que en base a esta se determinará el potencial de generación de drenaje ácido de minas. Las muestras deben ser tomadas de formaciones que permitan la caracterización simultánea, tipo y volumen del material rocoso que será expuesto durante la mineralización.

No existe una opinión única relativamente en el número de muestras que deben ser tomadas, algunos valores referidos en la literatura son de 8 a 12 muestras por cada tipo de roca significativa, o un mínimo de una muestra por cada un millón de toneladas (Schafer, 1993).

Entendiéndose por una formación de roca significativa aquella que presenta por lo menos de 1 al 2 % del volumen total de la roca. Otras opiniones consideran:

- Una muestra de 1500 gramos por cada 20 000 toneladas de residuos, o cercas de 50 muestras por cada millón de toneladas.
- En British Columbia (AMD Task Force), el número de muestras es basado al tamaño de la unidad geológica, recogiendo 24 muestras para una unidad geológica con un millón de toneladas, ó una muestra por cada 40 000 toneladas. A medida que un volumen de residuos aumenta o un número de muestras disminuye, para una unidad de 10 millones de toneladas o un número mínimo de muestras es de 80, o cercas de una muestra por cada 125 000 toneladas.

### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El desarrollo de proyectos de investigación que permita conocer la problemática ambiental que tiene el Sector Industrial Minero, es uno de los vínculos que en la actualidad se comparte con las Instituciones Educativas, por tal motivo en el presente trabajo es desarrollado en la Facultade de Engenharia do Porto, en el área de Minas.

Haciendo hincapié a la identificación de problemas ambientales que éste Sector presenta, en el presente trabajo se estudian los componentes que participan en la generación de drenaje ácido de minas en residuos provenientes de las unidades mineras Panasqueira y Neves Corvo, considerando como iniciativa la aplicación de la técnica de respirometría.

#### **1.3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES MINERAS**

El presente proyecto fue desarrollado en la Facultade de Engenharia do Porto, en el área de Minas, para ello se contempla la participación de las unidades mineras Panasqueira y Neves Corvo, por lo que en los siguientes apartados se describe las generalidades.

##### **1.3.1.1 GENERALIDADES DE LA UNIDAD MINERA PANASQUEIRA**

La unidad minera Panasqueira es operada por su propietario Beralf Tin and Wolfram, S.A. de C.V., que se convirtió en una filial de Primary Metals Inc., en 2004, justo cuando el precio del Tungsteno subía marcadamente.

- La mina Panasqueira se localiza en la Vertiente Sur de la Cordillera Montañosa de la Sierra de Estrela a una altitud cerca de 700 metros, a 300 kilómetros al Norte de Lisboa y a 35 kilómetros de la pequeña ciudad de Fundão.

- El clima es típico de la región montañosa llamada Beiras y de la península Ibérica con temperatura 7.5 °C y 24 °C.
- La producción total mundial en 1999 fue de 40000 toneladas de volframio, de las cuales 3215 toneladas fueron producidas en Europa, 2015 toneladas en Austria y 1200 toneladas en Portugal. La producción europea representa 11.5 % de la producción total mundial de volframio, los mejores productores mundiales son: China con un 75%, Rusia 11%, Corea del Norte 3%, Austria 5%, Portugal 2% y Bolivia 1%.
- El volframio es el metal más notables del mundo, tiene la temperatura de fusión más alta y la más alta resistencia a la tracción a temperaturas a más de 1,650 °C, es usado en un amplia variedad de productos como filamentos para la iluminación, calor, brocas, contactos eléctricos, etc.
- El arranque de operaciones de la unidad minera Panasqueira coincide con las primeras aplicaciones industriales de tungsteno a finales del siglo XIX. La empresa minera fue registrada en 1896 es la primera concesión minera a favor de la Sociedad de Minas de Volframio en Portugal, propiedad de la empresa Almeida Silva Pinto & Comandita.
- La mina Panasqueira es mundialmente conocida por los tamaños y cualidades de sus cristales. Cristales con las características que posee la mina Panasqueira son raros de encontrarse ya que se presentan en la estructura de estaño-tungsteno, siendo su ocurrencia explicada por el ritmo de crecimiento extremadamente lento de cristales que son por baja velocidad de circulación de los fluidos mineralizados en sistemas de filones.
- El coto minero de Panasqueira es uno de los mayores depósitos de volframita del mundo y el mayor yacimiento de Estaño-volframio de la Península Ibérica. Es un depósito de carácter filoniano situado en la parte Centro Occidental de Portugal, es la provincia de Beira Baixa, que se encuadra geotectónicamente en la Zona Centro-Ibérica del Macizo Hespérico.

- Considerando su metalización, estas minas forman parte de una de las provincias metalogénicas de Estaño-Volframio (Sn-W), más importantes de Europa, formando el denominado "Arco del Estaño"
- La generación de residuos mineros como parte del proceso de beneficio de minerales es uno de los problemas ambientales que la industria minera se enfrenta, esto se debe a los grandes volúmenes que se generan, la unidad minera Panasqueira almacena los estériles que se producen de la mina en escombreras, mientras que los que provienen del proceso en embalses, la producción anual de los residuos mencionados pueden consultarse en la *Tabla 5*.

**Tabla 5:** Volúmenes de residuos generados por la unidad minera Panasqueira.

Descripción	Almacenamiento	Volumen
Producción anual de residuos de tratamiento de laboreo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estériles de mina</li> <li>• Estériles de proceso</li> </ul>	311,100 Ton 33,170 Ton
Residuos almacenados		
Río	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estériles de mina</li> <li>• Estériles de proceso</li> </ul>	1200 000 m3 700000 m3
Barroca grande	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estériles de mina</li> <li>• Estériles de proceso</li> <li>• Estériles de proceso (antiguos)</li> </ul>	7500000 m3 670 000 m3 700000 m3

*Fuente:* Inventario Nacional de Residuos Industriales (FEUP 2003).

### 1.3.1.2 GENERALIDADES DE LA UNIDAD MINERA NEVES CORVO

La mina Neves Corvo, perteneciente a la unidad minera de Neves Corvo, S.A., está situada en la zona de Alentejo al sur de Portugal y al Oeste de la denominada Faja Pirítica Iberica (FPI), a 230 Kilómetros al Sureste de Lisboa y a una altura de aproximadamente 200 metros sobre el nivel del mar, su ubicación se indica en la *Figura 1*. La exploración de la unidad



Minera Neves Corvo es hecha por desmonte subterráneo con acceso por rampa descendiente.

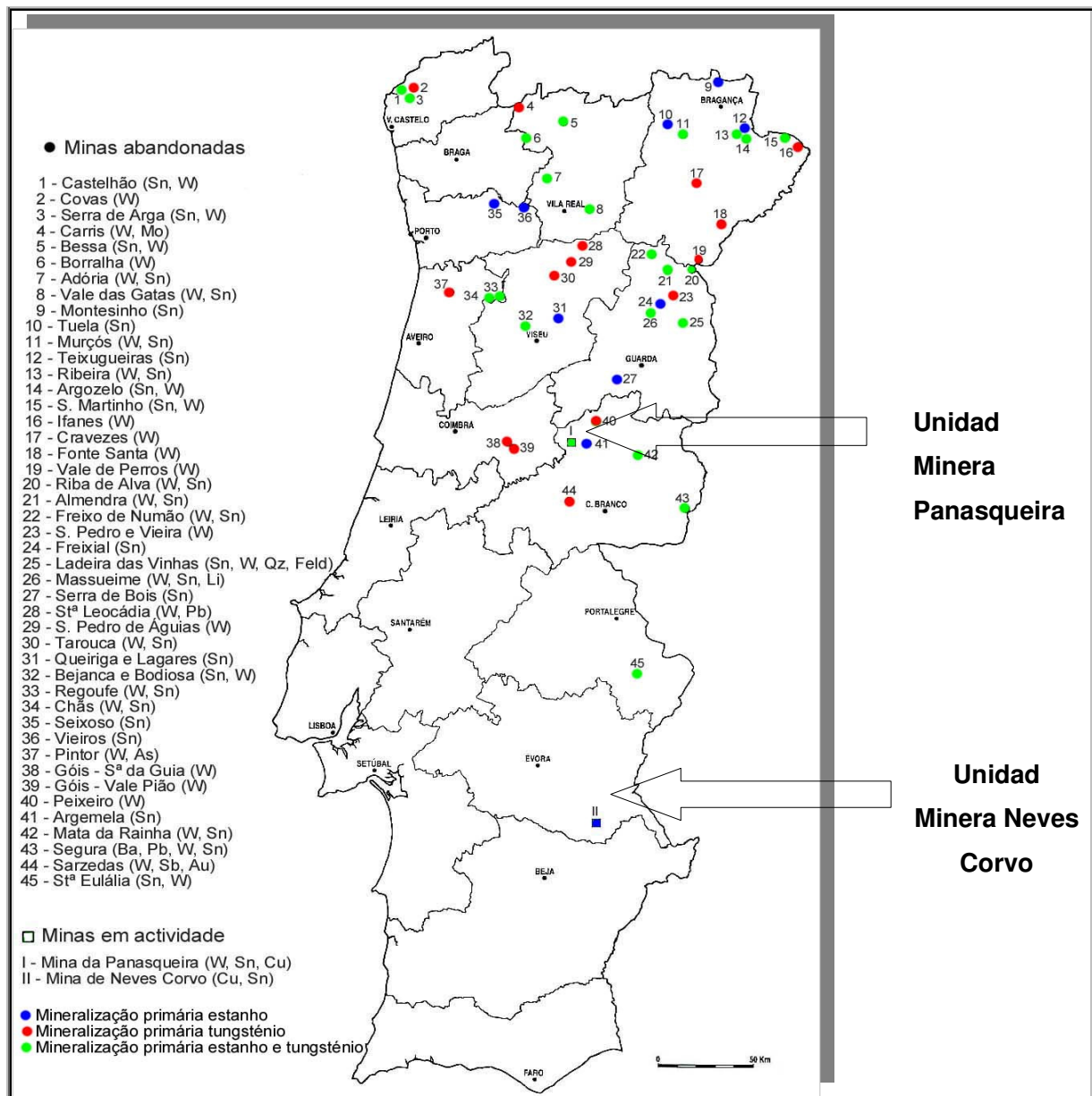
- La unidad minera Neves Corvo, inicia sus operaciones a finales de 1988, 11 años después de ser descubierta, inicialmente produce concentrados de cobre y en 1990 comienza a producir concentrados de estaño. La proyección geológica fue iniciada por el Instituto Geológico Minero (Portugal) y analizada por un consorcio Luso-Francês (Sociedade Mineira de Santiago, S.M.M. Pearroya y SEREM-BRGM), la cual incluía una lista de sondeos registrados en 1977 en el primer yacimiento de Neves Corvo. En 1980 un consorcio dio lugar a Somincor (Sociedade Mineira de Neves Corvo, S.A. de C.V.). En 1985 a RTZ Metals, Ltd (Rio Tinto- Zinc Group) adquirió una parte francesa de Somincor (49%), siendo el restante 51% perteneciente al estado de Portugués a través de la empresa Holding de sector EDM. En 1988 fue descubierto tres importantes yacimientos, Corvo, Graça, y zambujal.
- Desde 1988 hasta finales de 1995 la mina producía 8,7 millones de toneladas de mineral de cobre, con un contenido de 790 000 toneladas de cobre metálico y 2,2 millones de toneladas de mineral de estaño, conteniendo 41, 100 toneladas de estaño, la producción anual es de 1.9 millones de toneladas de mineral de cobre y estaño, existen planes para una futura producción de zinc.
- En el año 2001 al 2003, la unidad minera Neves Corvo fue operada por la empresa canadiense Eurozinc. La empresa Eurozinc había estado operando en Portugal, desde 1994, en primer instancia la compañía se interesó en adquirir el control del proyecto Aljustrel zinc en 1997, todo ese tiempo la compañía Pirites Alentejanas, SA., había estado titulada con la empresa Aljustrel Mining Assets, ya que su inversión fue del 75% por la empresa de Desenvolvimento Mineiro, SA., el Estado invirtió en la compañía minera y el 25 % por otras acciones.

- Los minerales presentes en la unidad minera Neves Corvo son los siguientes:
  1. Sulfuros: Calcosita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), Covellita ( $\text{CuS}$ ), Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), Bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), Cubanita ( $\text{CuFe}_2\text{S}_3$ ), Enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ).
  2. Óxidos: Cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ )
  3. Carbonatos: Malaquita ( $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ ), Azurita ( $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ), Auricalcita ( $(\text{Zn,Cu})_5[(\text{OH})_3\text{CO}_3]_2$ )
  4. Silicatos: Dioptasa ( $\text{CuSi}_2(\text{OH})_2$ ), Crisocola ( $(\text{Cu,Al})_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ ).
- Los minerales sulfurados son tratados por el proceso de flotación, mientras que los óxidos por el proceso de lixiviación.
- Los volúmenes de residuos mineros que se originan en el proceso de extracción y beneficio de minerales son depositados en forma de relaves y en embalses, en la *Tabla 6*, se muestran las cantidades que han sido generadas por la unidad minera Neves Corvo.

**Tabla 6:** Volúmenes de residuos generados por la unidad minera Neves Corvo.

Descripción	Almacenamiento	Volumen (Anual)
Producción anual de residuos de tratamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escombros</li> <li>• Relaves</li> </ul>	292, 196 Ton 1,673 323 Ton
Residuos almacenados en escombreras y embalses	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escombreras</li> <li>• Embalses de relaves</li> </ul>	1,255,185 Ton 16,807,000 Ton

*Fuente:* Inventario Nacional de Residuos Industriales (FEUP 2003).



**Figura 1:** Localización de las minas Panasqueira y Neves Corvo  
Fuente: Inventario de residuos mineros (IGM)

## **1.4 OBJETIVO**

Realizar un estudio de componentes biológicos de la fenomenología de generación de Drenaje Ácido de Minas (DAM), utilizando la técnica de respirometría.

### **1.4.1 OBJETIVOS PARTICULARES**

- a. Determinar el potencial de generación de drenaje ácido de minas, aplicando los métodos analíticos balance ácido base (ABA), balance ácido base modificado y extracción líquida, en residuos provenientes de la Industria Minera
- b. Determinar la cinética de generación de drenaje ácido de minas, aplicando los métodos de cinética: Extracción de lixiviados en columna y extracción de lixiviados en Soxhlet, en residuos de la industria Minera.
- c. Determinar el consumo de oxígeno requerido en la reacción de oxidación en residuos provenientes de la industria minera, aplicando la técnica de respirometría.
- d. Evaluar la participación de los microorganismos en la reacción de oxidación en la generación de drenaje ácido de minas.

## 2 METODOLOGÍA

La metodología que se siguió en el presente estudio contempla los siguientes puntos:

- Obtención de muestra
- Caracterización química de la muestra
- Caracterización física de la muestra
- Evaluación del potencial de generación de drenaje ácido de minas por métodos estáticos y de cinética.

Para los ensayos estáticos y de cinética se contempla la referencia que establece la guía para la evaluación la generación de drenaje ácido que establece la Environmental Protection Agency (EPA).

Cabe mencionar que en el presente trabajo se contempla la aplicación del método de análisis de respirometría, esta técnica permite cuantificar el consumo de oxígeno que se lleva a cabo en la reacción de oxidación de material que es susceptible de generar drenaje ácido de minas, además de evaluar la cantidad de bióxido de carbono que es consumido por los microorganismos que participan como catalizadoras en el proceso de oxidación, ello permitirá tener una mayor referencia en la medición de parámetros que interviene en el proceso de generación de acidez.

Las referencias que fueron consideradas para el desarrollo del presente trabajo, se indican con mayor detalle en la *Tabla 7*.

**Tabla 7:** Metodología en la realización de ensayos.

Descripción de análisis	Referencia
Análisis de metales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los análisis químicos se realizaron en el Laboratorio-biblioteca del Instituto Nacional de Engenharia, Tecnología e Inovação en Porto.</li> <li>• Se realizó una segunda medida en la Universidade do Porto, para realizar un análisis comparativo.</li> <li>• Método de análisis por fluorescencia de rayos X.</li> </ul>
Análisis de granulometría	Laboratorio-biblioteca del Instituto Nacional de Engenharia, Tecnología e Inovação en Porto.
Análisis de extracción de iones en equipo Soxhlet  Análisis de extracción de iones en Columna	Guía para la determinación de Drenaje Acido de Minas. Environmental Protection Agency (EPA).
Análisis de pruebas estáticas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Balance ácido base (ABA)</li> <li>• Balance ácido base (Modificado)</li> <li>• Extracción líquida de ácido</li> </ul>	Guía para la determinación de Drenaje Acido de Minas. Environmental Protection Agency (EPA)
Determinación de humedad.	Universidade do Porto. ASTM D 2216-98
Análisis de óxidos	Laboratório del Instituto Nacional de Engenharia, Tecnología e Inovação en Porto
Determinación de azufre	Laboratorio-biblioteca del Instituto Nacional de Engenharia, Tecnología e Inovação en Porto.  Se realizó una segunda medida en la Universidade do Porto, para realizar un análisis comparativo.
Análisis de respirometría	En la Universidade do Porto,
Análisis de parámetros fisicoquímicos	En la Universidade do Porto.

### **3 PROCESO EXPERIMENTAL**

#### **3.1 SELECCIÓN Y TOMA DE MUESTRA**

En el presente proyecto se considero un solo muestreo y se tomaron de éste las muestras para realizar los ensayos requeridos para determinar las variables que participan en el proceso de oxidación de minerales con sulfuros, para ello se ha considerado aplicar las técnicas de análisis por métodos estáticas y de cinética, en esta ultima se emplea la aplicación de ensayos respirométricos con la finalidad de cuantificar la concentración de oxígeno que se consume en la reacción de oxidación.

Los ensayos propuestos en el presente apartado fueron realizados a residuos provenientes de las unidades mineras Panasqueira y Neves Corvo.

##### **3.1.1 TOMA DE MUESTRA DE LA UNIDAD MINERA PANASQUEIRA**

La muestra que proviene de la unidad minera Panasqueira fue tomada en el mes de mayo por el personal de la unidad minera y fue entregada al personal de la Faculdade de Engenharia Do Porto, para el desarrollo del proyecto de investigación. La muestra permaneció almacenada en un contenedor con capacidad de 20 kilogramos la cuál se muestra en la *Figura 2*, y fue tomada de la descarga del proceso de beneficio que es conducida hacia la presa de almacenamiento de sus residuos mineros.



**Figura 2:** Residuos de la unidad minera Panasqueira

### **3.1.2 TOMA DE MUESTRA DE LA UNIDAD MINERA NEVES CORVO**

La muestra que proviene de la unidad Minera Neves Corvo, fue tomada en el mes de mayo por el personal de la unidad minera y fue entregada al personal de la Faculdade de Engenharia Do Porto, para el desarrollo del proyecto de investigación. La muestra permaneció almacenada en un contenedor con una capacidad de 5 L y fue tomada en la presa dónde son depositados los residuos que provienen del proceso de beneficio de minerales.

## **3.2 ANALITICA**

### **3.2.1 ENSAYOS ESTATICOS**

Los ensayos estáticos determinan simultáneamente a partir de una muestra con capacidad total de generación de drenaje ácido o bien con la determinación del potencial total de neutralización de ese ácido. La capacidad total de generación de acidez es determinada por una diferencia entre estos valores y sus cocientes. Este tipo de ensayos se desarrollan con el objeto de proveer la información base necesaria, referida al potencial de generación de ácido en determinadas muestras. Así es posible establecer el balance entre las especies minerales que producen ácido (sulfurosos) y aquellas que lo consumen (carbonatos, hidróxidos,



silicatos y arcillas). Este ensayo no determina la cinética de generación de ácido si no el potencial de producción.

### **3.2.1.1 BALANCE ÁCIDO-BASE (ABA)**

Las pruebas de balance ácido base (ABA), fueron desarrolladas en el año de 1974 para evaluar los residuos de la industria de carbón y fue modificada por Sobek en 1978.

El potencial de generación de drenaje ácido es determinado a partir de la determinación de azufre total como se muestra en la ecuación 14.

$$AP = 31,25 * \%S \qquad \text{Ecuación (14)}$$

Se considera que todos los moles de ácido serán generados por cada mol de azufre. Las unidades del potencial de acidez (AP), son toneladas de acidez por tonelada de roca. El potencial de neutralización es inicialmente determinado por un ensayo simple de efervescencia como se indica en el siguiente procedimiento.

El potencial neto de neutralización (NNP), se determina substrayendo del potencial de acidez (AP), al potencial de neutralización (NP), que es una medida de diferencia entre los potenciales de neutralización de generación de acidez. Los valores pueden ser positivos o negativos. Los valores inferiores a **20** (kilogramos CaCO<sub>3</sub>/Tonelada de roca), son presumibles generadores de drenaje ácido. Los valores superiores a **20** indican una capacidad de no generación de drenaje ácido. Para valores entre **-20 y + 20** es difícil predecir el potencial de generación de drenaje ácido. En la Tabla 8, se muestra el procedimiento que detalla la metodología de la técnica de análisis.

La mayor parte de los minerales que no son sulfuros, reaccionan en extensión variable con un ácido generado, provocando su consumo, por tanto contribuye para el Potencial de Neutralización (PN), el cual es cuantificado por el consumo de acidez originado por el carbonato de calcio, la reacción que se presenta en este proceso se describe en la ecuación 15.



Cada mol de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), neutraliza 2 moles de  $\text{H}^+$  por tanto 1 mol de carbonato de calcio es aproximadamente 1 mol de azufre, es una razón entre las masas moleculares respectivas, en la ecuación 15 se muestra la reacción que se da en el proceso, por lo que 100 para 32, se tiene da  $100/32=3,125$ , por lo que indica que 1 gramo de azufre equivale a 3,125 gramos de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Si el azufre es determinado analíticamente en porcentaje, entonces el potencial de generación de ácido equivale a expresarse en kilogramos  $\text{CaCO}_3$  ton-1, por tal razón se expresa en  $31,25 * \%S$ .

**Tabla 8:** Metodología de la técnica de análisis ABA.

Descripción	Reactivos	Material y equipo
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Se pesan 500 mg de muestra (residuo).</li><li>2. Se coloca el residuo en un vaso de precipitado de 50 mL .</li><li>3. Se adicionan 20 mL de ácido clorhídrico al 1N.</li><li>4. Se filtra la solución para retirar los sólidos presentes.</li><li>5. A la solución filtrante se le adicionan tres gotas de indicador métil rojo.</li><li>6. Se coloca la solución patrón de hidróxido de sodio en bureta de 25 mL</li><li>7. Se realiza la titulación de la muestra hasta llegar a obtener un pH de 7.0.</li><li>8. Se calcula la concentración de carbonato de Calcio utilizando la ecuación 13.</li></ol>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ácido clorhídrico HCl al 1N.</li><li>• Solución de hidróxido de sodio al 1N.</li><li>• Indicador métil rojo al 5%</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vaso de precipitado de 100 mL</li><li>• Bureta de 25 mL</li><li>• Potenciómetro</li><li>• Conductiméetro</li></ul>

### **3.2.1.2 BALANCE ÁCIDO-BASE MODIFICADO**

Este método es semejante al balance ácido base (ABA), con algunas excepciones. La determinación del potencial de neutralización (NP), se determina con una digestión ácida en la que se utiliza ácido clorhídrico al 1 N, con un periodo de tiempo de reacción de 24 h, a temperatura ambiente, para determinar el consumo de ácido en la digestión se realiza a través de una valoración de titulación con hidróxido de sodio al 1N, hasta obtener un pH terminal de 8.3 en vez de 7. En la *Tabla 9*, se muestra el procedimiento detallado para este ensayo.

**Tabla 9:** Metodología de la técnica de análisis ABA modificado.

Descripción	Reactivos	Material y equipo
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Se pesa 500 mg de muestra (residuo).</li><li>2. Se coloca la muestra en Vaso de precipitado de 100 mL.</li><li>3. Se adicionan 20 mL de ácido clorhídrico al 1N.</li><li>4. Se considera un tiempo de reacción de 24 h.</li><li>5. Se filtra la solución para retirar los sólidos presentes</li><li>6. A la solución filtrante se adiciona tres gotas de indicador fenoftaleína.</li><li>7. Se coloca la solución patrón de hidróxido de sodio en bureta de 25 mL.</li><li>8. Se realiza la titulación de la muestra hasta llegar a obtener un pH de 8.2.</li><li>9. Se calcula la concentración de carbonato de calcio utilizando la ecuación 13.</li></ol>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ácido clorhídrico HCl al 1N.</li><li>• Solución de Hidróxido de Sodio al 1N.</li><li>• Indicador fenoftaleína.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vaso de precipitado de 100 mL.</li><li>• Bureta de 25 mL.</li><li>• Potenciómetro.</li><li>• Conductímetro</li></ul>

### **3.2.1.3 ENSAYOS POR PRODUCCIÓN LÍQUIDA DE ÁCIDO**

En este ensayo se utiliza peróxido de hidrógeno para acelerar la oxidación de los sulfuros. Se considera para el presente ensayo 5 gramos de muestra los cuáles se colocan en 100 mL de solución de peróxido de hidrógeno preparado al 15% para oxidar los sulfuros metálicos. En este ensayo se considera un tiempo de reacción de 2 h, el pH terminal es 7, obteniendo así un balance líquido de ácido con el potencial de neutralización de la muestra.

Este ensayo es diferente a los demás ensayos estáticos ya que se lleva a cabo la simulación simultánea de reacciones de generación de neutralización obteniendo un único valor de potencial neto de neutralización (NNP). En la *Tabla 10*, se muestra el procedimiento detallado para este ensayo.

**Tabla 10:** Metodología para determinar la producción líquida de ácido.

Descripción del procedimiento	Reactivos	Material y equipo
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se pesan 5 gramos de muestra (residuo).</li> <li>2. Se coloca la muestra en un vaso de precipitado de 100 mL.</li> <li>3. Se adicionan 100 mL de solución de peróxido de hidrógeno al 15%.</li> <li>4. Se considera un tiempo de reacción de 2 h.</li> <li>5. Se filtra la solución para retirar los sólidos presentes.</li> <li>6. A la solución filtrante se adiciona tres gotas de indicador métil rojo.</li> <li>7. Se coloca la solución patrón de hidróxido de sodio en bureta de 25 mL.</li> <li>8. Se realiza la titulación de la muestra hasta llegar a obtener un pH de 8.2.</li> <li>9. Se calcula la concentración de carbonato de calcio utilizando la ecuación 13.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>a) Peróxido de sodio al 15%.</li> <li>b) Solución de Hidróxido de Sodio al 1N.</li> <li>c) Indicador métil rojo.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>a) Vaso de precipitado de 100 mL.</li> <li>b) Bureta de 25 mL.</li> <li>c) Potenciómetro.</li> <li>d) Conductimetro.</li> </ol>

La cuantificación del material que consume la acidez por las muestras provenientes de la unidad minera Panasqueira y Neves Corvo, es realizada, determinando la cantidad de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), presente en la muestra, para ello se aplica la ecuación 16.

**Cálculos:**

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

***Ecuación (16)***

Dónde:

$C_1$  = Concentración de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), en meq/ mL

$V_1$  = volumen de hidróxido de sodio (NaOH), gastado en la titulación

$C_2$  = Concentración de ácido clorhídrico (HCl)

$V_2$  = volumen de ácido clorhídrico (HCl)

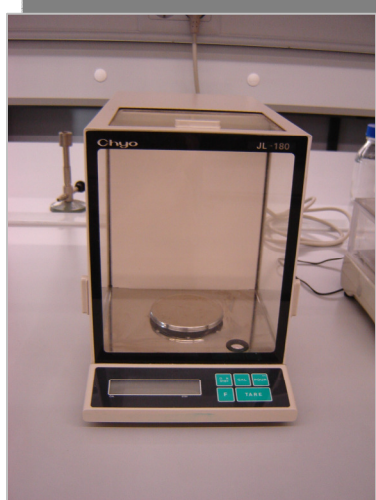
Los resultados obtenidos por los métodos estáticos se pueden consultar con mayor detalle en el *Anexo A*, del presente estudio.



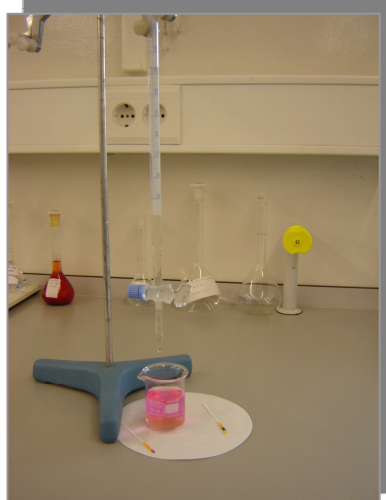
### 3.2.1.4 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS UTILIZADOS EN ANÁLISIS ESTÁTICOS

El equipo utilizado para la realización de predicción de drenaje ácido de minas por ensayos estáticos se muestra en las *Figuras 3, 4 y 5*.

#### MATERIAL Y EQUIPO



**Figura 3:** Balanza analítica



**Figura 4:** Valoración titulométrica



**Figura 5:** Medición de parámetro pH

La medición del parámetro pH fue medido con un potenciómetro marca inoLab Level 1, las especificaciones técnicas se describen en la *Tabla 11*.

**Tabla 11:** Especificaciones técnicas del potenciómetro.

<b>DESCRIPCIÓN</b>		
<b>TEMPERATURA AMBIENTE</b>	• De almacenamiento	-25 °C a 65 °C
	• De Funcionamiento	0 °C + 55 °C
	• Humedad relativa admisible	Promedio anual: <75% 30 día/año: 95% Días restantes: 85%
<b>RANGO DE MEDICIÓN Y RESOLUCIÓN</b>	• pH	
	• Temperatura ° c	-5,0 a 100,0
<b>EXACTITUD</b>	• pH	<i>Exactitud ± 0,005 %.</i>
	• Temperatura ° c	<i>Exactitud ± 0,1</i>

### **3.2.2 ENSAYOS CINÉTICOS**

Los ensayos cinéticos presentan las siguientes características:

- Pretenden simular las condiciones de generación de drenaje ácido evaluando la velocidad de generación. Estas pruebas de tipo geoquímicas, someten a las muestras a variables de intemperismo simuladas en laboratorio y permiten predecir las velocidades de reacción para la etapa de disolución de metales como para la neutralización y generación de ácido y lixiviación. Ello, es de extremada utilidad cuando se desea definir el inicio de las acciones de control sobre el drenaje ácido de minas. Las pruebas cinéticas, permiten predecir con más exactitud las tasas de neutralización y oxidación, entre las pruebas cinéticas de mayor recurrencia se encuentran: frasco de agitación, de extracción, celdas húmedas, columna de humedad, lixiviación en columna y parcelas de prueba de campo.
- Se distingue de los ensayos estáticos en la medida en la que también simulan las reacciones de oxidación natural que ocurre en el campo. Estos ensayos utilizan grandes volúmenes de muestra y su tiempo de ensayo es más prolongado que los ensayos estáticos. Por otro lado fortalecen información relativa a la cinética de oxidación de los sulfuros es por tanto la producción de ácido, el cuál es indicado a través de la medición de parámetros en los lixiviados que se obtiene en cada una de los ensayos, en la *Tabla 12*, se describen algunos factores que deben ser considerados en la predicción de drenaje ácido de minas.
- Simulan la erosión geoquímica utilizando para ellos un equipo de extracción de Soxhlet para recircular una solución a través de la muestra. Se utilizan dos métodos en esta técnica descrito por Singleton y Levkulich (1978), en el que la muestra es

lixiviada utilizando una solución de ácido acético al 70 % con agua destilada por un periodo de tiempo de 6 semanas. Esta técnica fue modificada por Sobek (1978), en la que sólo se utiliza agua destilada a 25 °C.

- En este ensayo se coloca la muestra sólida en el matraz y se adiciona agua destilada como principal disolvente, manteniéndose a una temperatura constante de 100 °C, esto con la finalidad de generar vapor que a su vez asciende por el tubo lateral y condensan en el refrigerante, en la *Tabla 13*, se especifica la metodología para este ensayo.

**Tabla 12:** Factores y condiciones en la predicción de drenaje ácido de minas.

<b>Factores</b>	<b>Componentes que afectan a la generación de DAM.</b>	<b>Componentes que afectan la cinética en la generación de DAM</b>
<p>1. El primero es como recoger las muestras en campo para realizar los ensayos analíticos.</p> <p>2. El segundo es la selección del método de análisis que se va a utilizar.</p>	<p>1. Cantidad de minerales que generan ácido (Sulfatos) presentes, se debe de asumir una reacción total de sulfuros.</p> <p>2. Cantidad de minerales neutralizadores de ácido presentes.</p> <p>3. Cantidad de tipo de contaminantes potenciales presentes.</p>	<p>1. Tipos de sulfuros presentes (incluyendo su forma cristalina).</p> <p>2. Tipo de minerales con contenidos de carbonatos presentes área del mineral superficial disponible en la reacción son:</p> <p>a) Ocurrencia de grandes minerales de residuos</p> <p>b) Granulometría del residuo</p> <p>3. Agua y oxígeno disponible</p> <p>4. Bacterias</p>

### 3.2.2.1 EXTRACCIÓN DE IONES EN EQUIPO SOXHELET

**Tabla 13:** Metodología en la extracción de iones por Soxhelet.

#### **Material y equipo**

Equipo de extracción Soxhelet

Potenciómetro

Conductímetro

Balanza analítica

Vaso de precipitado de 50 mL.

Termómetro

#### **Metodología**

- Colocar 300 mL de agua destilada en el matraz volumétrico de 500 mL
- Colocar 150 gramos de muestra.
- Fijar el controlador de temperatura a 100 C.
- Se considera un tiempo de reflujo de 24 h.
- Se extrae muestra para la medición de parámetros como: pH, conductividad, sólidos disueltos totales, salinidad y temperatura.
- Se deja 24 h, en reflujo y se miden nuevamente los parámetros descritos en el punto anterior.
- Se registra su lectura en bitácora.



**Figura 6:** Residuos de la unidad minera Panasqueira.



**Figura 7:** Residuos de la unidad minera Neves Corvo.

### **3.2.2.2 EXTRACCIÓN DE IONES EN COLUMNA**

Los ensayos en columna se realizan con la finalidad de conocer la presencia de iones solubles en agua presentes en una muestra sólida, para ello se coloca la muestra estimada en una columna, se adiciona un volumen de agua y se recuperan sus lixiviados, se realiza una medición de parámetros fisicoquímicos como son: conductividad, total de sólidos disueltos, salinidad, temperatura y pH, en los lixiviados obtenidos, esto con la finalidad de conocer la presencia de iones solubles, en la muestra sólida que se contempla en este ensayo, esta medición se realiza al inicio y al final del proceso de experimentación con la finalidad de conocer por diferencia la concentración de los elementos metálicos que fueron lixiviados en el proceso de lavado.

Los ensayos en columna se pueden visualizar en las *Figura 10* y *Figura 11*, la muestra que se colocó en cada una de ellas, corresponde a residuos de las unidades mineras Panasqueira y Neves Corvo.

El procedimiento de trabajo que se siguió para este análisis se describe detalladamente en la *Tabla 14*.

En esta prueba se considero la identificación de elementos metálicos al inicio del proceso y al final de este, con la finalidad de identificar los elementos que fueron lixiviados. Los ensayos fueron realizados en la Faculdade de Engenharia do Porto, en el área de Minas, para ello se utilizó la técnica de análisis de fluorescencia de rayos x, como puede apreciarse en las *Figura 8* y *Figura 9*, de igual manera sus resultados se indican en la *Tabla 19*.

**ENSAYOS DE ELEMENTOS METALICOS**



**Figura 8:** Calibración en equipo de fluorescencia de rayos x.



**Figura 9:** Análisis por fluorescencia de rayos x.

Para los ensayos de elementos metálicos como se observa en la *Figura 8* y *Figura 9*, se realizó una serie de lecturas con el equipo de Fluorescencia de rayos X, los ensayos se realizaron al inicio y al final de la experimentación, esto con la finalidad de conocer que elementos fueron solubilizados y extraídos del sólido en sus lixiviados, los resultados pueden consultarse en la *Tabla 19*, del presente estudio.



**Tabla 14:** Metodología en la extracción de lixiviados en columna.

<p><b>Extracción en Columna:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Se colocó una muestra de 150 gramos de muestra en columna.</li><li>• Se colocó 250 mL de agua destilada Se colocó algodón en la parte inferior de la columna con la finalidad de retener la presencia de sólidos disueltos.</li><li>• Se deja el agua en la columna por un periodo de tiempo de 3 días.</li><li>• Al finalizar los tres días con agua, se retira de la columna y es analizada.</li><li>• Los parámetros que se analizan al agua que es retirada de las columnas es: temperatura, pH, total de sólidos disueltos, conductividad y salinidad.</li><li>• Los resultados se muestran en el <i>Anexo B</i>, del presente documento.</li><li>• Una vez extraída el agua de la columna y analizada se deja tres días sin agua y posteriormente se llena nuevamente.</li><li>• El ciclo descrito en el apartado anterior es aplicado hasta observar la generación de drenaje ácido de minas.</li></ul>	<p><b>Material y equipo</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• La columna cuenta con las siguientes dimensiones: Longitud 40 cm Diámetro de 3 cm</li><li>• Potenciómetro.</li><li>• Conductímetro.</li><li>• Algodón.</li></ul>
---	--

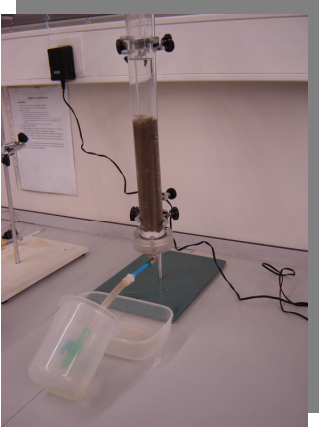
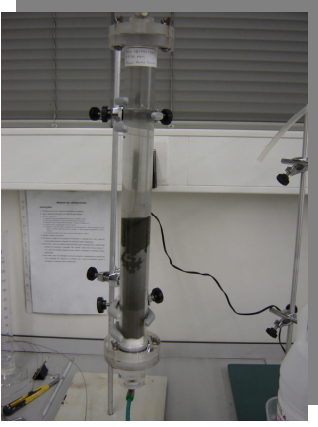
Las especificaciones técnicas del potenciómetro se describen en la *Tabla 11*, mientras que las del conductímetro se especifican en la *Tabla 15*.

**Tabla 15:** Especificaciones técnicas del conductímetro

DESCRIPCIÓN		
<b>TEMPERATURA AMBIENTE</b>	• De almacenamiento	-25 °C a 65 °C
	• De Funcionamiento	0 °C + 55 °C
	• Humedad relativa admisible	Promedio anual: <75% 30 día/año: 95% Días restantes: 85%
<b>RANGO DE MEDICIÓN Y RESOLUCIÓN</b>	• Conductimetría (µS/cm)	0,000 a 1,999
	• Salinidad	0,0 a 70,0
	• Total de Sólidos Disueltos (mg/L)	0,0 a 1999.
	• Temperatura °C	-5,0 + 100,0
<b>EXACTITUD</b>	• Conductimetría (µS/cm)	Exactitud ± 0,5 %.
	• Salinidad	Rango de: 0,0 a 42,0 Exactitud Temperatura a medir ± 0,1 5 a 25 °C ± 0,2 25 a 30 °C
	• Total de Sólidos Disueltos (mg/L)	1
	• Temperatura (°C)	Exactitud ± 0,1

En la *Figura 10*, se muestra la columna que se utilizó para iniciar los ensayos que permitirán evaluar la cinética de generación de drenaje ácido de minas en residuos de la unidad minera Panasqueira.

De la misma manera la *Figura 11*, muestra el proceso en columna para la evaluación de la cinética de generación de drenaje ácido de mina considerando los residuos de la unidad minera Neves Corvo.

<b>ENSAYOS DINÁMICOS EN COLUMNA</b>	
	
<b>Figura 10:</b> Residuos en columna de la unidad minera Panasqueira.	<b>Figura 11:</b> Residuos en columna de la unidad minera Neves Corvo.

Otro de los parámetros que fue considerado medir en los residuos que se extrajeron de las columnas fue la humedad retenida por los residuos en las columnas, para ello se considero la referencia de la Norma ASTM D 2216-98, para ello se siguió la siguiente metodología:

Se puso a secar 100 gramos de muestra a una temperatura de 105°C, con un tiempo de 24 horas, esto con la finalidad de determinar el porcentaje de humedad presente en la muestra,

una vez concluido el tiempo se dejó enfriar a temperatura ambiente, la humedad se determinó por diferencia de pesos, los resultados para cada uno de los residuos puede consultarse en el siguiente apartado:

- La muestra de la unidad minera Panasqueira registró una humedad de 37.8%
- La muestra de la unidad minera Neves Corvo registró una humedad de 42.71%

Los resultados obtenidos por los métodos de cinética (extracción de iones utilizando el equipo Soxhlet y en columna), se pueden consultar con mayor detalle en el *Anexo B*, del presente estudio.

### **3.2.2.3 RESPIROMETRIA**

La respirometría es una técnica basada en la medición del consumo de oxígeno requerido para llevar a cabo el proceso de oxidación de un substrato que es predecible de generar drenaje ácido de minas. La medición del consumo de oxígeno permitirá evaluar la cinética de oxidación en residuos proveniente de la industria minera, además de evaluar la participación de los microorganismos del genero *thiobacillus thiooxidans* que actúan como catalizadoras en la reacción de oxidación en la generación de drenaje ácido de minas.

La respirometría es utilizada para una gran variedad de técnicas de medición asociadas con el ambiente, biología y biotecnología, en las que destaca la medición de la concentración de oxígeno requerido para la conservación de alimentos, consumo de oxígeno por insectos, tejidos, medición de oxígeno disuelto en aguas residuales, se ha utilizado también en suelos contaminados por hidrocarburos y compuestos orgánicos policíclicos, cuantificando el consumo de oxígeno requeridos por los microorganismos que participan en el proceso de descontaminación de suelos contaminados, como iniciativa en el presente trabajo se encuentra su aplicación para cuantificar el consumo de oxígeno que se presenta en el proceso de oxidación en residuos proveniente de la industria minera.

Esta técnica tiene sus primeras referencias a finales del siglo XIX, cuando Adney desenvuelve un aparato manométrito para observar la velocidad de absorción del oxígeno en el agua fluida, este método se vio mejorado con la contribución de WARBURG en 1924 y por SIERP en 1928, permitiendo una medida continua de la tasa de utilización de oxígeno, sustituyendo al método de análisis en la determinación de la demanda de oxígeno disuelto al quinto día en efluentes.

En 1964 LAMB y colaboradores utilizaron métodos no manométritos en la determinación de la demanda de oxígeno al quinto día en efluentes.

La utilización de respirómetros de presión y de electrodos en la determinación de la demanda de oxígeno al quinto día en efluentes, se inicio a mediados del siglo XX.

GAUDY y colaboradores en 1988 presentaron una metodología detallada para determinar constantes de cinética a partir de datos de respirometría.

La respirometría ahorra el tiempo y el trabajo asociado con los experimentos de agotamiento de sustratos y provee puntos de referencia de alta calidad para la valoración de parámetros biocinéticos.

La medición del consumo de oxígeno en la cinética de oxidación de muestras que son susceptibles de generar drenaje ácido de minas, es posible cuantificar aplicando la técnica de respirometría.

La importancia de aplicar esta técnica para determinar la cinética de oxidación en residuos que provienen de la Industria minera y que son susceptibles de generar drenaje ácido, permitirá obtener una evaluación con mas fundamentos técnicos que permitan predecir la cinética de generación de drenaje ácido de minas, además de evaluar la participación de los microorganismos del genero *thiobacillus*, esto permitirá aplicar las medidas preventivas necesarias para minimizar el impacto ambiental que pueda presentar a futuro la presencia de lixiviados ácidos.

Por tal motivo en el presente proyecto de investigación se ha considerado como inicio de investigación el aplicar la técnica de respirometría considerando residuos mineros provenientes de la unidad minera Panasqueira.

Como primera fase, la muestra de residuos de la unidad minera Panasqueira se determinó el potencial de generación de drenaje ácido de minas, el cual se realizó aplicando la metodología que se indica en las *Tablas 8, 9 y 10*, de la misma manera los resultados de estos ensayos se pueden consultar en el *Anexo A*.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la evaluación del potencial de generación de drenaje ácido de minas, la muestra de la unidad minera Panasqueira es potencialmente generadora de drenaje ácido, por tal razón se ha considerado evaluar la cinética de oxidación aplicando la técnica de respirometría, esto ayudara a conocer de manera mas especifica la cinética de oxidación, además de considerar los resultados de los ensayos de granulometría que los indican la superficie disponible en la reacción de oxidación.

Otro de los ensayos que se analizó fue la identificación de metales presentes, para ellos se registraron 32 elementos metálicos, los resultados pueden consultarse en la *Tabla 18*, éste análisis se realizó por la importancia de cuantificar la concentración de metales presentes en la muestra y, conocer cuales de ellos se solubilizan en medios ácidos.

La determinación de óxidos metálicos presentes en la muestra, fue otro de los ensayos que fue considerado en la muestra de residuos de Panasqueira, esto con la finalidad de conocer los óxidos presentes, así como su cantidad, también se determinó la cantidad de azufre, ya que como se ha mencionado en el desarrollo de este proyecto, la participación de microorganismos en el proceso de oxidación toman su principal fuente de energía del ión ferroso y de compuestos de azufre elemental, además de ser importante cuantificarlo para calcular el potencial neto de neutralización y definir con ello, si la muestra es potencialmente generadora de drenaje ácido.

Los ensayos de granulometría son de suma importancia, ya que con éste parámetro se conoce el tamaño de partícula que presenta la muestra que se ha sometido al proceso de respirometría, ya que es importante considerar la superficie de reacción que esta disponible en el sólido y que aprovecharan los microorganismos del genero *thiobacillus* que se desarrollen en el proceso de oxidación.

Conociendo los parámetros antes mencionados, se procedió a realizar los análisis de respirometría el cual se considero para ello, una muestra de 300 gramos de residuo y 300 mL de agua de lluvia, esta última se caracterizo determinando parámetros de: conductividad,

total de sólidos disueltos, salinidad, temperatura y pH, los resultados obtenidos se muestran en la *Tabla 24*.

Para los análisis de respirometría se requirieron los siguientes reactivos:

Gel de Silicio:

- Es un tipo amorfo de silicio el cual es fabricado con sodio de silicato y ácido sulfúrico.
- Es un mineral que surge de la naturaleza y es purificado y procesado en forma granular, es químicamente inerte y no es corrosivo.
- Al igual que una esponja, los poros interconectados del gel de silicio forman una superficie que atrae y absorbe agua y vapor, permitiendo que el gel de silicio absorba cerca de 40% de su peso en vapor de agua al estar al 100% de capacidad.
- Atrae humedad a temperaturas hasta 104 °C. Al paso que la temperatura incrementa sobre 38°C, el ritmo el cual absorbe la humedad va disminuyendo aunque el gel de silicio siga trabajando. El gel de silicio funciona mejor en temperaturas ambientales entre 21 °C a 32°C y en humedad relativa entre 60% y 90%.
- Es un gránulo lavado en una concentración de cloruro de cobalto. El cloruro de cobalto es azul oscuro cuando se seca y cambia de azul a púrpura y finalmente a rosa al paso que se satura con humedad.

*Drierite:*

- En combinación con el gel de sílice es de igual manera utilizado para captar la humedad que contenga el flujo de aire que es alimentado del medio ambiente, la saturación es indicada por un cambio de color de azul a rosa, este cambio indica que el material contiene un 5% de humedad y representa el cambio del material. La drierite es reactivada para ser usada nuevamente retirando la humedad captada del medio ambiente, esta es realizada exponiendo el material a una temperatura de 230 °C, por un periodo de tiempo de 2 h., de esta manera se obtienen una deshidratación total del material y puede ser utilizado nuevamente en el proceso, la drierite esta compuesta por 96%  $\text{CaSO}_4$  y 4%  $\text{CaCl}_2$



*Ascarite* (sosa cáustica):

- Este es utilizado para absorber el bióxido de carbono que se encuentra presente en el flujo de aire después de haber pasado por el analizar de bióxido de carbono, cada kilogramo de ascarite absorben de 200 a 300 ppm de bióxido de carbono.

### **3.2.2.3.1 METODOLOGÍA APLICADA EN EL PROCESO DE RESPIROMETRIA**

Después de una serie de pruebas experimentales el día 20 de diciembre de 2006, se inicia con los ensayos de respirometría en la que se sigue la siguiente metodología:

- Se coloca en la columna (longitud de 24.5 cm y diámetro de 7 cm), material drierite y gel de sílice, como se muestra en la *Figura 12*, tiene la finalidad de atrapar la humedad que contiene el flujo de aire que es alimentado del ambiente y se hace pasar por éste material.
- El flujo de aire que sale de la columna es extraído con la utilización de una bomba la cual se muestra en la *Figura 15* y alimentado al medidor de flujo, con la finalidad de controlar la entrada de aire, para este ensayo se ha considerado un flujo de aire del 15% el cual corresponde a un flujo de entrada de 150 ml/min.
- Siguiendo con el proceso el flujo es alimentado a los canales de alimentación y este conduce la alimentación a los reactores tipo batch en los cuales se colocó 300 gramos de residuos provenientes de la unidad minera Panasqueira y se adicionó 300 mL de agua de lluvia la cual fue caracterizada previamente, los resultados se muestran en la *Tabla 24*, en esta etapa el flujo de aire tiene la finalidad de disponer el oxígeno que participa como agente oxidante en la reacción de oxidación, además de disponer del bióxido de carbono que será requerido por los microorganismos del genero *thiobacillus thiooxidans*.

- Una vez que el flujo de aire sale de la columna es alimentado a un condensador con la finalidad de obtener la humedad que pudiera contener el flujo de aire que sale del reactor.
- Posteriormente el flujo se conduce al analizador de bióxido de carbono, este equipo esta conectado a una computadora la cual cuenta con la instalación del software MatLab para procesar los datos registrados.
- Una vez que el flujo de aire ha pasado por el analizador de bióxido de carbono el flujo es conducido a una segunda columna la cual se muestra en la *Figura 13*, la cual contiene un desecante Moisture-Gone™, esta ultima es utilizada para absorber la humedad que pudiera contener el flujo de aire antes de entrar al analizador de bióxido de carbono.
- Posterior mente el flujo de aire es conducido al analizador de bióxido de carbono con la finalidad de registrar la medición, ver *Figura 18*
- Una vez que se ha realizado la medición de bióxido de carbono, el flujo de aire es conducido a una tercera columna, la cual contiene ascarite, este material es utilizado para retirar el bióxido de carbono presente en el flujo de aire.
- Siguiendo con el proceso el flujo es alimentado al analizador de oxigeno para cuantificar la concentración de oxigeno y registrar su lectura, ver *Figura 18*.
- Las lecturas registradas en el analizador de bióxido de carbono y oxigeno son conducidas hacia una computadora, el cual cuenta con la instalación del Software MatLab para procesar las lecturas.
- Finalmente el flujo que sale del analizador de oxigeno es liberado hacia el medio ambiente, este proceso se mantiene constante, ya que el equipo trabaja de manera automática con mediciones continuas.

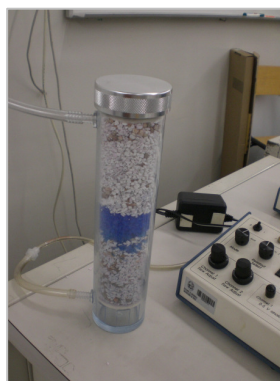
En la *Tabla 16*, se muestran las variables que fueron consideradas en los análisis de respirometría.

**Tabla 16:** Parámetros considerados en los análisis de respirometría.

Variable	Cantidad
Flujo constante 15%	150 ml/min
Concentración de bióxido de carbono en el ambiente (Presión a 1 Atmósfera).	1%
Humedad relativa promedio en Oporto	40 a 100 %
Recuperación de humedad en condensador (mes)	40 ml
Consumo de drierite	500 g/mes
Consumo de gel sílice	300 g/mes
Consumo de ascarite	200 g/mes

*Descripción de equipo utilizado en los ensayos de respirometría*

La columna que se presenta en la *Figura 12*, cuenta con las siguientes dimensiones: longitud: 24.5 cm., diámetro: 7 cm. Se coloca material drierite y gel de sílice con la finalidad de extraer la humedad que contenga el flujo de aire que es obtenido del ambiente.



**Figura 12:** Columna con Drierite

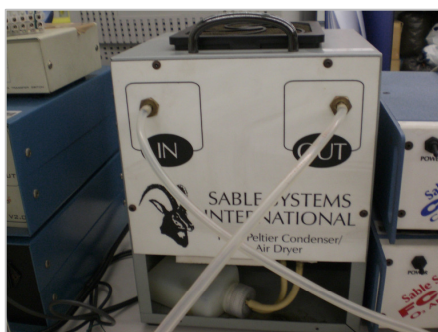
En la *Figura 13*, se muestra una segunda columna que tiene también la finalidad de retirar la humedad, esta contiene material deshidratante Moisture-Gone™ sus dimensiones son: Longitud 10 cm., diámetro: 1 cm, esta columna es requerida para retener la humedad contenida en el flujo de aire que sale del reactor para ser conducida al condensador.



**Figura 13:** Columna con Moisture-Gone™

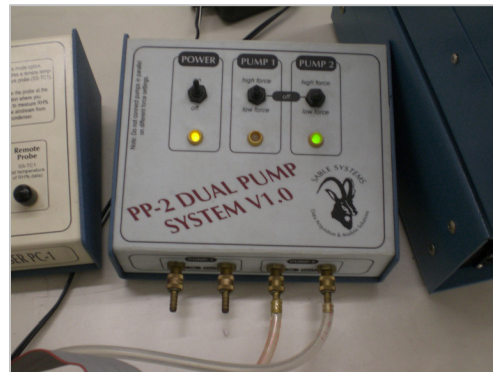
En la *Figura 14*, se muestra el condensador SABLE SYSTEMS INTERNATIONAL que forma parte de la instrumentación que se requiere en los análisis de respirometría, éste tiene la finalidad de recuperar por el proceso de condensación la humedad que aun pueda contener el flujo de aire que es conducido al analizador de bióxido de carbono para su análisis.

En un periodo de análisis de un mes, se obtuvo un volumen de agua por el condensador de 42 ml.



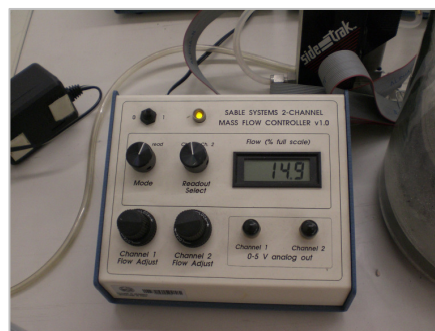
**Figura 14:** Condensador

En la *Figura 15*, se muestra la bomba modelo PP2 que fue utilizada en los ensayos de respirometría, esta trabaja en serie contando con dos canales de alimentación de flujo.



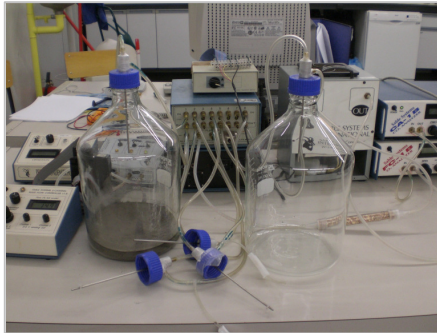
**Figura 15:** Bomba, modelo PP-2

En la *Figura 16*, se muestra el controlador de flujo SABLE SYSTEMS INTERNATIONAL, este tiene la finalidad de mantener constante el % de flujo de aire seleccionado para los ensayos de respirometría, su capacidad de trabajo al 100 % contempla 1000 ml/min, con autorregulador de masa de flujo de 11 a 15.5 volts, un rango de presión de trabajo de 33-100 Kpa y contempla dos canales de alimentación.



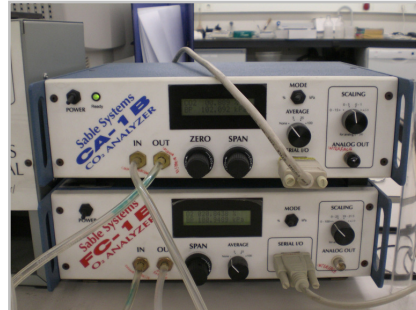
**Figura 16:** Medidor de flujo

*Figura 17*, se muestran los reactores tipo batch que fueron utilizados en el presente proyecto, y son considerados batch ya que no entra ni sale material durante la reacción, sino más bien, al inicio del proceso se introdujo la muestra. .

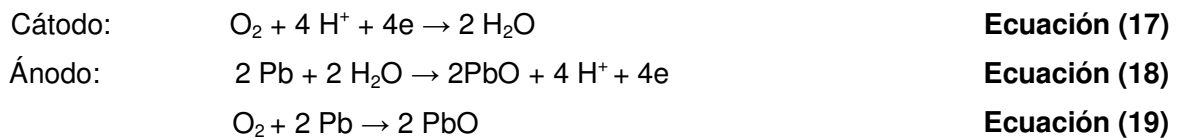


**Figura 17:** Reactores tipo batch

En la *Figura 18* se muestra el analizador de oxígeno FC-1B, usa un dispositivo compuesto por una celda electrolítica, el cátodo contiene un electrolito ácido y el ánodo contiene un metal pesado (plomo), el oxígeno penetra la membrana contenida en la celda electrolítica, para entrar en contacto con el electrolito ácido, el cual se hidroliza como se muestra en la ecuación 17, posteriormente el oxígeno se conduce por difusión hacia el ánodo el cual oxida al metal pesado, liberando electrones como se indica en la ecuación 18, en la ecuación 19 se muestra la reacción final que se lleva a cabo en la cuantificación continua de oxígeno. La presión parcial del oxígeno adyacente hacia el ánodo es cero y el rango de flujo molar en la membrana es linealmente proporcional a la presión parcial del oxígeno en el ambiente, esta diferencia genera una corriente eléctrica que es linealmente proporcional a la presión parcial del oxígeno en la superficie externa de la membrana. Esta corriente es convertida a voltaje por el sensor.



**Figura 18:** Analizador de oxígeno y bióxido de carbono



En la parte superior de la *Figura 18*, se muestra el analizador de bióxido de carbono, éste cuenta en su interior con un sistema de medición por infrarrojos que funciona según el principio de un fotómetro de dos rayos.

El bióxido de carbono difundido en la celda, absorbe los rayos infrarrojos que al mezclarse genera una frecuencia con una longitud de onda de 4.26 micrómetros. En el extremo del trayecto de rayos un fotómetro de dos rayos mide la radiación infrarroja entrante a la longitud de onda del bióxido de carbono, con una longitud de onda de referencia, de aquí, el transmisor calcula la concentración de dióxido de carbono y emite una señal.

El analizador de bióxido de carbono responde a la presión parcial del bióxido de carbono presente en el flujo de aire.

En la *Tabla 17*, se muestra las especificaciones técnicas del analizador de oxígeno y de bióxido de carbono, siendo estas de suma importancia por las condiciones que hay que considerar en su operación y manejo.

**Tabla 17:** Especificaciones técnicas de equipos de medición de oxígeno y bióxido de carbono.

Descripción	Analizador de Oxígeno	Analizador de Bióxido de Carbono
Especificaciones técnicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de medición: 0.02 a 20.9 %.</li> <li>• Rango en flujo de aire: 10 a 1000 mL/min.</li> <li>• Resolución: 0.001%.</li> <li>• Tiempo de respuesta en lectura: 12 segundo de 0 a 90%.</li> <li>• Temperatura ambiente de trabajo: 10-40 °C.</li> <li>• Voltaje de salida: 0-5 volts.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de medición: 0.5 a 10%.</li> <li>• Rango en flujo de aire: 20 a 200 ml/min.</li> <li>• Resolución: 0.005%.</li> <li>• Tiempo de respuesta en lectura: 120 milisegundo de 0 a 90%.</li> <li>• Temperatura ambiente de trabajo: 10-40 °C.</li> <li>• Voltaje de salida: 0-5 volts.</li> </ul>

En la *Figura 19*, se visualiza el proceso de respirometría, considerado todo el equipo que es requerido para estos ensayos.



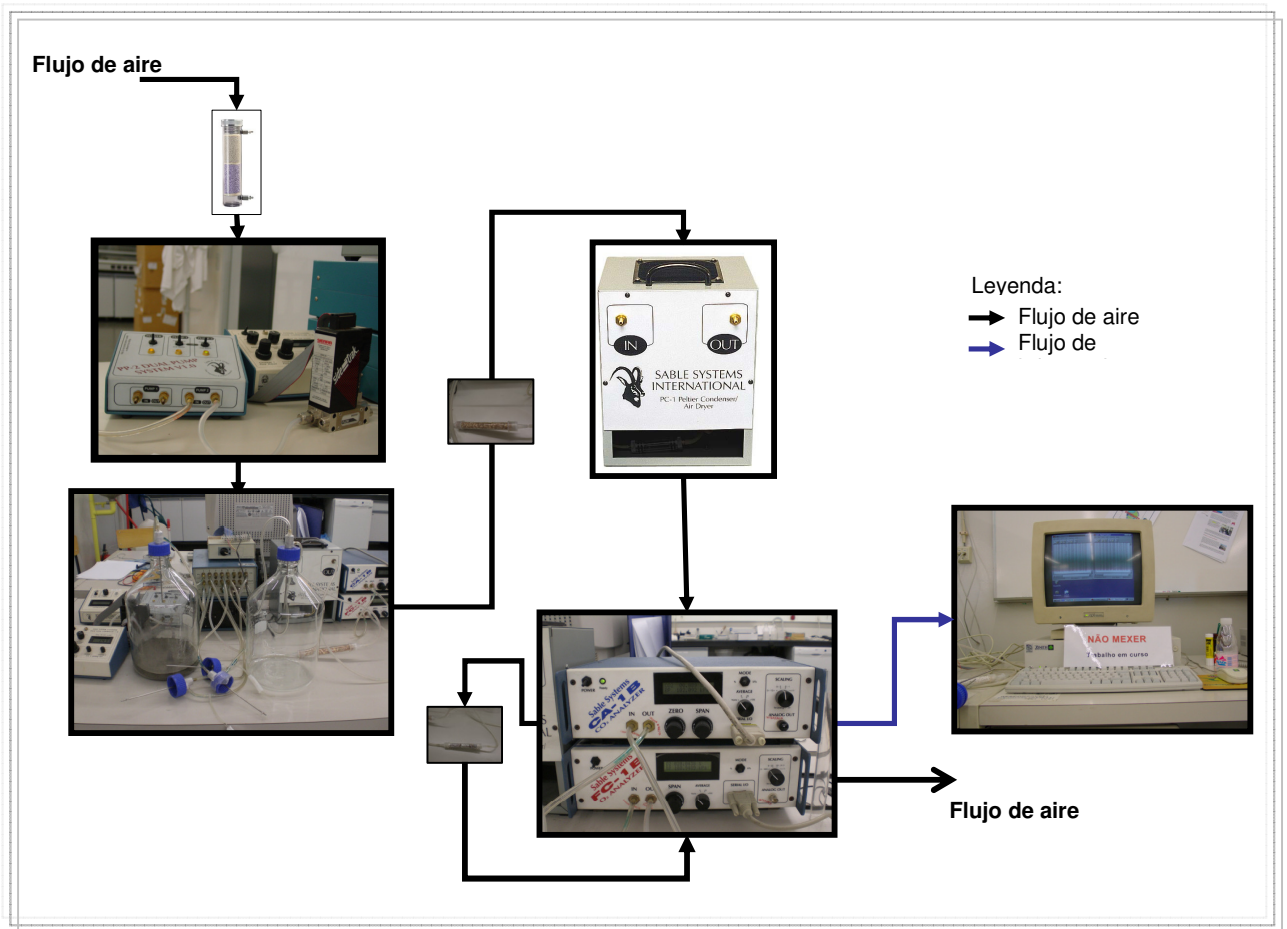


Figura 19: Proceso de respirometría.

### 3.2.2.3.2 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

Los datos que se obtiene de la técnica de respirometría son: oxígeno en (%), presión parcial del oxígeno en (Kpa), temperatura interna del analizador de oxígeno, bióxido de carbono en (%), presión parcial del bióxido de carbono en (Kpa), temperatura interna del analizador de bióxido de carbono, temperatura atmosférica y presión atmosférica.

Para el procesamiento de datos obtenidos en los análisis de respirometría se utilizó el Software MatLab, para ello se obtuvo un programa que permite registrar las lecturas de los analizadores de oxígeno y bióxido de carbono, este programa fue elaborado por el personal de la Faculdade de Engenharia Do Porto, el cual puede consultarse en el *Anexo C*.

La importancia de usar el Software MatLab, es básicamente por la cantidad de datos que se obtienen en las lecturas por los analizadores del bióxido de carbono y oxígeno, este programa permite manejar una gran cantidad de datos a través de matrices, las cuales almacenan todos los registros.

Para este análisis se ha utilizado dos canales de alimentación, el primero de ellos es alimentado del reactor que contiene los residuos de la unidad Minera Panasqueira, el segundo de ellos es usado como blanco, este ultimo se alimenta al canal 8, y se identifica por no contener muestra de residuos que es utilizado con la finalidad de contar con una referencia que nos permita evaluar los cambios que se registran en el reactor que contiene la muestra con residuos, en cuanto al consumo de oxígeno y bióxido de carbono.

Para el registro de una lectura en cualquiera de los reactores el programa lee 10 lecturas y registra una de ella, cada una de estas es tomada cada medio segundo por lo que se tiene una gran cantidad de datos los cuales nos permite evaluar las concentraciones de oxígeno y bióxido de carbono de forma automática siendo estas medidas continuas.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ENSAYOS QUÍMICOS

La caracterización química de los residuos minero es uno de los parámetros que se debe de considerar en la predicción de drenaje ácido de minas, ya que el conocimiento de cada uno de los elementos químicos, dará lugar a la determinación del grado de impacto ambiental que pueden generar los lixiviados en la producción de acidez.

Para este tipo de análisis se requirió un volumen de muestra de 50 gramos la cuál fue entregada al Laboratorio del Instituto Nacional de Engenharia, Tecnología e Inovação en Porto, para la realización de los análisis químicos, la técnica para este parámetro fue fluorescencia de rayos X, el reporte de resultados puede consultarse en el *Anexo D*.

Se analizaron 32 elementos esto con la finalidad de identificar los metales presente en las muestras, su importancia se considera para identificar la solubilidad en condiciones ácidas y su movilidad a través de los lixiviados, este análisis se aplico a residuos de las unidades mineras Panasqueira y Neves Corvo.

Es importante mencionar que en la Faculdade de Engenharia do Porto, en el área de Minas, se realizaron los ensayos de la muestra que fue colocada en las columnas, siendo el método de análisis fluorescencia de rayos X, como puede apreciarse el equipo en la *Figura 8* y *Figura 9*, de igual manera sus resultados se pueden consultar en la *Tabla 19*.

Se considero en los ensayos químicos la determinación de iones presentes en cada uno de los residuos mineros considerados en el presente estudio. La cantidad de iones presentes, temperatura y pH serán parámetros a considerar en la eficiencia de recuperación en extracción de iones por ensayos en columna y por equipo Soxhlet, los resultados obtenidos pueden visualizarse en los *gráficos 2* y *4*.

En las *tabla 6 y 7* se muestran los elementos metálicos que fueron considerados en los residuos mineros, utilizado en las columnas, considerando como referencia un análisis al inicio del proceso de experimentación y un segundo análisis al final del proceso, los resultados se presentan en los *gráficos 1 y 3*.

**Tabla 18:** Metales presentes en residuos de la unidad minera Panasqueira

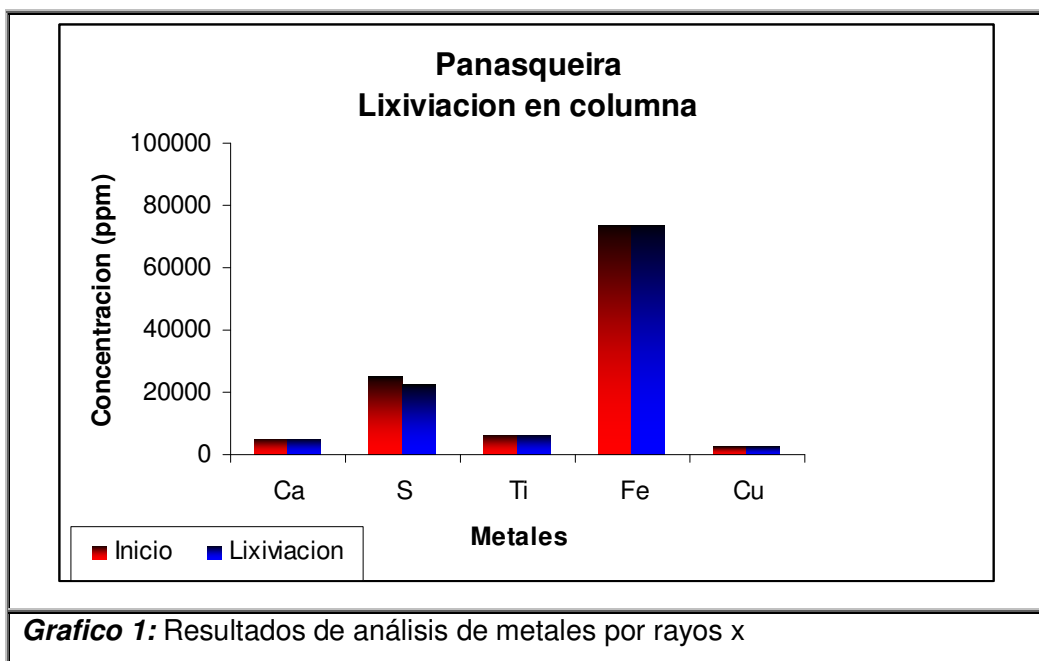
Elemento metálico	Símbolo	Concentración ppm	Familia química
Rubidio	Rb	362	Metal alcalino
Estroncio	Sr	58	Metal alcalinotérreo
Itrio	Y	22	Metal pesado de transición
Zirconio	Zr	168	Metal pesado de transición
Niobio	Nb	15	Metal pesado de transición
Bario	Ba	340	Metal alcalinotérreo
Tantalio	Ta	<5	Metal pesado de transición
Estaño	Sn	190	Metal pesado de transición
Volframio	W	2,010	Metal pesado de transición
Torio	Th	7	Actínidos
Hafnio	Hf	7	Metal pesado de transición
Uranio	U	<4	Actínidos
Lantano	La	21	Lactínidos
Cerio	Ce	32	Lactínidos
Neodimio	Nd	26	Lactínidos
Samario	Sm	8	Lactínidos
Iterbio	Yb	<6	Lactínidos
Níquel	Ni	56	Metal pesado de transición
Cobre	Cu	1,878	Metal pesado de transición
Zinc	Zn	1,880	Metal pesado de transición
Plomo	Pb	91	Metal pesado de transición
Vanadio	V	113	Metal pesado de transición
Cromo	Cr	96	Metal pesado de transición
Cobalto	Co	14	Metal pesado de transición
Galio	Ga	16	Metal pesado de transición
Germanio	Ge	17	Semi-conductor
Arsénico	As	4,183	Semi-conductor

En la *tabla 19*, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados a los residuos de la unidad minera Panasqueira y Neves Corvo.

**Tabla 19.** Resultados en residuos colocados en columnas.

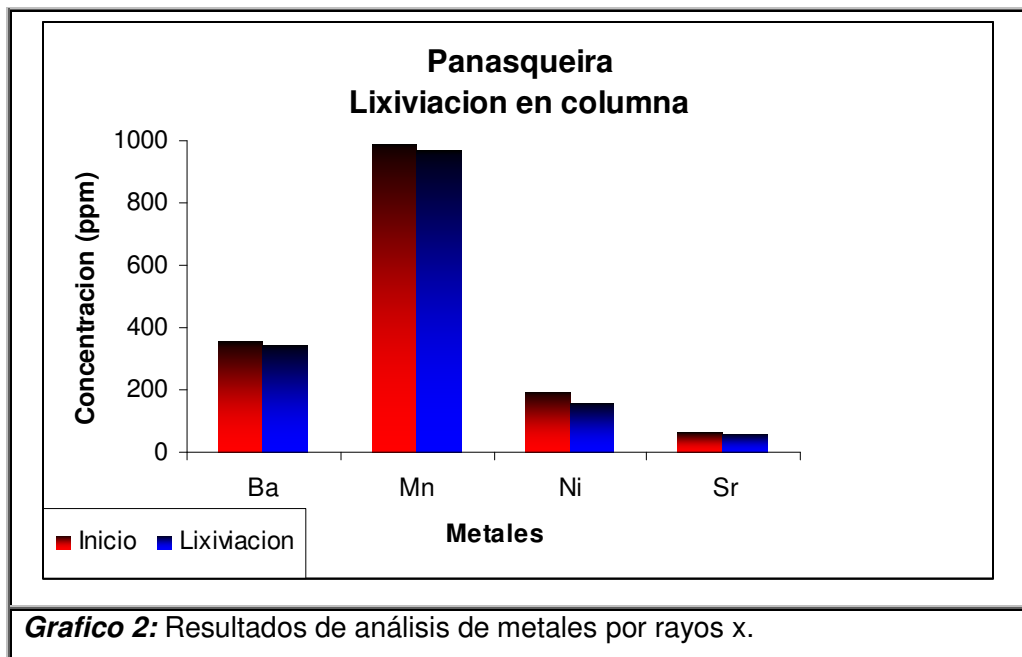
<b>Elementos metálicos</b>	<b>Panasqueira Antes</b> Concentración (ppm)	<b>Panasqueira Después</b> Concentración (ppm)	<b>Neves Corvo Antes</b> Concentración (ppm)	<b>Neves Corvo Después</b> Concentración (ppm)
Calcio	5070	4882	10574	2817
Azufre	25129	22773		
Titanio	6281	6253	2508	2452
Fierro	73980	73808		
Cobre	2254	2196		
Bario	356	342		
Manganeso	988	970	335	288
Níquel	191	156		
Estroncio	65	57	32	20
Zinc			7765	6962
Arsénico			4057	4043
Plomo			3004	2876
Plata			105	94
Rubidio			41	33
Estaño			2021	1935
Zirconio			35	34

En el *grafico 1* y *grafico 2*, se indican los resultados obtenidos en la muestra de residuos de la unidad minera Panasqueira, las barras de color rojo indica los elementos presentes en la muestra antes de someterse al proceso de lavado en ensayos en columna, mientras que las barras de color azul indican los elementos presentes en el sólido, una ves que fue sometida a los ensayos de lavado.

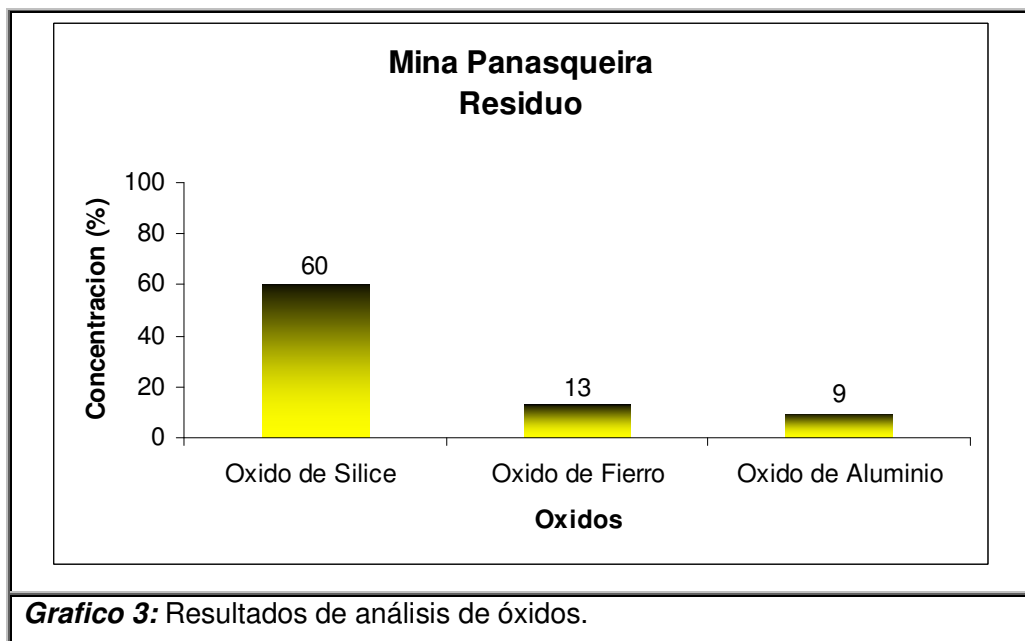


Como se puede observar en el *grafico 1*, los elementos de calcio, titanio, fierro y cobre no presentaron solubilidad, por lo que se encuentran presentes el sólido en la misma proporción que al inicio de la experimentación.

En el *grafico 2*, podemos observar una ligera solubilidad en bario, níquel, manganeso y estroncio, por lo que se puede apreciar que en el sólido presenta una disminución en la concentración de los elementos mencionados.



Siguiendo con la caracterización de residuos de la unidad minera Panasqueira se presentan en el *gráfico 3* los resultados de análisis de óxidos en la que se determinó: óxidos de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y óxidos de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), presentándose en mayor proporción el óxido de sílice.



*Óxidos de sílice (SiO<sub>2</sub>):* El nombre de dióxido de silicio, así como la formulación SiO<sub>2</sub> son poco afortunados, pues pueden sugerir la presencia de moléculas aisladas. En realidad el SiO<sub>2</sub> es un edificio cristalino inmenso formado por átomos de silicio tetraédricos, con un oxígeno en cada vértice, de modo que cada oxígeno es compartido por dos tetraedros. De ahí que la composición centesimal del compuesto responda a la fórmula de SiO<sub>2</sub>.

Pese a que cada enlace Si-O tiene un alto carácter iónico, lo cual podría hacer pensar que el compuesto sería soluble en agua, la enorme cantidad de energía que se desprende en la formación de la red cristalina hace el compuesto insoluble, pues sería necesario aportar esa cantidad de energía para disgregar el cristal.

La forma vítrea, que es hecho el vidrio en sentido general, tampoco es soluble pues los enlaces siguen siendo muy fuertes.

*Óxidos de hierro:* El Fe<sup>+2</sup> es altamente soluble en agua y en ácido clorhídrico y sulfúrico, por lo que sigue su proceso de oxidación hasta obtener óxidos de hierro y hidróxidos de hierro que estos últimos se identifican en el medio por su coloración naranja.

*Óxidos de aluminio:* El único óxido del aluminio es la alúmina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. No obstante, su simplicidad está compensada por la aparición de polimorfos y materiales hidratados cuya naturaleza depende de las condiciones de preparación, el óxido de aluminio es insoluble en agua y difícilmente soluble en ácidos.

Otro de los parámetros químicos importante que se realizó en el presente estudio, es la determinación de % de azufre, este parámetros nos ayuda a cuantificar el potencial de acidez que presenten cada uno los residuos, siendo este parámetro importante para determinar el potencial neto de neutralización.

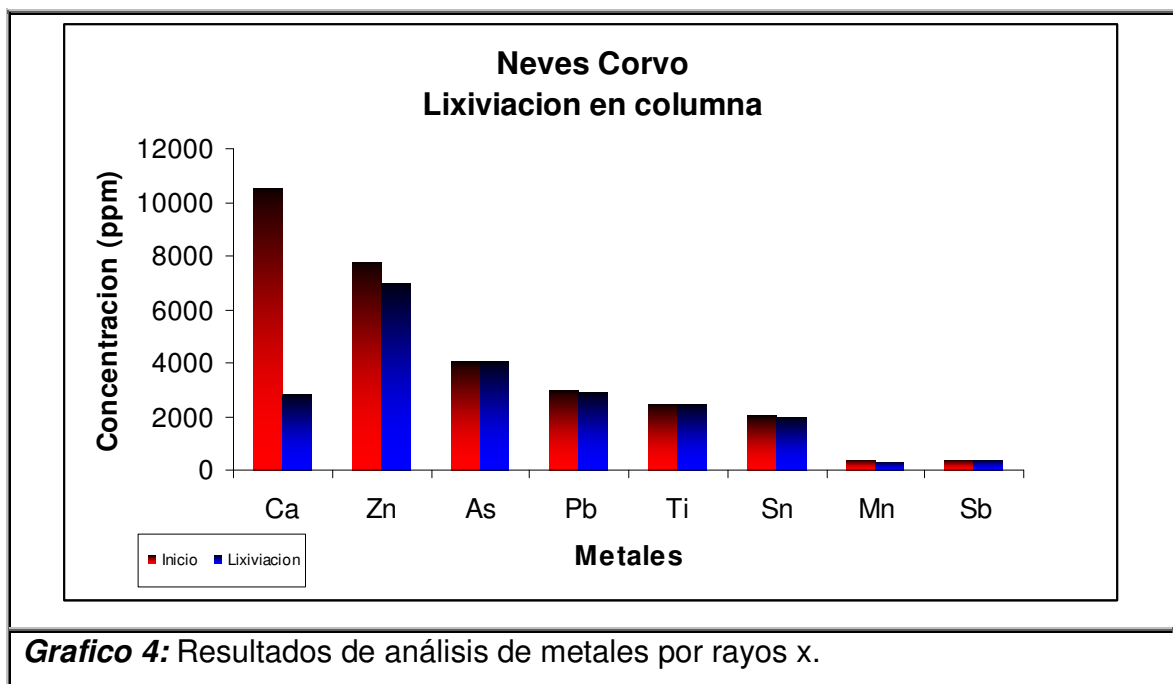
Los resultados de la muestra de los residuos de la unidad minera Panasqueira presentan un 28.8 % de azufre, los resultados se encuentran reportados en el *Anexo A*, del presente



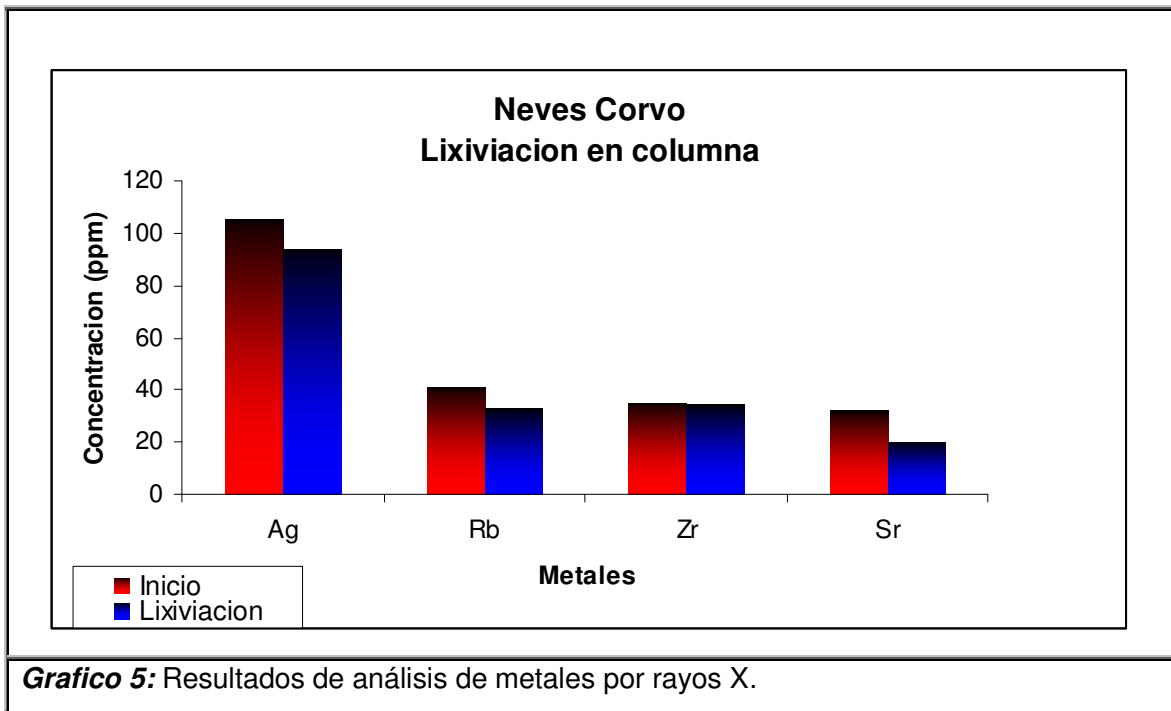
estudio, este ensayo fue realizado en el Laboratorio del Instituto Nacional de Engenharia, Tecnología e Inovação en Porto.

Para la unidad minera Neves Corvo el porcentaje de azufre fue de 1.73% de igual manera se determino el Potencial Neto de Neutralización, los resultados se muestran en *Anexo A*.

En el *grafico 4 y 5.*, se indican los resultados de la muestra perteneciente a los residuos mineros de la empresa Neves Corvo, se puede visualizar la concentración de metales antes de que esta sea sometida a ensayos en columna, sus resultados se visualizan en las columnas de color rojo del presente grafico, de igual manera se puede apreciar los resultados obtenidos al finalizar la aplicación de análisis en columna, estos resultados se muestran en las barras de color azul.



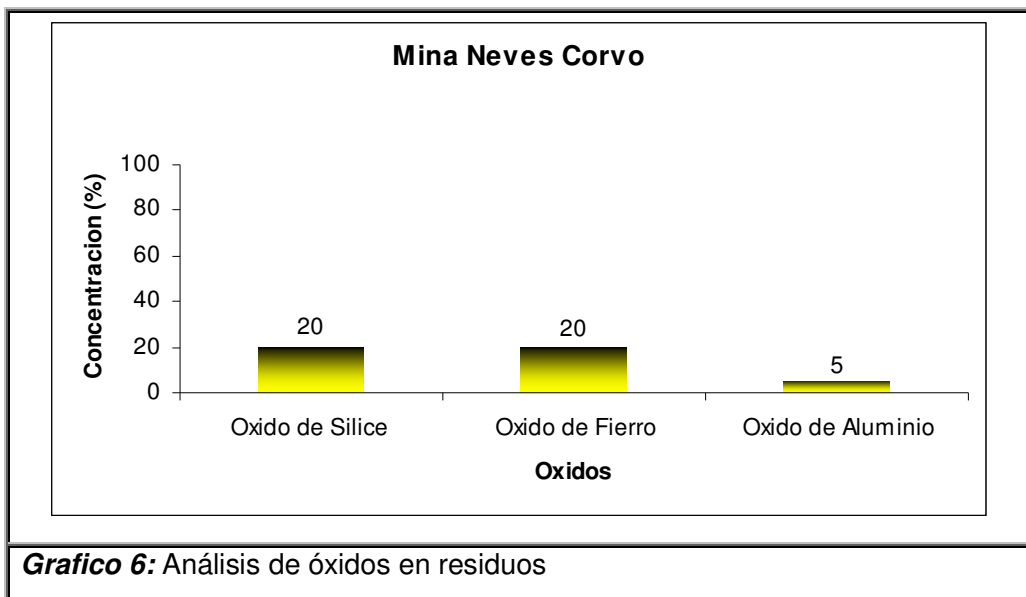
Los resultados que se muestran en el presente apartado fueron realizados en la Facultad de ingeniería de Oporto, utilizando el equipo de análisis de rayos X.



**Tabla 20:** Metales presentes en residuos de la unidad minera Neves Corvo

<b>Elemento metálico</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Familia química</b>
Rubidio	Rb	32	Metal alcalino
Estroncio	Sr	28	Metal alcalinotérreo
Itrio	Y	17	Metal pesado de transición
Zirconio	Zr	49	Metal pesado de transición
Niobio	Nb	<3	Metal pesado de transición
Bario	Ba	171	Metal alcalinotérreo
Tantalio	Ta	<5	Metal pesado de transición
Estaño	Sn	1,356	Metal pesado de transición
Volframio	W	10	Metal pesado de transición
Torio	Th	<5	Actínidos
Hafnio	Hf	10	Metal pesado de transición
Uranio	U	<4	Actínidos
Lantano	La	7	Lactínidos
Cerio	Ce	27	Lactínidos
Neodimio	Nd	20	Lactínidos
Samario	Sm	<3	Lactínidos
Iterbio	Yb	<6	Lactínidos
Níquel	Ni	22	Metal pesado de transición
Cobre	Cu	5,400	Metal pesado de transición
Zinc	Zn	7,285	Metal pesado de transición
Plomo	Pb	2,673	Metal pesado de transición
Vanadio	V	48	Metal pesado de transición
Cromo	Cr	36	Metal pesado de transición
Cobalto	Co	256	Metal pesado de transición
Galio	Ga	6	Metal pesado de transición
Arsénico	As	4,006	Semi-conductor

De igual manera se tiene la caracterización de los residuos de la unidad minera Neves Corvo, como se presentan en el *gráfico 6*, este ensayo se enfocó a cuantificar la presencia de óxidos de los cuales se determinaron: óxidos de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), sulfatos ( $\text{SO}_3$ ) y óxidos de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), presentándose en mayor proporción los iones sulfato.



## 4.2 ENSAYOS FÍSICOS

Uno de los parámetros de suma importancia en la Evaluación de potencial de generación de drenaje ácido de minas es la determinación de partículas sólidas, por lo que se evaluó este parámetro a través de un ensayo granulométrico en las muestras de las unidades mineras Panasqueira y Neves Corvo, en la *Tabla 21*, se muestra la media obtenida en cuanto a su granulometría, para su mayor consulta puede consultar el reporte de resultados en el *Anexo E*.

**Tabla 21:** Resultados del ensayo granulométrico.

<b>Unidad Minera</b>	<b>Granulometría (media)</b>
Unidad Minera Panasqueira	47.56 $\mu\text{m}$
Unidad Minera Neves Corvo	12.58 $\mu\text{m}$

---

### 4.3 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO DE MINAS

#### 4.3.1 ENSAYOS ESTÁTICOS

Los resultados obtenidos en los ensayos por métodos estáticos (ABA, ABA modificado y producción líquida de acidez), se muestran en el *Anexo A*, del presente reporte. Los resultados obtenidos por los tres métodos de análisis en la muestra de la unidad minera Panasqueira y Neves Corvo, indican que es potencialmente generadora de drenaje ácido.

En la *Figura 20*, se puede apreciar los residuos de la unidad minera Panasqueira con evidencia de generación de acidez, esto pudo observarse en la visita que se realizó el día 15 de noviembre de 2006.



**Figura 20:** Lixiviados en presa de residuos mineros, unidad minera Panasqueira

#### 4.3.2 RESULTADOS DE ENSAYOS DE CINÉTICA

##### 4.3.2.1 EXTRACCIÓN DE IONES CON EQUIPO SOXHELET

En una primera fase de la experimentación de extracción de iones, se utilizó el equipo de extracción de iones “Soxhelet” en el cuál se contempló 300 gramos de muestra de residuo correspondiente a la unidad minera Panasqueira, en 300 mL de agua destilada, manteniendo el proceso a temperatura constante de 100 °C, el tiempo de retención al que se llegó fue de 72 h, los resultados obtenidos se muestran en la *Tabla 22*, se logró realizar 3 ensayos en tres días consecutivos, esto debido a que ya no se logro obtener mayor recuperación de solución en extractor Soxhelet.

**Tabla 22:** Datos experimentales de la unidad minera Panasqueira

Fecha	Descripción	pH	Conductimetría ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	TSD (mg/L)	Salinidad
30 de Octubre de 2006	Blanco	6.805	2.2	2	0
01 de Noviembre de 2006	Ensayo 1.	6.934	1481	1484	0.6
02 de Noviembre de 2006	Ensayo 2.	7.402	1867	1857	0.8
03 de Noviembre de 2006	Ensayo 3.	7.429	3350	3340	10

Nota: Ensayo usando 300 gramos de muestra en 300 mL de agua destilada.

Blanco usando agua destilada

En una segunda fase de experimentación se contemplo la utilización de 150 gramos de muestra y 300 mL de agua destilada, manteniendo las mismas condiciones de operación que en la primera fase experimental, los resultados se muestran en la *Tabla 23*.

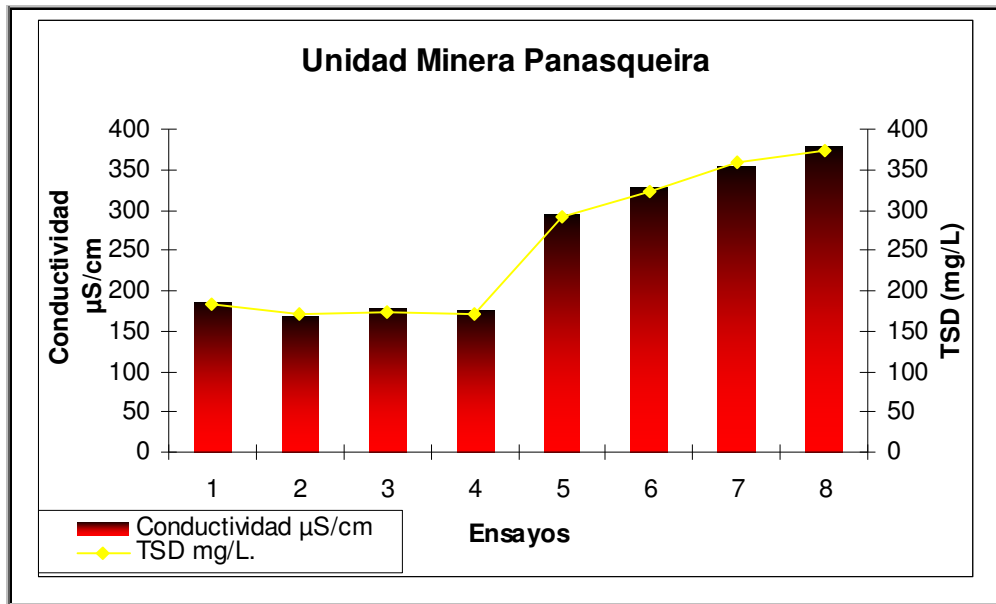
**Tabla 23:** Extracción de iones por Soxhlet de la unidad minera Panasqueira

<b>Fecha</b>	<b>Descripción</b>	<b>pH</b>	<b>Conductimetria (<math>\mu</math>S/cm)</b>	<b>TSD (mg/L)</b>	<b>Salinidad</b>
30 de Octubre de 2006.	Blanco	6.805	2.2	2	0
10 de Noviembre de 2006	Ensayo 1.	6.544	186.4	183	0.0
11 de Noviembre de 2006	Ensayo 2.	6.281	169.8	172	0.0
12 de Noviembre de 2006	Ensayo 3.	6.907	177.3	173	0.0
13 de Noviembre de 2006	Ensayo 4.	6.842	175.6	170	0.0
14 de Noviembre de 2006	Ensayo 5.	6,796	295	291	0.0
15 de Noviembre de 2006	Ensayo 6.	6,661	327	324	0.0
16 de Noviembre de 2006	Ensayo 7.	6,702	355	358	0.0
17 de Noviembre de 2006	Ensayo 8.	6,796	378	374	0.0

Nota: Ensayo usando 150 gramos de muestra en 300 mL de agua destilada.

Blanco usando agua destilada.

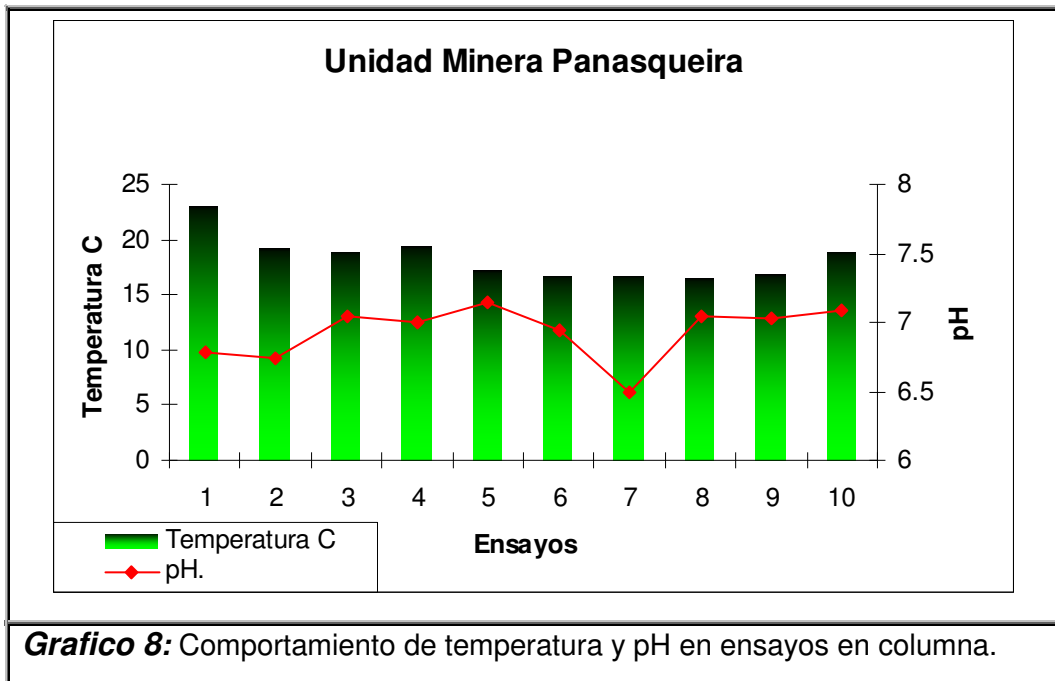




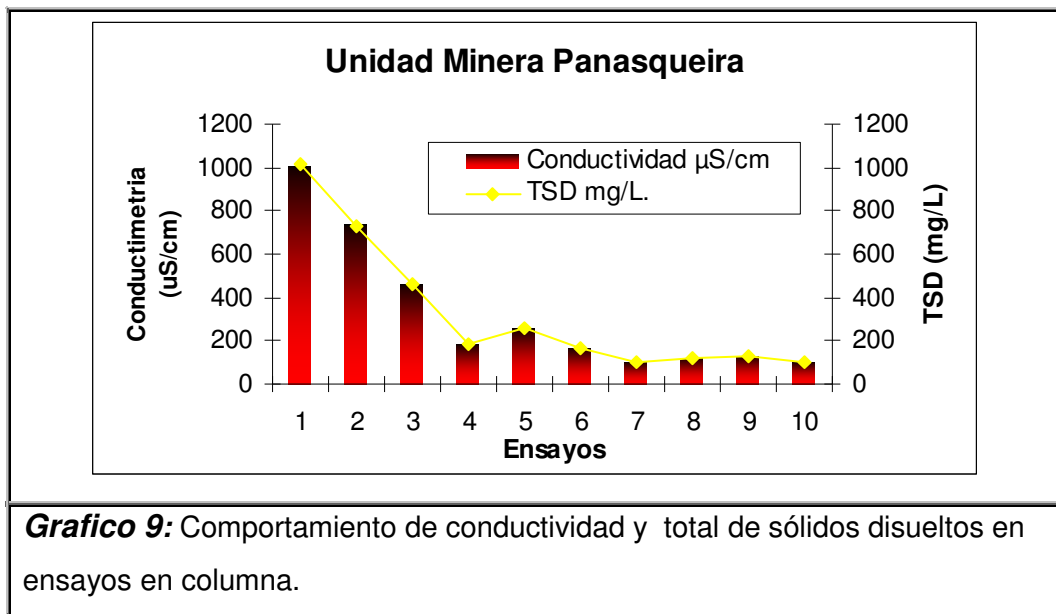
**Grafico 7:** Medición de parámetros fisicoquímicos en equipo Soxhelet.

De igual manera se realizaron los ensayos de extracción de iones con equipo Soxhelet para la muestra de residuos que corresponde a la unidad minera Neves Corvo, el cual se inició el día 22 de noviembre de 2006 y finalizó el día 5 de diciembre del mismo año.

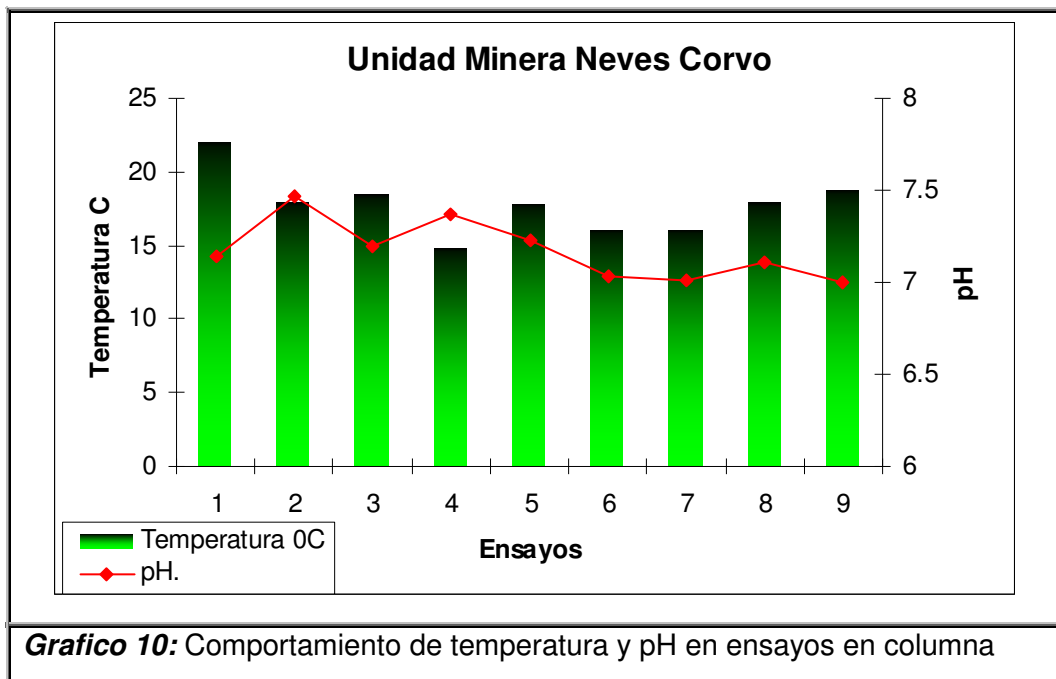
En este proceso se puede concluir que no se obtuvo recuperación de iones por lo que se puede apreciar que no se obtienen compuestos solubles que puedan ser recuperados por extracción de iones con equipo Soxhelet, de igual manera se puede apreciar la presencia de iones férricos que precipitan en forma de hidróxidos en el matraz volumétrico como se muestra en la *Figura 7.*, esto debido a la característica de sus precipitados que presentan una coloración naranja.



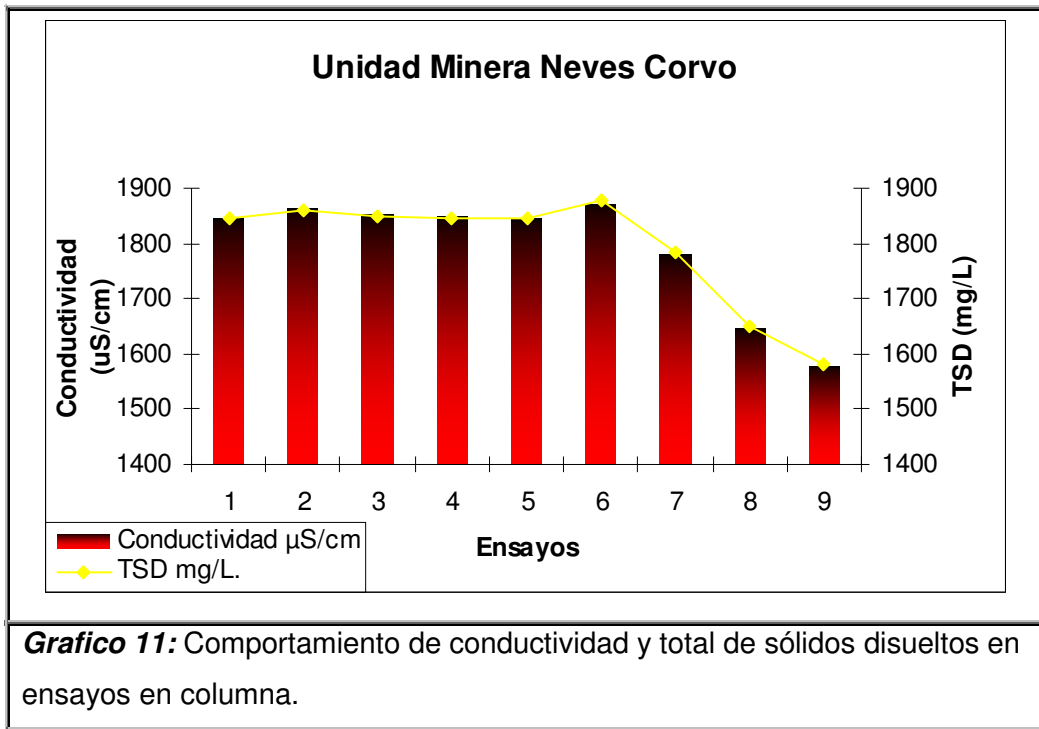
En el *grafico 8*, se muestran los resultados obtenidos en la medición de parámetros de pH y temperatura, como puede observarse en las barras de color verde indican los resultados de temperatura que presentó la muestra de lixiviados obtenidos en los ensayos en columna, mientras que los resultados de pH son indicados por la línea roja.



En el *grafico 9*, se muestran los resultados obtenidos en la medición de conductividad y total de sólidos disueltos, los resultados de conductividad se indican en barras de color rojo, mientras que el total de sólidos disueltos se indica por línea de color amarillo, es importante mencionar que los resultados obtenidos en estos parámetros indican una relación proporcional entre la conductividad y el total de sólidos disueltos.



En el *grafico 10*, se muestra los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos realizados a los lixiviados que se obtuvieron en cada uno de los lavados realizados a muestra en columnas, como se puede apreciar los parámetros de temperatura y pH no se presento una variación significativa tanto del pH como de temperatura, lo que representa en un lapso de dos meses no se presento generación de drenaje ácido de minas.



En el *grafico 11*, se muestran los resultados obtenidos en los lixiviados obtenidos en los ensayos en columna de la unidad minera Neves Corvo, indicando en las barras de color rojo la conductimetría y la línea amarilla los resultados obtenidos en la medición de sólidos disueltos totales, cabe mencionar que los resultados obtenidos en los primeros 6 ensayos indican que no se presentó solubilidad de iones, ya que la conductividad y los sólidos disueltos totales, no presentan variación.

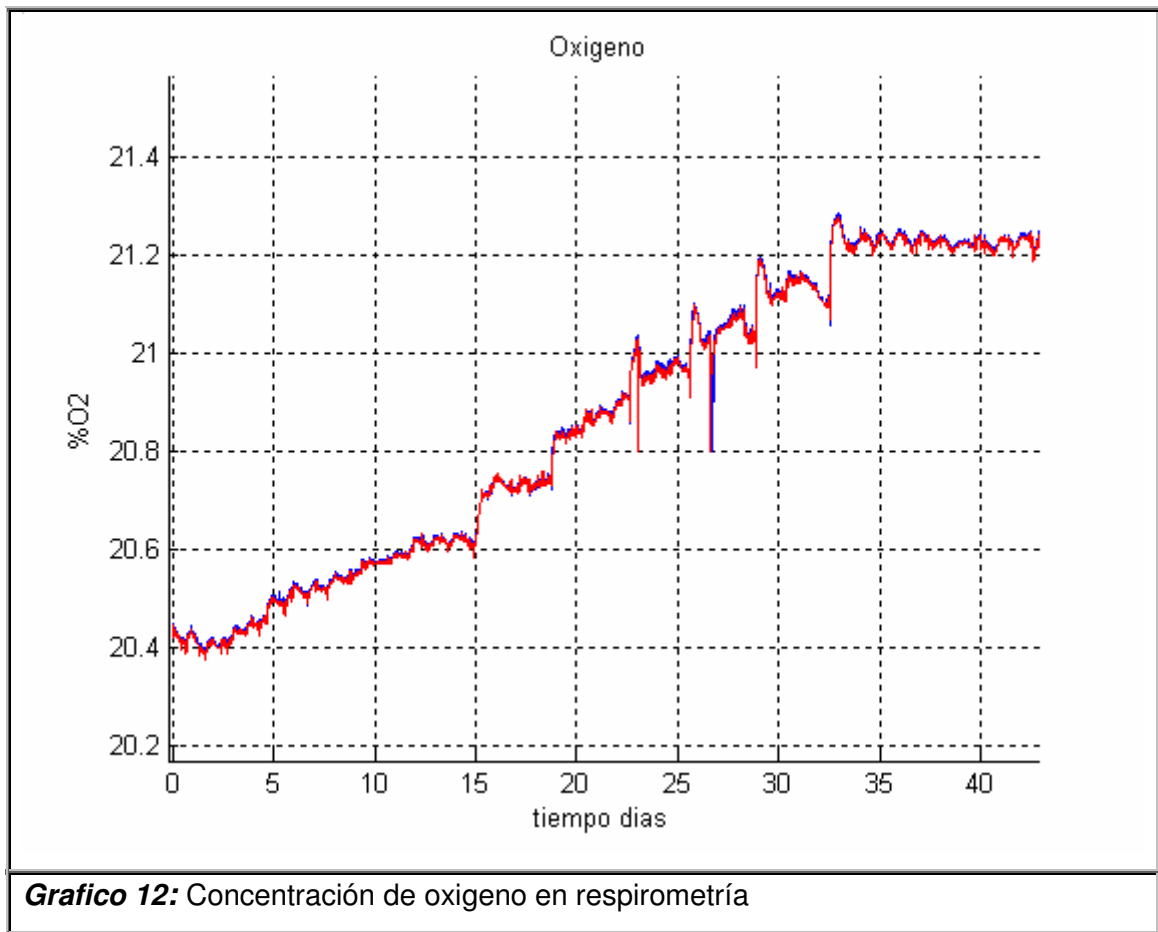
#### 4.4 RESULTADOS DE ENSAYOS POR RESPIROMETRÍA

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos en los análisis de respirometría, por lo que en la *tabla 24*, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica que se realizó al agua de lluvia que fue captada el día 04 de diciembre de 2006, en la Faculdade de engenharia do Porto, la cual fue utilizada para este ensayo.

El agua de lluvia se considero en los análisis de respirometría con la finalidad de conocer las condiciones de participación en la reacción de oxidación en la generación de drenaje ácido de minas, lo más cercana a las condiciones naturales.

**Tabla 24:** Caracterización de agua de lluvia.

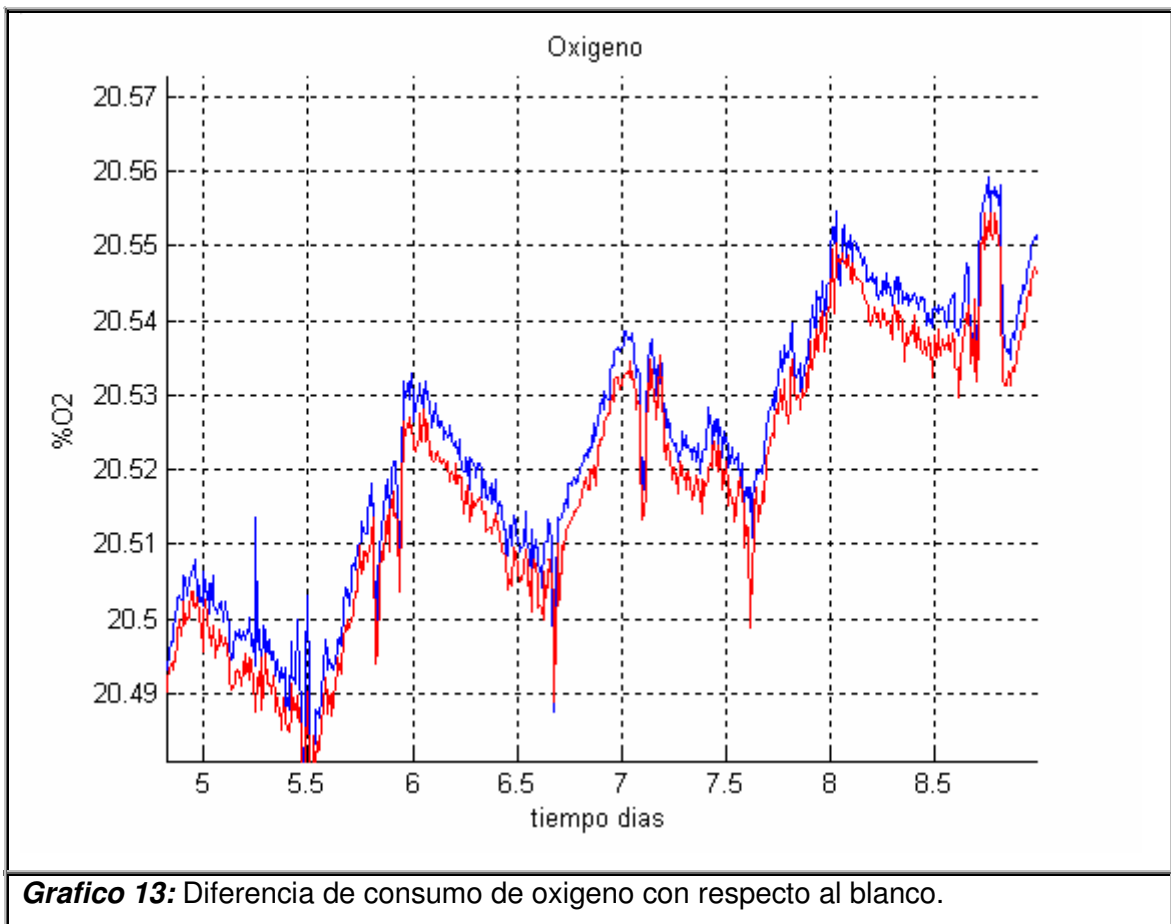
Parámetro	Resultado	Unidades
pH	7.650	
Temperatura	18.4	°C
Total de sólidos disueltos	61	mg/L
Conductividad	61.4	µS/cm
Salinidad	0.0	



El *grafico 12*, muestra los resultados obtenidos en los ensayos de respirometría, por lo que se puede apreciar que la concentración inicial de oxígeno en el reactor que contiene el residuo de la unidad minera Panasqueira así como el blanco, es de 20.42%. El incremento de la concentración de oxígeno se da debido a la entrada constante de oxígeno a través de la alimentación de flujo de aire al reactor, esto da como consecuencia un aumento en la presión parcial del mismo.

De igual manera se puede observar que al finalizar los 33 días en el desarrollo de la experimentación da lugar a un inicio de un proceso pseudos-estacionario, lo que da lugar a un periodo de adaptación bacteriana. Es importante observar los resultados posteriores de la presente experimentación con la finalidad de evaluar la fase de participación de los microorganismos en el proceso de generación de drenaje ácido de minas, por lo que se puede apreciar a partir de la fase pseudo-estacionaria, por tanto dada la lentitud de la cinética de oxidación catalizadas por la participación de las bacterias litotróficas no es evidente que el consumo aparente de oxígeno sea visualmente discernible de forma inevitable, lo que probablemente la diferencia tiende a ser sometida a técnicas de tratamiento de señal para comprobar indudablemente su naturaleza de participación.

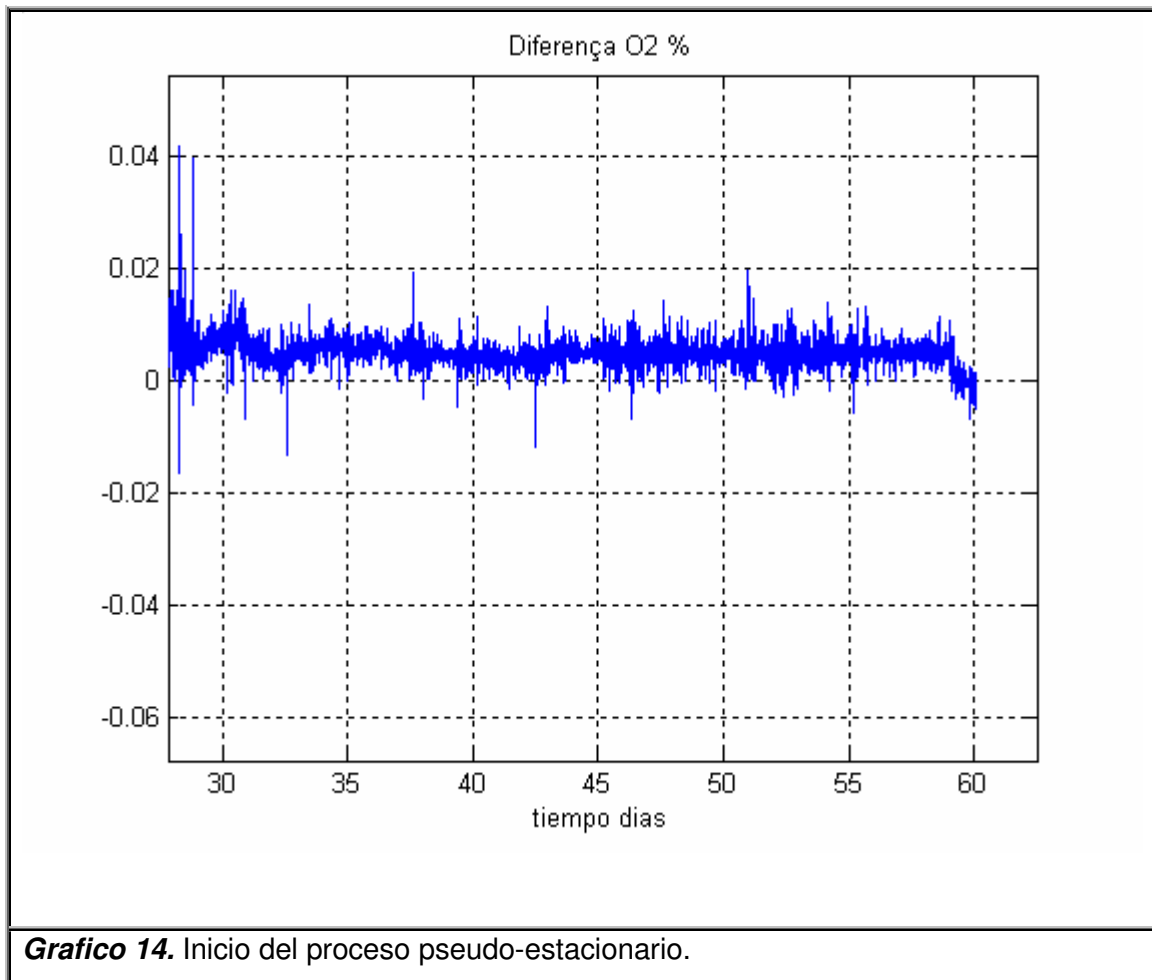




**Grafico 13:** Diferencia de consumo de oxigeno con respecto al blanco.

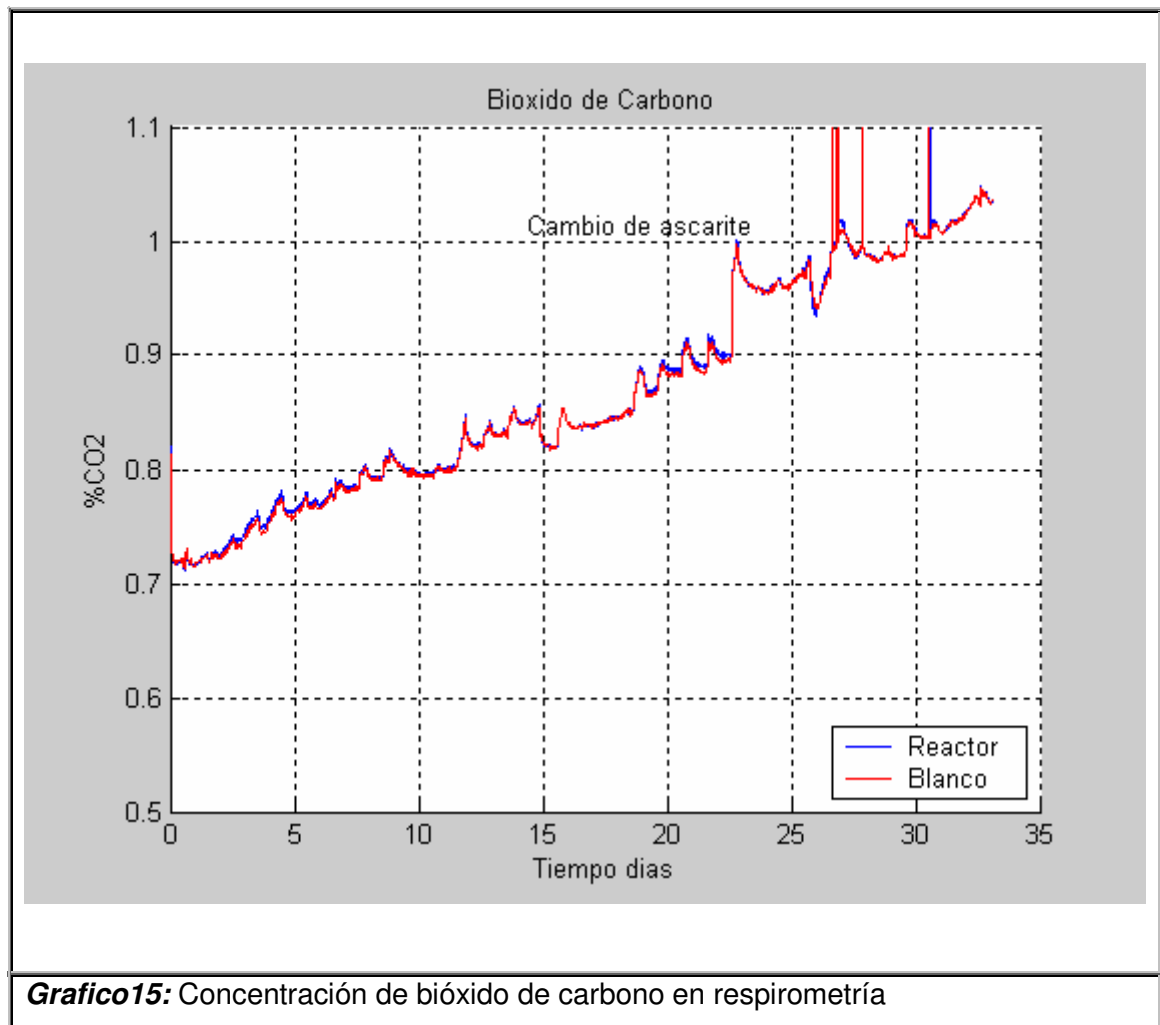
Ampliando la resolución en el *grafico 13*, podemos observar que aparentemente existe un consumo de oxigeno, existiendo una baja diferencia de concentración entre el reactor que contiene el residuo de la unidad minera Panasqueira con respecto al blanco, por tal motivo un análisis pormenorizado de las diferencias de concentración de oxigeno, no permite afirmar que las diferencias correspondan a un inicio del proceso de oxidación, esto es debido a que existe la presencia de carbonato de calcio que actúa como neutralización en el inicio del proceso de generación de drenaje ácido de minas.

Los picos que se observan en la concentración de oxigeno se presentan debido al cambio de drierite que se realizo en todo el proceso de experimentación, por lo que origina una variación significativa en el proceso.



**Grafico 14.** Inicio del proceso pseudo-estacionario.

En el *grafico 14*, se puede observar la baja diferencia en el consumo de oxígeno con respecto al blanco, lo que indica que existe consumo de oxígeno en el reactor que contiene los residuos, sin embargo el poco tiempo que se tuvo para el desarrollo de proyecto de investigación no permite obtener mayores resultados que muestren el proceso total de las reacciones de oxidación que se presenten en la generación de drenaje ácido de minas.



**Grafico15:** Concentración de bióxido de carbono en respirometría

El *grafico 15*, muestra los resultados obtenidos en los ensayos de respirometría, por lo que se puede apreciar que la concentración de bióxido de carbono en el reactor que contiene el residuo de la unidad minera Panasqueira así como el blanco, es de 0.72%. El incremento de la concentración de bióxido de carbono se da debido a la entrada constante de bióxido de carbono a través de la alimentación de flujo de aire al reactor, esto da como consecuencia un aumento en la presión parcial del mismo.

Los picos que se observan en la concentración de bióxido de carbono se presentan debido al cambio de ascarite que se realizó en todo el proceso de experimentación.

## 5 DISCUSION DE RESULTADOS

### 5.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN MUESTRA DE LA UNIDAD MINERA PANASQUIERA

La muestra que corresponde a los residuos de la unidad minera Panasqueira es potencialmente generadora de drenaje ácido, de acuerdo a los resultados que se obtuvieron en los tres métodos de análisis que fueron aplicados como son: métodos estáticos (balance ácido base, balance ácido base modificado y generación líquida de ácido), sin embargo para la evaluación del potencial neto de neutralización es recomendable aplicar la metodología de generación líquida de acidez ya que con esta técnica se obtiene de manera directa el Potencial Neto de Neutralización (PNN).

Para la evaluación de la cinética de oxidación en residuos de la unidad minera Panasqueira, se aplicó la extracción de lixiviados en columna, extracción de iones en equipo Soxhlet y como inicio de investigación se aplicó la técnica de respirometría.

Los resultados obtenidos en ensayos en columna, muestra que hay compuestos solubles, esto se pudo observar en los resultados realizados en los lixiviados obtenidos en la columna, a través de la medición de parámetros como: elementos metálicos, pH, temperatura, salinidad, conductividad y sólidos disueltos totales, la variación que presentaron los parámetros antes mencionados indican que no se presentó oxidación en estos residuos, principalmente por el poco tiempo que fue considerado para estos ensayos, cabe señalar que la cinética de oxidación en residuos depende de diversos parámetros como son: tiempo, concentración de sulfuros, presencia de compuestos capaces de neutralizar la acidez, concentración de oxígeno, tamaño de partícula, presencia de agua, participación de microorganismos del género *thiobacillus*, solubilidad de sulfuros metálicos, etc.

La aplicación de la técnica de extracción de iones utilizando el equipo Soxhlet fue importante aplicarla, ya que se logra cuantificar los iones solubles además de considerar la influencia de la temperatura, ya que este parámetro influye de manera directa en la solubilidad de iones. Los resultados obtenidos por este ensayo en residuos de la unidad

minera Panasqueira presentaron solubilidad, por lo que se puede consultar en el *Anexo B*, del presente estudio.

Los residuos de la unidad minera Panasqueira fueron sometidos a ensayos de respirometría, esto con la finalidad de evaluar la cinética de oxidación, para ello se midió la concentración de oxígeno y bióxido de carbono, los resultados obtenidos con un periodo de tiempo de experimentación de un mes, indican que no fue posible evaluar la cinética de oxidación, esto se debe principalmente al poco tiempo que fue considerado la aplicación de la técnica, sin embargo el uso de la respirometría permitirá evaluar la cinética de oxidación que presenten los residuos y/o mineral que provenga de la industria minera que es considerado potencialmente generador de drenaje ácido de minas, ello permitirá que la industria enfoque sus medidas de prevención antes de generar el drenaje ácido de minas.

Es importante señalar que la aplicación de esta técnica permitirá evaluar la participación de los microorganismos del genero *thiobacillus* en la oxidación de residuos de la Industria minera, ya que el equipo registra la concentración de oxígeno y bióxido de carbono que es consumido en el proceso.

## 5.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN MUESTRA DE LA UNIDAD MINERA NEVES CORVO

La muestra que corresponde a los residuos de la unidad minera Neves Corvo, es potencialmente generadora de drenaje ácido, de acuerdo a los resultados que se obtuvieron en los tres métodos de análisis que fueron aplicados como son: métodos estáticos (balance ácido base, balance ácido base modificado y generación líquido de ácido).

Para la evaluación de la cinética de oxidación en residuos de la unidad minera Neves Corvo, se aplicó la extracción de iones en columna y en equipo Soxhlet.

Los resultados obtenidos en ensayos en columna, muestra que hay compuestos solubles, esto se pudo observar en los resultados realizados en los lixiviados obtenidos en la columna, a través de la medición de parámetros como: elementos metálicos, pH, temperatura, salinidad, conductividad y total de sólidos disueltos, existe una variación mínima en los parámetros indicados, por lo que no se pudo observar el proceso de oxidación en los residuos, esto se debe a que se aplicó la técnica en un periodo corto de tiempo, lo que indica que para poder evaluar el proceso de cinética en residuos que son potencialmente generadores de drenaje ácido, es importante considerar como primer factor el tiempo de reacción.

La aplicación de la técnica de extracción de iones utilizando el equipo Soxhlet fue importante aplicarla, ya que se logra cuantificar los iones solubles además de considerar la influencia de la temperatura, ya que este parámetro influye de manera directa en la solubilidad de iones. Los resultados obtenidos por este ensayo en residuos de la unidad minera Neves Corvo, no presentaron solubilidad, considerando una temperatura de 100 °C, por lo que se puede apreciar su comportamiento en la *Figura 7*, este proceso se debe a que la calcopirita que es una de los minerales más difíciles de oxidarse en proceso natural.

## 6 CONCLUSIONES

### 6.1 SINTESIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

#### a) *Residuos de la unidad minera Panasqueira*

- La muestra proveniente de la unidad minera Panasqueira, es potencial mente generadora de drenaje ácido de minas, de acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos por las pruebas estáticas, este fenómeno pudo observarse en campo, en la visita que se realizó a la presa de almacenamiento de residuos el día 15 de noviembre de 2006
- La muestra de la unidad minera Panasqueira presentó material de neutralización como es la presencia de carbonato de calcio, el cual no es suficiente para contrarrestar la generación de acidez.
- El incremento de temperatura favorece la solubilidad de iones en muestra proveniente de la unidad minera Panasqueira, en extracción por Soxhlet.
- Se logró extraer un volumen de 70 mL de solución en la muestra de la unidad minera Panasqueira, por extracción Soxhlet, presentando un incremento en la conductividad y en total sólidos disueltos, presentando estos dos parámetros una relación directamente proporcional.
- Se obtuvo una recuperación de metales por lixiviación en pruebas en columna del 2.52%.
- Los elementos que presentaron solubilidad en pruebas en columna son: azufre, manganeso, bario, níquel y estroncio.
- Los elementos que no presentaron solubilidad en pruebas en columna son: fierro, titanio, calcio y cobre.

- No se observó oxidación en ensayos de respirometría en muestra de residuos de la unidad minera Panasqueira.
- La técnica de respirometría es una de las herramientas fundamentales con la que se puede contar para conocer la cinética de oxidación de materiales que provienen de la industria minera y que son considerados potencialmente generadores de drenaje ácido de minas.
- La técnica de respirometría permite cuantificar la concentración de oxígeno que se consume en la reacción de oxidación.
- La técnica de respirometría permite cuantificar la concentración de bióxido de carbono que es disponible en el flujo de aire que alimenta al reactor.
- La concentración de oxígeno y bióxido de carbono está en función de su presión parcial.
- Se conoce el consumo de bióxido de carbono que es consumido por los microorganismos del género *thiobacillus*, los cuales lo requieren para tomar de este, su principal fuente de carbono.
- La cinética de oxidación está en función de la concentración de azufre, tamaño de partícula, presencia de oxígeno, agua y participación de microorganismos del género *thiobacillus*.



*b) Residuos de la unidad minera Neves Corvo.*

- La muestra proveniente de la unidad minera Neves Corvo es potencialmente generadora de drenaje ácido de minas, de acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos en las pruebas estáticas.
- El incremento de temperatura, no favorece la solubilidad de iones en muestra proveniente de la unidad minera Neves Corvo, en extracción Soxhlet.
- Se obtuvo una recuperación de metales por lixiviación en columna del 28.96%, en un periodo de tiempo de 2 meses.
- Los elementos que presentaron solubilidad en pruebas en columna son: plata, rubidio, estroncio, calcio, zinc, plomo y titanio.
- Los elementos que no presentaron solubilidad en pruebas en columna son: arsénico, manganeso y estaño.
- Se tiene conocimiento por experimentos que se han realizados en residuos de la unidad minera Neves Corvo, en la que indican que la generación de drenaje ácido de minas, se da en un periodo de tiempo de 6 meses, por lo que en un corto periodo de investigación, que se dispuso para el desarrollo del presente proyecto, fue imposible obtener resultados claros que permitan una interpretación fenomenológica cuantitativa.

## 7 RECOMENDACIONES

- Para la evaluación del Potencial de Generación de drenaje ácido de minas, por los métodos estáticos es recomendable aplicar como inicio de la evaluación, la prueba de generación líquido de ácido, esto debido a que la técnica da como resultado el Potencial Neto de Neutralización (PNN).
- Realizar la calibración del equipo de respirometría al inicio del proceso de experimentación con la finalidad de cuantificar la concentración inicial de oxígeno y bióxido de carbono que es alimentada al reactor.
- Registrar medidas de temperatura en interior de reactor, con la finalidad de identificar el proceso exotérmico que se presenta en la reacción de oxidación.
- Dar seguimiento a los ensayos de respirometría, y ensayos en columna, que contemplen un periodo de tiempo de experimentación por lo menos de 6 meses, con la finalidad de evaluar la oxidación que presentan los residuos de la industria minera.
- Identificar el tipo de microorganismo del genero thiobacillus que participan en la reacción de oxidación, en residuos de la industria minera, utilizando la técnica de respirometría.
- Cuantificar la concentración inicial de azufre y de fierro, que esta presente en la muestra que es sometida a los análisis de respirometría.

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. A.F. Gaudy, Jr., A.F. Roczich., S. Garniewski., N.R. Moran., A. Ekambaram: "Methodology for utilizing respirometric data to assess biodegradation kinetics" 42<sup>ND</sup> *Purdue University Industrial Waster Conference Proceedings*.
2. ANTHONY F. GAUDY, Jr., ANAND Ekembaram (1990): "Comparison of respirometric methods for determination of biokinetic constants for toxic and nontoxic wastes" 42<sup>ND</sup> *Purdue University Industrial Waster Conference Proceedings*.
3. ALPACA ARENA, M. "Biolixiviación nueva: La opción metalúrgica" *Rev. Inst. investig. Fac. minas metal cienc. geogr.* [online]. dic. 1998, vol.1, no.2 [citado 19 Diciembre 2006], p.97-105. Disponible en la World Wide Web: <http://www.scielo.org.pe>. ISSN 1561-0888.
4. A. TZORIS, A., CANE, D. (2002): "Tuning the parameters for fast respirometry"
5. BY K. J. Parkinson. (1981). "An Improved Method for Measuring Soil Respiration in the Field" *Journal of Applied Ecology*, 18-221-228.
6. BRYNER, L.C., BECK, J.V., DAVIS, D.B. y WILSON, D.G.
7. *Ind. Engin. Chem.*, 46, 1954, 2587-2592
8. BARTH F. SMETS, ANDREA JOBBAGY. (1996): "Evaluation of respirometric data" *Ecotoxicology and environmental safety* 33, 88-99.
9. Brierley, C. L., A. P. Briggs, (1997): "Minerals Biooxidation/Bioleaching" *Guide to Developing an Economically Viable Process. En: PDAC Annual Meeting, Toronto, Canada, March, 1997*.
10. BACELAR, P., BARRIE JOHNSON, D. (1998): "Leaching of pyrite by acidophilic heterotrophic iron-oxidizing bacteria in pure and mixed cultures" *Applied and environmental microbiology*. p. 585-590.
11. DANUTA, Z., JAUME B. (1999): "Estimation of the soil respiration using the constant pressure volumetric respirometer and the flow-through respirometer uni-res10"
12. DONOVAN, P. Ann, P. (2000): 'Reclassification of some species of thiobacillus to the newly designated genera' *Internacional Journal of systematic and evolutionary Microbiology*. 50, 511-516.
13. DUANE A. GRAVES., CRAIG A. LANG., MAUREEN E. LEAVITT. (1991): "Respirometric analysis of the biodegradation of organic contaminants in soil and water" *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 28/29.
14. DOUGLAS, E. (2002). 'Heavy Metal Mining Using Microbes'. *Microbio*. 56:65-91

15. DA COSTA VILA MA CRISTINA. (2004): *Reabilitação de solos observada através da Respirometria*.
16. ECOAMERICA: "Predicción de comportamiento de aguas ácidas" *Revista 48. Consultado noviembre.,2006*.  
[http://www.ecoamerica.cl/main/index.php?option=com\\_content&task=view&id=194&Itemid=81](http://www.ecoamerica.cl/main/index.php?option=com_content&task=view&id=194&Itemid=81)
17. EHRLICH, L., GARCIA, M. (1990): "Microbial Metal Extraction and Recovery. Business Opportunities, Technology, Assessments, and Market Forecast". Gorham int. Inc.
18. E.P.A. Environmental Protection Agency, (1994): Acid mine drainage prediction: U.S. EPA 530-R-94-036, December, 1994. (PDF file, 184 KB), <http://www.min-con.com/files//SPMC206%204-6-1.pdf>
19. ITGE Instituto Tecnológico GeoMinero de España (1998): *Minería química*
20. Instituto Geológico e Mineiro. Boletim de minas. Vol. 36. No 1. Lisboa 1999.
21. Universidade Do Porto, Faculdade de Engenharia (2003): Inventario Nacional de Resíduos Industriais
22. KEVIN, B., (1996): "Multiple Serotypes of the Moderate Thermophile *Thiobacillus caldos*, a Limitation of immunological Assays for Bioming Microorganisms" *Applied and environmental microbiology*, p. 4243-4246.
23. Levenspiel,O. (1998): *Ingeniería de las reacciones químicas*
24. LEDUC, L. LEDUC, G. (2002): 'Quantification of bacterial populations indigenous to acidic drainage streams'. *Water, Air, and Soil Pollution 135: 1-21*.
25. MAHENDRAKER, V., VIRARAGHAVAN, T. (1995)."Respirometry in environmental engineering" *J. Environ. Sci. Health, A30 (4), 713-734*.
26. PEREZ C. (2002): *Matlab® y sus aplicaciones en las ciencias y la ingeniería*. Pearson Educación, S.A., Madrid. ISBN: 84-205-3537-0.
27. Sobek, A.A., Schuller, W.A., Freeman, J.R. and Smith, R.M. (1978), *Field and laboratory methods applicable to overburden and minesoils*, EPA 600/2-78-054,203 pp.
28. SPANJERS, H., OLSSON, G. (1998): "Respirometry in Control of the Activated Sludge process" *Principles. Scientific and Technical Report No 7.IAWQ*
29. SELMAN, A. JOFFE, J. (1921): "Microorganismos concerned in the oxidation of sulfur in the soil"
30. S. Marsili-Libelli, F. Tabani. (2001): "Accuracy analysis of a respirometer for activated sludge dynamic modeling" *Waster Research 36, 1181-1192*.
31. Stefano Marsili-Libelli., Andrea Vaggi. (1997): "Estimation of respirometric activities in

- bioprocesses" *Journal of biotechnology* 52, 181-192.
32. TORRES VIDAL, A., DINIS DA GAMA C. (2000): *Caracterización climática do ambiente subterrâneo da mina de Neves Corvo*. Lisboa 42 pp.
33. <http://cegeo.ist.utl.pt/html/investiga/modelization.pdf>., consultada 19/Noviembre/2006. Disponible en Línea.
34. The Sable Systems. (1999): FC-1B OXYGEN ANALYZER. Version 1.1. Instruction Manual Edition 2.1.
35. The Sable Systems. (1999): CA-1B CARBON DIOXIDE ANALYZER. Version 1.0. Instruction Manual Edition 2.0.
36. The Sable Systems. (1999): Universal Interface. Instrucción vesion 1.3.
37. VOGEL A. *Atext-book of quantitative inorganic analysis*. (Third edition).
38. [http://www.fabreminerals.com/include/Panasqueira\\_intro/Panasqueira\\_inf\\_es.html](http://www.fabreminerals.com/include/Panasqueira_intro/Panasqueira_inf_es.html)  
Consultada en noviembre de 2006. Disponible en línea.
39. <http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Respirometria.htm>.  
Consultada 05 de Noviembre de 2006/06. Disponible en línea.

# ESTUDIO DE COMPONENTES BIOLÓGICOS DE LA FENOMENOLOGIA DE GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO DE MINAS, UTILIZANDO LA TECNICA DE RESPIROMETRIA

MA DEL ROCIO MARTINEZ LOZANO<sup>1</sup>, ANTONIO MANUEL ANTUNES  
FIÚZA<sup>2</sup>, MARIA CRISTINA DA COSTA AVILA<sup>3</sup>  
[quimrocio@hotmail.com](mailto:quimrocio@hotmail.com)  
[rmartinez@luismin.com](mailto:rmartinez@luismin.com)

MASTÉR INTERNACIONAL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS  
RECURSOS MINERALES

## RESUMEN

En el presente trabajo se estudiaron los componentes que participan en la generación de drenaje ácido de minas, en residuos que provienen de la industria minera y fue desarrollado en la Faculdade de Engenharia do Porto, en Portugal, para ello se realizaron ensayos que permitan obtener la caracterización geoquímica y física en cada uno de los residuos, además de aplicar los métodos estáticos y de cinética para evaluar la predicción de generación de drenaje ácido, como iniciativa en la investigación se aplicó la técnica de respirometría que tiene como finalidad cuantificar la concentración de oxígeno y bióxido de carbono que se consumen en la reacción de oxidación, en residuos que son susceptibles de general drenaje ácido, esta evaluación permite identificar la participación inicial de los microorganismos del genero *thiobacillus* que participan como catalizadores en la reacción.

## ABSTRACT

In the present work, the components that play a part in the generation of acid mine drainage, in wastes derived from the mining industry, were studied and was developed in the Faculdade de Engenharia do Porto, in Portugal. For this study, assays were conducted and enabled the physical and geochemical characterization of each of the wastes to be obtained. In addition, the static and kinetic methods were applied to evaluate the prediction of the generation of acid mine drainage. As an initiative in the investigation, the respirometry method was applied with the objective being to quantify the concentration of oxygen and carbon dioxide that is consumed as part of the oxidation reaction in wastes that are susceptible to the generation of acid mine drainage. This evaluation permits identification of the initial participation of microorganisms from the genera thiobacillus that take part as catalysts in the reaction.

## INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de la sustentabilidad de la actividad minera, surge la necesidad de atender la problemática ambiental que presentan todas aquellas empresas con problemas de generación de drenaje ácido de minas, presentándose este fenómeno por la presencia de oxígeno, mineral con presencia de sulfuros y agua, por lo que en estas condiciones favorecen el desarrollo de microorganismos del género *thiobacillus thiooxidans*, que participan como catalizadoras en la reacción de oxidación, por tal motivo se suma a la solución de estos problemas, las Instituciones Educativas, Centros de Investigación y el mismo Sector Industrial, por las razones que se mencionan en el presente, en la Facultad de Engenharia do Porto, en Portugal, se realizó un estudio, que incluye la evaluación de componentes biológicos de la fenomenología en la generación de drenaje ácido de minas, aplicando la técnica de respirometría, ésta técnica está basada en la medición del consumo de oxígeno que se requiere para llevar a cabo el proceso de oxidación de un sustrato que es predecible de generar drenaje ácido de minas, además de identificar el inicio de la participación de los microorganismos que se desarrollan en condiciones ácidas, como son las *thiobacillus thiooxidans*, ya que estas toman su carbono celular del bióxido de

carbono que está presente en el ambiente, favoreciendo así un proceso en condiciones aerobias. Cabe señalar la importancia que presenta la aplicación de la técnica de respirometría en el desarrollo de la investigación, ya que esta metodología inicia su desarrollo a finales del siglo XIX y es aplicado para evaluar la participación que tienen los microorganismos en tratamientos para el agua residual, descontaminación de suelos contaminados con hidrocarburos, y compuestos orgánicos poli-cíclicos, también se contempló la evaluación de generación de drenaje ácido, aplicando la metodología que establece la Environmental Protection Agency, de los Estados Unidos (EPA), en su guía para la predicción de este fenómeno, ésta guía contempla la evaluación del Potencial de Generación de drenaje ácido de mina, por los métodos estáticos y por los métodos de cinética, para ello se contempló la participación de la Industria minera en Portugal, como es la unidad minera Panasqueira la cual extrae y beneficia como principal elemento el volframio y Neves Corvo, que extrae y beneficia principalmente cobre, aplicando la metodología descrita para la evaluación de componentes que participan en la generación de drenaje ácido de minas en los residuos mineros que se generan como parte de su proceso de extracción y beneficio de minerales de

volframio y cobre, con esta participación se pone de manifiesto el compromiso ambiental que adquieren las empresas mineras para contribuir a identificar los impactos ambientales hacia el medio ambiente.

## **METODOLOGÍA**

En el presente estudio se obtuvo muestra de residuos provenientes de la industria minera los cuales fueron sometidos a una variedad de pruebas analíticas con la finalidad de realizar un estudio en el que se evaluaron los componentes que participan en la generación de drenaje ácido de minas. Como primer análisis se realizó a cada una de las muestras un análisis químico en la que se determinó los elementos metálicos presentes, ya que este parámetro tiene su importancia debido a que en condiciones ácidas se presenta la disolución de metales pesados que en concentraciones elevadas son considerados tóxicos para el ambiente, posteriormente se determinó la granulometría esto con la finalidad de conocer el diámetro de partícula, ya que es importante conocer el área que está disponible en la reacción de oxidación, una vez realizado estos análisis, se aplicó la metodología que establece la Environmental Protection Agency, de los Estados Unidos (EPA), en la que se determinó a cada una de las muestras el potencial de generación de drenaje

ácido de minas, a través de los métodos estáticos, considerando en esta ocasión, la aplicación del balance ácido base (ABA), balance ácido base modificado, y extracción líquida de ácido, estos análisis contemplan la evolución del potencial de generación de acidez, en cuanto a la evaluación de la cinética de generación de ácidos se contempló, análisis en columna y extracción de iones por Soxhlet, estos métodos determinan el tiempo de generación de drenaje ácido de mina, y se diferencia de los métodos estáticos por usar una mayor cantidad de muestra, así como determinar el tiempo de generación de drenaje ácido de minas.

Las pruebas de balance ácido base (ABA), fueron desarrolladas en el año de 1974 para evaluar los residuos de la industria de carbón y fue modificada por Sobek en 1978.

El potencial de drenaje ácido de minas es determinado a partir de la determinación de azufre total como se muestra en la siguiente ecuación

$$AP = 31,25 \% S$$

El potencial neto de neutralización, se determina sustrayendo del potencial de acidez (AP), al potencial de neutralización, que es una medida de diferencia entre los potenciales de

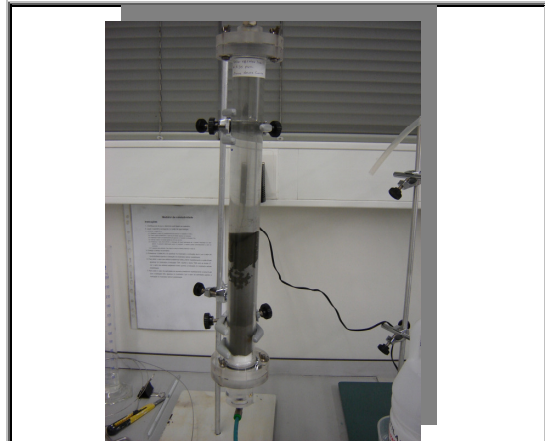


neutralización de generación de acidez. Los valores pueden ser positivos o negativos, los valores inferiores a 20 kilogramos de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ )/Tonelada de roca, son presumibles generadores de drenaje ácido de minas, para los valores superiores a 20, indican una capacidad de no generación de drenaje ácido de minas y para valores entre -20 y +20 es difícil de predecir el potencial de generación de drenaje ácido.

Para los ensayos de cinética se utilizó el siguiente equipo: Columna de acrílico, equipo Soxhelet y equipo de respirometría.

La columna tiene una longitud de 40 cm con diámetro de 3 cm, en ella se colocaron 150 gramos de muestra con 250 ml de agua destilada, se retuvo el agua en la columna por un periodo de tiempo de 3 días, posteriormente se retiró y se dejó sin agua por los siguientes tres días, este procedimiento tiene la finalidad de favorecer las condiciones para la entrada de oxígeno y propiciar el contacto de éste con la superficie del sólido, este procedimiento se realizó por un periodo de tiempo de dos meses.

En la *Figura 1*, se puede observar la columna que se utilizó en el proceso de experimentación a escala laboratorio.



**Figura 1.** Extracción de lixiviados en columna.

La utilización de extracción de iones utilizando el equipo Soxhelet, se realizó con la finalidad de extraer los iones solubles en agua y bajo la influencia del incremento de temperatura, en este proceso se trabajó a una temperatura constante de 100 °C.

El procedimiento se mantuvo por 8 días y se realizaron ensayos diarios para determinar parámetros como: sólidos disueltos totales en mg/l, conductividad en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , pH, Temperatura en °C y salinidad, en el volumen que se recuperó diariamente.

El equipo Soxhelet tiene una capacidad de 500 mL, por lo que se manejó una muestra de 150 gramos en 300 mL de agua destilada, el equipo puede visualizarse en la *Figura 2*



**Figura 1.** extracción de iones por Soxhlet

Como inicio en la etapa de investigación se aplicó la técnica de respirometría, este proceso se aplicó a la muestra de residuos de la unidad minera Panasqueira, para ellos se contempló una muestra de 300 gramos y 250 mL de agua de lluvia, la cual se caracterizó previamente para cuantificar los iones presentes, la muestra se colocó en un reactor tipo batch, y posteriormente se sometió al proceso de respirometría, además se consideró la medición de un blanco, esto con la finalidad de obtener referencia analítica en la cuantificación del consumo de oxígeno y bióxido de carbono, requeridos en la reacción de oxidación.

El material que se utilizó para los ensayos de respirometría fueron los siguientes:

### **Reactivos**

- Drierite
- Gel de sílice
- Ascarite

### **Equipo**

Respirometría el cual contempla

- Columnas
- Reactores
- Analizador de oxígeno
- Analizador de bióxido de carbono.
- Computadora
- Medidor de flujo
- Bomba
- Interconector de canales

La metodología que se contempla en el proceso de respirometría, inicia con la captación de aire del ambiente el cual se deja pasar a través de la columna que contiene drierite y gel de sílice, ya que este tiene la finalidad de extraer la humedad presente en el flujo de aire, posteriormente es succionado por una bomba modelo PP2, para conducirlo hacia el medidor de flujo, este tiene la finalidad de regular la entrada de flujo el cual para este ensayo se contempla 15 mL por segundo, de ahí el flujo entra al reactor que contiene los residuos, esto con la finalidad de mantener un medio aerobio, puesto que la reacción de oxidación requieren como principal elemento la presencia de oxígeno, posteriormente se pasa por una

segunda columna para extraer la humedad que aun pudiera contener, seguido a la entrada del condensador, posteriormente se cuantifica la cantidad de bióxido de carbono por medio de un analizador del mismo, una vez pasado este proceso, se pasa por una tercera columna la cual tiene como objetivo absorber el bióxido de carbono presente en el flujo de aire, finalmente la señal de los equipos es enviada por sistema digital a una computadora y el flujo de aire es regresado hacia el ambiente, todo este proceso se presenta de manera constante por lo que se obtiene lecturas por minuto.

El proceso antes descrito se pasa sobre un blanco el cual tiene parámetro de comparación en la cuantificación de oxígeno y bióxido de carbono, para el procesamiento de información se requirió en uso del Software MatLab, por la gran cantidad de información que se genera en las lecturas.

## RESULTADOS

### **Ensayos estáticos**

Los resultados obtenidos en los ensayos estáticos aplicados a residuos provenientes de la unidad minera Panasqueira y Neves Corvo, indican que son susceptibles de generar drenaje ácido de minas, siendo de gran utilidad la información que se generó en el presente estudio, para tomar las medidas de prevención, que permitan

minimizar los impactos ambientales que se puedan presentar hacia el medio ambiente.

Las pruebas estáticas determinan básicamente si la muestra es potencialmente generadora de drenaje ácido de minas, por lo que no contempla la evaluación de la cinética de generación.

Los resultados obtenidos se presentan en la *Tabla 1*. La muestra que se identifica con el número 1, proviene de la unidad minera Panasqueira, mientras que la que se identifica con el número 2 de Neves Corvo.

**Tabla 1:** Ensayos estáticos.

Descripción	PNN	Predicción DAM
Muestra 1.	0.31	Genera DAM
Muestra 2.	8.81	Genera DAM

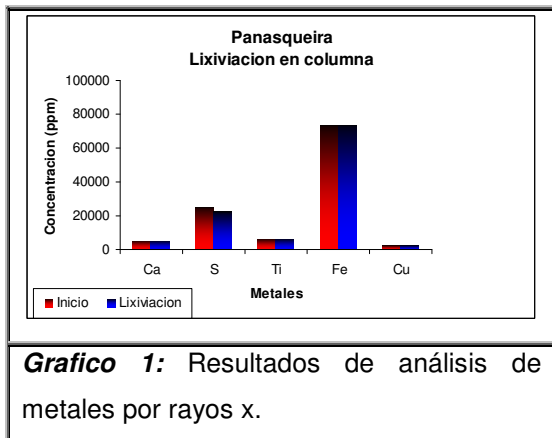
**DAM:** Drenaje ácido de minas

### **Ensayos de cinética**

En lo que respecta a los ensayos de cinética, se aplicó la metodología que establece la Environmental Protection Agency, de los Estados Unidos (EPA), como son ensayos en columna y por equipo Soxhlet, los ensayos realizados con esta metodología tienen la finalidad de determinar la cinética de generación de drenaje ácido de minas, en cada una de las muestras de residuos que proviene de las unidades mineras Panasqueira y Neves Corvo.

En el *grafico 1,2,3 y 4*, se pueden visualizar los elementos metálicos que fueron lixiviados por lo ensayos en columna, de la muestra que proviene de la unidad minera Panasqueira y Neves Corvo.

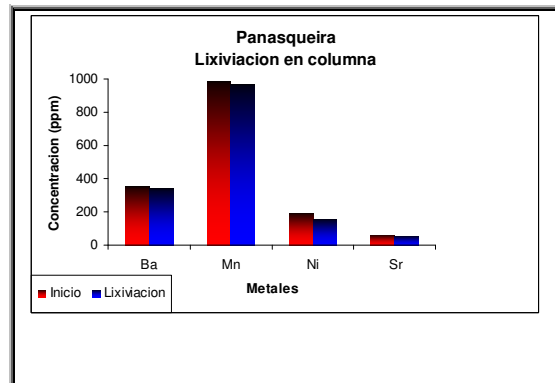
Mientras que en el *grafico 5*, se presentan los resultados obtenidos de la muestra que proviene de la unidad minera Panasqueira, esto aplicando la metodología con equipo Soxheler.



**Grafico 1:** Resultados de análisis de metales por rayos x.

En el *grafico 1*, se muestra los resultados de la muestra de residuo de la unidad minera Panasqueira, en la que se puede apreciar que el elemento que presentó lixiviación es el azufre, mientras que el calcio, titanio, fierro y cobre se mantuvieron constantes.

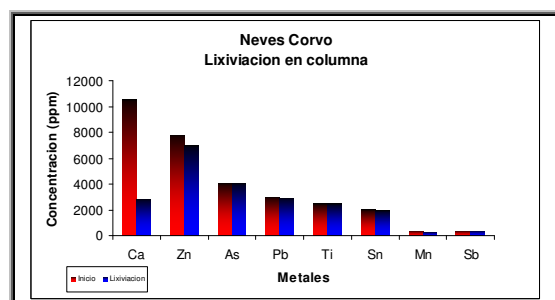
Estos resultados que los elementos que no fueron lixiviables en presencia de agua, se debe a su estabilidad en el medio y a su nula solubilidad a temperatura ambiente.



**Grafico 2:** Resultados de análisis de metales por rayos x.

En el *grafico 2*, se observa que en los residuos, se logró una lixiviación de los elementos como son: bario, manganeso, estroncio y níquel.

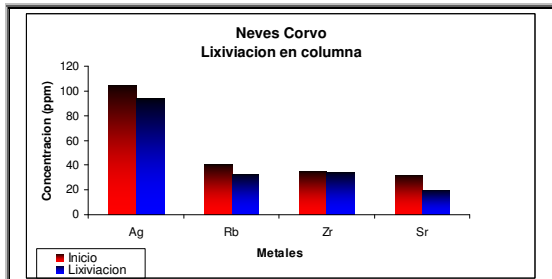
La lixiviación que se presentó en residuos de la unidad minera Neves Corvo, se puede visualizar en el *grafico 3*, por lo que indica como mayor elemento lixiviante el calcio, posteriormente el zinc, seguido de arsénico, plomo, titanio, estroncio y manganeso a temperatura ambiente.



**Grafico 3:** Resultados de análisis de metales por rayos x.

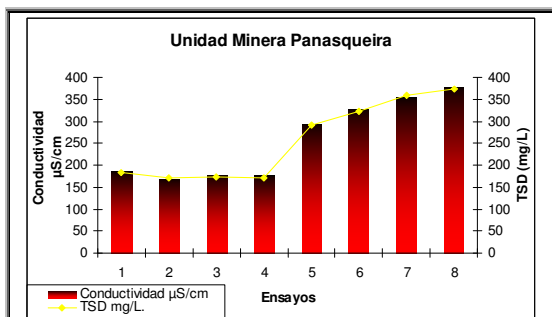
Siguiendo con la evaluación, el *grafico 4*, se puede observar los elementos

que presentaron lixiviación como son: plata, níquel, zinc y estroncio a temperatura ambiente.



**Grafico 2:** Resultados de análisis de metales por rayos x.

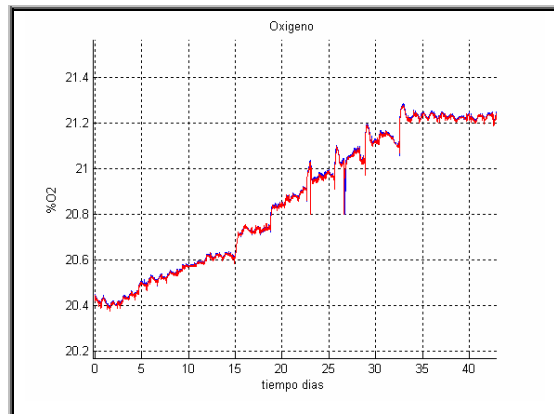
Con referente a la extracción de iones con equipo soxhelet como se indica en el grafico 5, se puede visualizar un incremento de a cuerdo al número de ensayos, también se pudo comprobar la relación directa que se presenta entre el parámetro de sólidos disueltos totales y la conductividad.



**Grafico 5:** Extracción de iones en equipo Soxhelet.

Con referente a los resultados obtenidos en los ensayos de respirometria se puede observar en el *grafico 6*, los resultados de consumo de oxigeno y bióxido de carbono, estos

dos parámetros son los que fueron evaluados y analizados en los ensayos de respirometría, tomando su importancia por uno de las variables a evaluar en la reacción de oxidación, en la generación de drenaje ácido de minas, para este ensayo se considero evaluar únicamente la muestra que provenientes de la unidad minera Panasqueira, considerando un tiempo de reacción de 45 días como se puede ver el grafico 6.

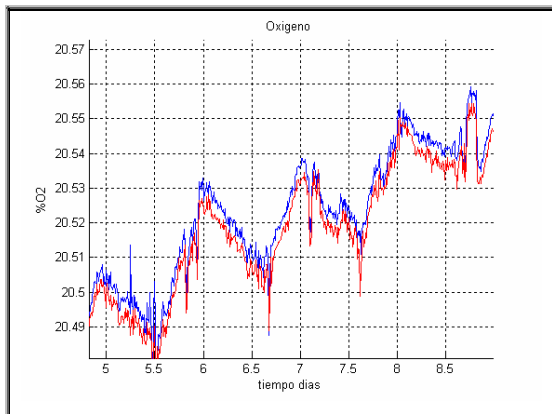


**Grafico 6:** Concentración de oxigeno en respirometría

En el grafico 6, el color azul indica el consumo de oxigeno del reactor que contiene los residuos, mientras que el color rojo indica la presencia de oxigeno en el blanco.

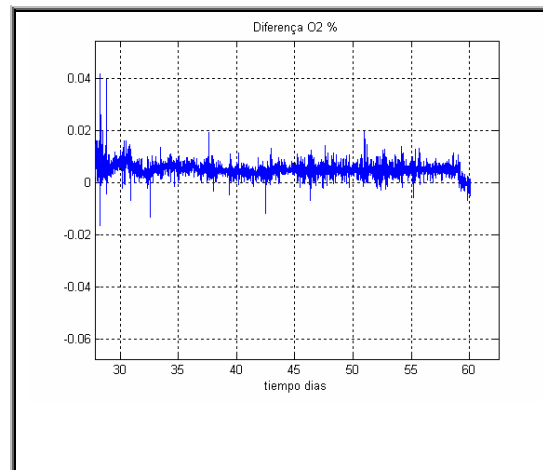
La cuantificación de oxigeno registrado en un tiempo cero nos da un valor de 20.42%, lo que indica las primeras lecturas de la presencia de oxigeno en el reactor.

En el grafico 7, se puede observar el consumo de oxigeno que se presentó en el reactor, por lo que se puede observar un bajo consumo de éste parámetro, y por tal motivo no se puede afirmar que sea parte del inicio del proceso de oxidación ya que es recomendable dar seguimiento al proyecto de investigación, de tal manera que se pueda obtener mayor cantidad de datos de experimentación a un tiempo mayor.



**Grafico 7:** Diferencia de consumo de oxigeno con respecto al blanco.

En el grafico 8, se puede observar el la direfencia del bajo consumo de oxigeno que se consumió en los ensayos de respirometría, siendo éste análisis importante por el conocimiento que proporciona para la identificación del inicio en el proceso de oxidación, así como asegurar las condiciones que demanda la evaluación de generación de drenaje ácido de mantener condiciones aerobias para el desarrollo de la reacción.



**Grafico 8.** Inicio del proceso pseudo-estacionario.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo de llego a las siguientes conclusiones:

- En la aplicación de los métodos estáticos en residuos de la unidad minera Panasqueira y Neves Corvo, indicaron ser potencialmente generadores de drenaje ácido de minas.
- En la aplicación de métodos de cinética, como son ensayos en columna y equipo Soxhlet, algunos de elementos presentaron solubilidad como se puede apreciar en los gráficos mostrados en la sección de resultados.
- La aplicación de la técnica de respirometría como inicio de la investigación, permitió la

evaluación de parámetros que participan en la reacción de oxidación en la generación de drenaje ácido de minas, como fue la medición de oxígeno y bióxido de carbono, por lo que se considera un gran avance en el área de investigación por la generación de información que permitirá contar con las herramientas técnicas y científicas de la fenomenológicos de generación de drenaje ácido de minas.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco el apoyo brindado por La Faculdade de Engenharia do Porto, en Portugal, especialmente al Dr. Antonio Antunes Fiúza y a la Dr. Ma. Cristina Da Costa Vila.

Agradezco también el apoyo recibido por el programa **Alfa**, así como a todos los que con su esfuerzo y dedicación han logrado el desarrollo del proyecto Maestría Internacional para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Minerales.

#### **REFERENCIAS**

DA COSTA VILA MA CRISTINA. (2004): *Reabilitação de solos observada através da Respirometria*.

E.P.A. Environmental Protection Agency, (1994): Acid mine drainage prediction: U.S. EPA 530-R-94-036, December, 1994. (PDF file, 184 KB), <http://www.min-con.com/files//SPMC206%204-6-1.pdf>

ITGE Instituto Tecnológico GeoMinero de España (1998): *Minería química*

Levenspiel, O. (1998): *Ingeniería de las reacciones químicas*

LEDUC, L. LEDUC, G. (2002): 'Quantification of bacterial populations indigenous to acidic drainage streams'. *Water, Air, and Soil Pollution* 135: 1-21.

MARTINEZ L. Rocío: *Estudio de componentes de la fenomenología de generación de drenaje ácido de minas*. 2006.

S. Marsili-Libelli, F. Tabani. (2001): "Accuracy analysis of a respirometer for activated sludge dynamic modeling" *Water Research* 36, 1181-1192.

Universidade Do Porto, Faculdade de Engenharia (2003): Inventario Nacional de Resíduos Industriais

# **ANEXO A**

## **RESULTADOS DE ENSAYOS POR METODOS ESTÁTICOS**



# **ANEXO B**

## **RESULTADOS DE ENSAYOS POR METODOS DE CINÉTICA**

# **ANEXO C**

## **PROGRAMA MATLAB UTILIZADO PARA ENSAYOS EN RESPIROMETRIA**

# **ANEXO D**

## **RESULTADOS DE ELEMENTOS METÁLICOS**

# **ANEXO E**

## **RESULTADOS DE ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS**

**RESULTADOS DE ENSAYO POR METODO DE CINÉTICA  
EXTRACCIÓN DE IONES EN COLUMNA**

**Tabla 1:** Datos experimentales de la unidad minera Panasqueira en columna

Fecha	Descripción	Recuperación H <sub>2</sub> O mL	pH	Temperatura (°C)	Conductimetria (μS/cm)	TSD (mg/L)	Salinidad
10 de Noviembre de 2006	Ensayo 01	150	6.780	23	1005	1012	0.3
17 de Noviembre de 2006	Ensayo 02	170	6.736	19.2	734	730	0.1
22 de Noviembre de 2006	Ensayo 03	170	7.042	18.9	461	463	0.0
24 de Noviembre de 2006	Ensayo 04	170	6.994	19.3	188.7	189	0.0
01 de Diciembre de 2006	Ensayo 05	170	7.114	17.3	257	258	0.0
08 de Diciembre de 2006	Ensayo 06	170	6.948	16.6	167.3	169	0.0
15 de Diciembre de 2006	Ensayo 07	170	6.486	16.6	100.7	102	0.0

**Nota:** Ensayo usando 150 gr de muestra en 250 mL de agua destilada.

Retención de humedad de 3 días

**Tabla 2:** Datos experimentales de la unidad minera Neves Corvo en columna

Fecha	Descripción	Recuperación H <sub>2</sub> O mL	pH	Temperatura (°C)	Conductimetria (µS/cm)	TSD (mg/L)	Salinidad
13 de Noviembre de 2006	Ensayo01	190	7.144	18.9	1,847	1,845	2.1
20 de Noviembre de 2006	Ensayo 02	180	7.468	17.9	1,864	1,860	3.3
27 de Noviembre de 2006	Ensayo 03	180	7.201	18.5	1,852	1,848	1.1
04 de Diciembre de 2006	Ensayo 04	180	7.369	14.8	1,850	1,847	1.2
11 de Diciembre de 2006	Ensayo 05	192	7.225	17.8	1,847	1,846	1.1
18 de Diciembre de 2006	Ensayo 06	200	7.038	16	1,870	1,877	0.8
25 de Diciembre de 2006	Ensayo 07	200	7.006	16	1,780	1,783	0.8
02 de Enero de 2007	Ensayo 08	200	7.108	17.4	1,648	1,650	0.1
09 de Enero de 2007	Ensayo 09	200	7.003	18.8	1,579	1.582	0

**Nota:** Ensayo usando 150 gr de muestra en 250 mL de agua destilada.

Retención de humedad de 3 días.









```
20 del [delete] db:2077
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
```







### **RESULTADOS DE ENSAYOS POR LOS METODOS ESTÁTICOS**

En la tabla 1 y 2, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados a muestras de residuos de la unidad minera Panasqueira utilizando para ello los métodos de análisis estáticos en la predicción de drenaje ácido de minas.

**Tabla 1:** Resultados por métodos estáticos ABA y ABA modificado.

Fecha	Descripción	Método de análisis	Parámetro	Resultado gr CaCO <sub>3</sub> /kg Residuo	% Azufre	PNN	Predicción de drenaje ácido de minas
03 de Noviembre de 2006	Ensayo 1. Residuo mina Panasqueira	ABA Tiempo de reacción 2 h pH= 5.	Carbonato de Calcio (CaCO <sub>3</sub> )	0.225	1.73	0.32	Genera acidez
04 de Noviembre de 2006	Ensayo 2. Residuo mina Panasqueira	ABA (Modificado) Tiempo de reacción 24 h pH= 8.3.	Carbonato de Calcio (CaCO <sub>3</sub> )	0.228	1.73	0.31	Genera acidez

\* Utilizando ácido clorhídrico al 1 N.

**Tabla 2:** Resultados por métodos estáticos en la producción líquida de acidez.

Fecha	Descripción	Método de análisis	Parámetro	Resultado (gr CaCO <sub>3</sub> /kg Residuo)	Predicción de drenaje ácido de minas
03 de Noviembre de 2006	Ensayo 2. Residuo mina Panasqueira	Producción líquida de ácido, Tiempo de reacción 2 h pH= 5.	Carbonato de Calcio (CaCO <sub>3</sub> )	20	Difícil predecir el potencial de generación de drenaje ácido de minas

\* Utilizando peróxido de hidrógeno al 15%.

De igual manera en la tabla 3 y 4, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados a muestras de residuos de la unidad minera Neves Corvo utilizando para ello los métodos de análisis estáticos en la predicción de drenaje ácido de minas.

**Tabla 3:** Resultados por métodos estáticos ABA y ABA modificado.

Fecha	Descripción	Método de análisis	Parámetro	Resultado (gr CaCO <sub>3</sub> /kg Residuo)	% Azufre	PNN	Predicción de drenaje ácido de minas
07 de Noviembre de 2006	Ensayo 1. Residuo mina Neves Corvo	ABA Tiempo de reacción 2 h. pH= 5.	Carbonato de Calcio (CaCO <sub>3</sub> )	0.218	28.8	8.81	Genera acidez
08 de Noviembre de 2006	Ensayo 2. Residuo mina Neves Corvo	ABA (Modificado) Tiempo de reacción 24 hr. pH= 8.3.	Carbonato de Calcio (CaCO <sub>3</sub> )	0.217	28.8	8.81	Genera acidez

\* Utilizando ácido clorhídrico al 1 N.



**Tabla 4:** Resultados por métodos estáticos en la producción líquida de acidez.

Fecha	Descripción	Método de análisis	Parámetro	Resultado (gr CaCO <sub>3</sub> /kg Residuo)	Predicción de drenaje ácido de minas
03 de Noviembre de 2006	Ensayo 2. Residuo mina Neves Corvo	Producción líquida de ácido), Tiempo de reacción 2 h pH= 5.	Carbonato de Calcio (CaCO <sub>3</sub> )	6.316	Es potencial generador de drenaje ácido de minas

\* Utilizando peróxido de hidrógeno al 15%.



### BOLETIN DE ANALISIS

*[Signature]*

**Analisis:** 1. Alimento con edulcorante. Muestra: 1. Granos de mazorca de Maiz de Azúcar.  
**Referencia:** FEFF, Lily Maria. "Maíz Dulce".  
**Elaborado por:** Ana Ls. Balcón. Form. Nº 142014400 P/RT/O  
**Fecha:** 18/03/2010  
**Requisitos:** Programa de Alimentos Básicos  
**Estado Sólido:**  Líquido  Sólido  Gaseoso  
**Metodología:** Método: Norma V N 813733, "NUTRIMENTOS"  
**Sección:** Planificación de Muestreo  
**Muestreo:** Repetido: 250 g PK. Análisis: 10 g PK. Envase: 10 g.  
**Fecha de Emisión:** 11/03/2010  
**Fecha de Caducidad:** 01 de Agosto de 2010.  
**Analista:** María Ester M. Saldaña

(Resultados dados en ppm)

Componente	Mo	S	N	Zn	Na	Ca	Mg	F	Cl	C	S	P	K	Cu	Zn	Fe	Co	Mn	Se	As	Si	V	Pb	Cd	Ci	Cr	Al	M
------------	----	---	---	----	----	----	----	---	----	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	----	---

\*MoA:  $100\% \pm 1.5\%$  (Efectividad con análisis)  $100\% \pm 1.5\%$  (Repetibilidad) con el sistema  $100\% \pm 1.5\%$  (M.O.A) y  $100\% \pm 1.5\%$  (Repetibilidad)

San Mateo de los Andes, G.D. de Venezuela de 2010  
**O. Rangel** Laboratorio  
**María Ester M. Saldaña** Analista  
**Maria Ester M. Saldaña** Analista  
**María Ester M. Saldaña** Analista  
**María Ester M. Saldaña** Analista  
**María Ester M. Saldaña** Analista

**BOLETÍN DE ANÁLISIS**

**Orden N° 1487/2008**  
**N° de Análisis 418/08**  
**Fecha de Emisión 14/11/2008**

**Provincia** Buenos Aires  
**Municipio** San Martín

**Provincia de Emisión** Buenos Aires  
**Municipio de Emisión** San Martín

**Provincia de Recepción** Buenos Aires  
**Municipio de Recepción** San Martín

**Provincia de Destino** Buenos Aires  
**Municipio de Destino** San Martín

**Provincia de Origen** Buenos Aires  
**Municipio de Origen** San Martín

**Provincia de Proveniencia** Buenos Aires  
**Municipio de Proveniencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

**Provincia de Procedencia** Buenos Aires  
**Municipio de Procedencia** San Martín

(Repetir en cada caso)

Mostrar	Mo	Di	Mi	Jue	Vie	Sáb	Dom	Mo	Di	Mi	Jue	Vie	Sáb	Dom	Mo	Di	Mi	Jue	Vie	Sáb	Dom
Mostrar	Mo	Di	Mi	Jue	Vie	Sáb	Dom	Mo	Di	Mi	Jue	Vie	Sáb	Dom	Mo	Di	Mi	Jue	Vie	Sáb	Dom

**Nota:** Este informe es informativo y no constituye un diagnóstico. El laboratorio no se responsabiliza por los resultados obtenidos en el análisis de muestras que no sean de origen humano. El presente informe es válido para fines de control de calidad y no para fines de diagnóstico. El presente informe es válido para fines de control de calidad y no para fines de diagnóstico. El presente informe es válido para fines de control de calidad y no para fines de diagnóstico.

**Dr. Mariana L. Soria**  
 Responsable del Servicio de Análisis de Laboratorio

**Dr. Mariana L. Soria**  
 Responsable del Servicio de Análisis de Laboratorio

**Dr. Mariana L. Soria**  
 Responsable del Servicio de Análisis de Laboratorio

**Dr. Mariana L. Soria**  
 Responsable del Servicio de Análisis de Laboratorio

INETI  
Instituto Nacional de Estadística e Informática

IPQC  
Laboratorio

**BOLETIN DE ANALISE**

**Analisis** **Boletim nº** 44/Intervenc  
**Requerente** **Nº Orden de** 242/2006

**Indicador** **Requisito** **Requisito**  
Lima de Intendencia de Salud de Intendencia  
Lima de Intendencia de Salud de Intendencia

**Estado Solicitado** **Analisis preventivo** **Requisito**  
Analisis preventivo de riesgo para el consumidor

**Metodologia** **Metodologia** **Requisito**  
Metodologia de analisis de riesgo para el consumidor

**Fecha de Emision de Informe** **Fecha de Emision de Informe** **Requisito**  
Fecha de Emision de Informe de 07/11/2006

**Nota:** **Nota:**  
Os valores dados para a gravidade da amostra em referencia, encontram-se em anexo.

5. Muestra de leche, 06/11/2006

O. C. C. C.  
Nueva Oficina



Period	Volume	Period	Volume
1.000	2.20	1.000	2.20
2.000	4.40	2.000	4.40
3.000	6.60	3.000	6.60
4.000	8.80	4.000	8.80
5.000	11.00	5.000	11.00
6.000	13.20	6.000	13.20
7.000	15.40	7.000	15.40
8.000	17.60	8.000	17.60
9.000	19.80	9.000	19.80
10.000	22.00	10.000	22.00
11.000	24.20	11.000	24.20
12.000	26.40	12.000	26.40
13.000	28.60	13.000	28.60
14.000	30.80	14.000	30.80
15.000	33.00	15.000	33.00
16.000	35.20	16.000	35.20
17.000	37.40	17.000	37.40
18.000	39.60	18.000	39.60
19.000	41.80	19.000	41.80
20.000	44.00	20.000	44.00
21.000	46.20	21.000	46.20
22.000	48.40	22.000	48.40
23.000	50.60	23.000	50.60
24.000	52.80	24.000	52.80
25.000	55.00	25.000	55.00
26.000	57.20	26.000	57.20
27.000	59.40	27.000	59.40
28.000	61.60	28.000	61.60
29.000	63.80	29.000	63.80
30.000	66.00	30.000	66.00

**BOLETÍN DE ANÁLISE**

**América** **Bolivia** **Estimaciones**  
**Requisitos** **Nº Orden** **LD**  
**4152006**

**Requisitos** 1. Anal. de Transacción de Venta de Vehículo Nuevo  
2. ECEP de Vehículo Nuevo para  
para el Registro para OCA/07/20070

**Estado** **Requisitos** **Reg. ECEP**  
Análisis paramétrico de muestra por sexo por

**Metodología** **ANÁLISIS**

**Objeto** **Caracterización de Mercados No-Activos** **Región: 822(NM)**  
**Data de Inicio de Análisis:** 09/11/2006 **Data de Cierre de Análisis:** 18/11/2006

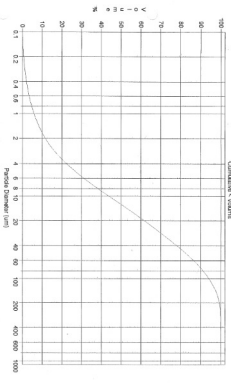
Nota: On video dobles para a generalidad da mostra en referida recenseiro en  
menor.

5. Marzo de 2006, 19/11/2006

O Colega  
Miguel Ángel  
Alvaro García



File name: E220248151      Client ID: E220248151  
 Operator:      Date:      Ref number: 1  
 Project name: LA3 (SE EU)      Start height: 0.000000  
 Core number: 86      Start time: 12/01/2005  
 100% Core Parameters  
 Depth: 120      Pressure: 1.3118



Calculations from 100.000 to 900.000 nm  
 Volume: 2.2724 cm<sup>3</sup>      80.000 g/L      80.000 g/L  
 Mass: 2.2724 g      80.000 g/L      80.000 g/L  
 Pore Volume: 2.2724 cm<sup>3</sup>      80.000 g/L      80.000 g/L  
 Mean Pore Size: 2.2724 nm      80.000 g/L      80.000 g/L  
 Volume: 2.2724 cm<sup>3</sup>      80.000 g/L      80.000 g/L  
 Pore Volume: 2.2724 cm<sup>3</sup>      80.000 g/L      80.000 g/L  
 Mean Pore Size: 2.2724 nm      80.000 g/L      80.000 g/L  
 Volume: 2.2724 cm<sup>3</sup>      80.000 g/L      80.000 g/L  
 Pore Volume: 2.2724 cm<sup>3</sup>      80.000 g/L      80.000 g/L  
 Mean Pore Size: 2.2724 nm      80.000 g/L      80.000 g/L

Station	Profile	Volume	Area	Perimeter	Area	Perimeter	Area	Perimeter
1+000	1.000	8.88	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2+000	2.000	22.83	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
3+000	3.000	43.88	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
4+000	4.000	64.88	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
5+000	5.000	85.88	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
6+000	6.000	106.88	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
7+000	7.000	127.88	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
8+000	8.000	148.88	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
9+000	9.000	169.88	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000
10+000	10.000	190.88	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
11+000	11.000	211.88	11.000	11.000	11.000	11.000	11.000	11.000
12+000	12.000	232.88	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000
13+000	13.000	253.88	13.000	13.000	13.000	13.000	13.000	13.000
14+000	14.000	274.88	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000
15+000	15.000	295.88	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
16+000	16.000	316.88	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000
17+000	17.000	337.88	17.000	17.000	17.000	17.000	17.000	17.000
18+000	18.000	358.88	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000
19+000	19.000	379.88	19.000	19.000	19.000	19.000	19.000	19.000
20+000	20.000	400.88	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
21+000	21.000	421.88	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000
22+000	22.000	442.88	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000
23+000	23.000	463.88	23.000	23.000	23.000	23.000	23.000	23.000
24+000	24.000	484.88	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000
25+000	25.000	505.88	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000
26+000	26.000	526.88	26.000	26.000	26.000	26.000	26.000	26.000
27+000	27.000	547.88	27.000	27.000	27.000	27.000	27.000	27.000
28+000	28.000	568.88	28.000	28.000	28.000	28.000	28.000	28.000
29+000	29.000	589.88	29.000	29.000	29.000	29.000	29.000	29.000
30+000	30.000	610.88	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000