



Predição de Futura Qualidade de Lago de Cava com PHREEQC

Prediction of Future Quality of Pit Lake with PHREEQC

Flávio de Moraes Vasconcelos Ph.D. e
Marcelo Pereira Queiroz /Hidrogeo Eng. & Gest.
de Proj. Ltda;
Rodrigo D. Santos/ Equinox Gold;
Luiz Fregadolli/Equinox Gold.

Belo Horizonte, 24 de Novembro de 2021



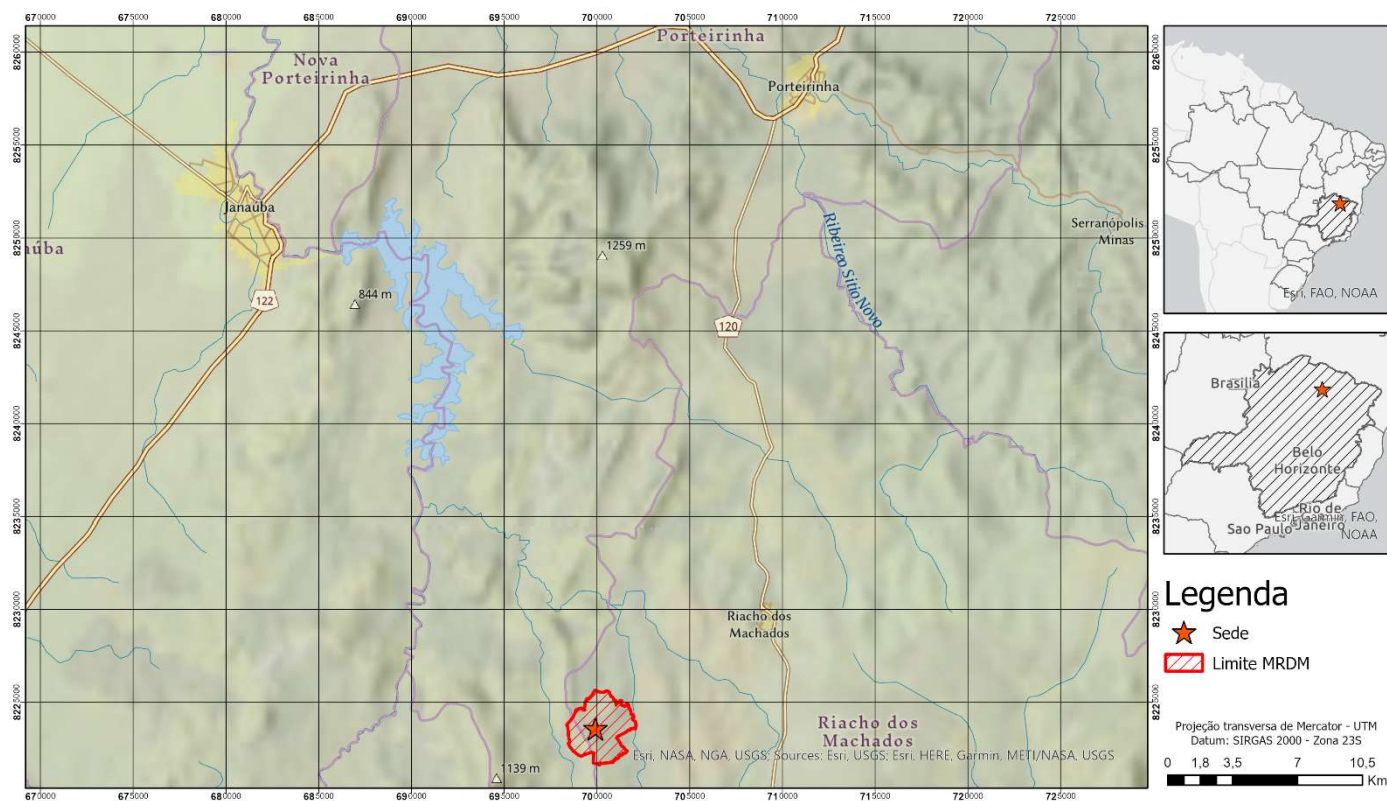


1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1ST LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1^{ER} CONGRESSO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA



1. INTRODUÇÃO

- **MRDM - Mineração Riacho dos Machados, localizada a cerca de 580 km de Belo Horizonte, ao norte do Estado de Minas Gerais.**





1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1ST LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1^{ER} CONGRESSO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA



1. INTRODUÇÃO

A exploração de uma cava a céu aberto pode levar a formação de um lago com o passar do tempo. É importante que sejam desenvolvidas considerações sobre a qualidade da água esperada no lago da cava, tendo como base as características litológicas, a composição aproximada das paredes da cava, as contribuições hidroquímicas e as influências climatológicas esperadas.

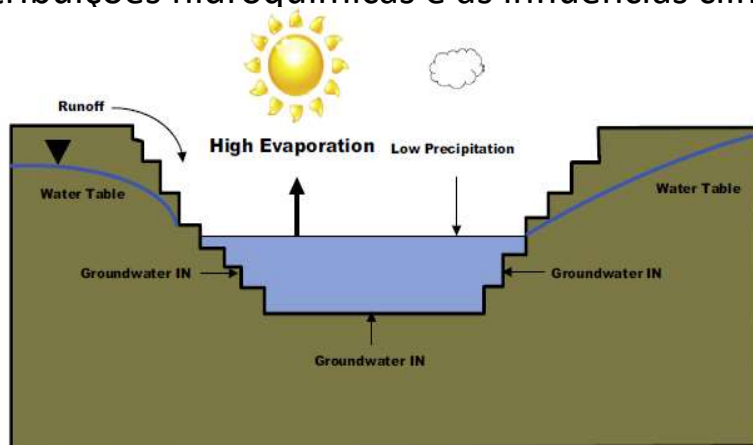


Figura 1: Representação esquemática da seção da futura cava e um balanço hídrico (Modificado de Castendyk, 2009 apud Castendyk et al., 2014).



1. INTRODUÇÃO

Apesar de existirem milhares de lagos futuros e existentes, há relativamente poucos estudos de modelos numéricos de evolução de qualidade de água da cava publicados em jornais científicos (SALMON *et al*, 2017).

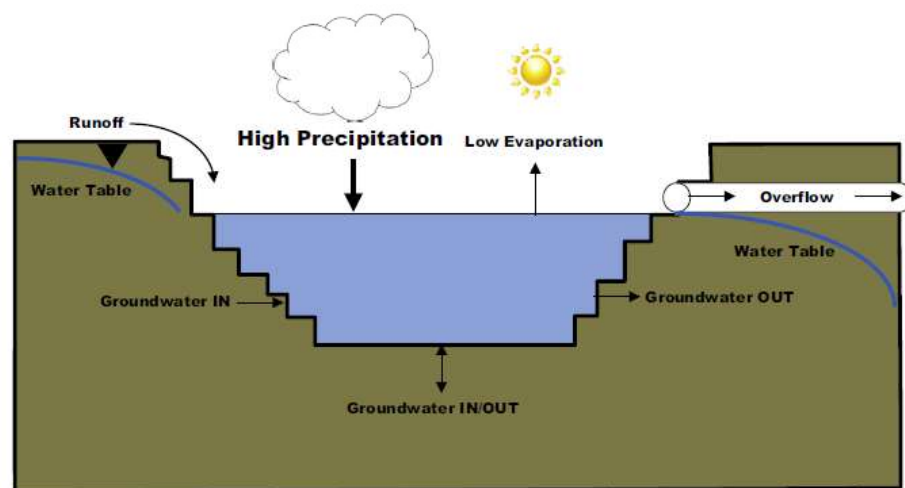


Figura 2: Representação esquemática da seção da futura cava e um exutório (Modificado de Castendyk, 2009 apud Castendyk et al., 2014).



1. INTRODUÇÃO

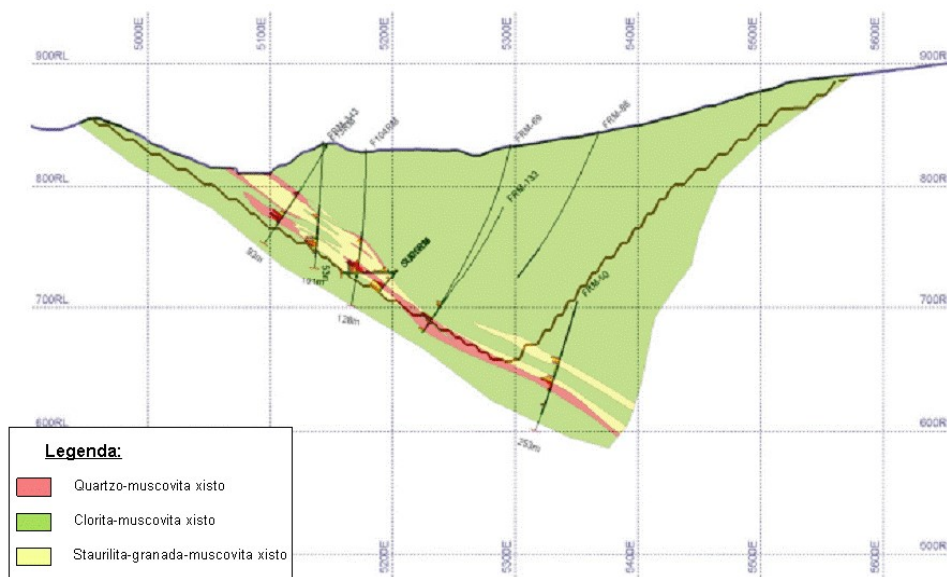


Figura 3: Representação esquemática da seção da futura cava na configuração final (Fonte: Lawrence, 2010).

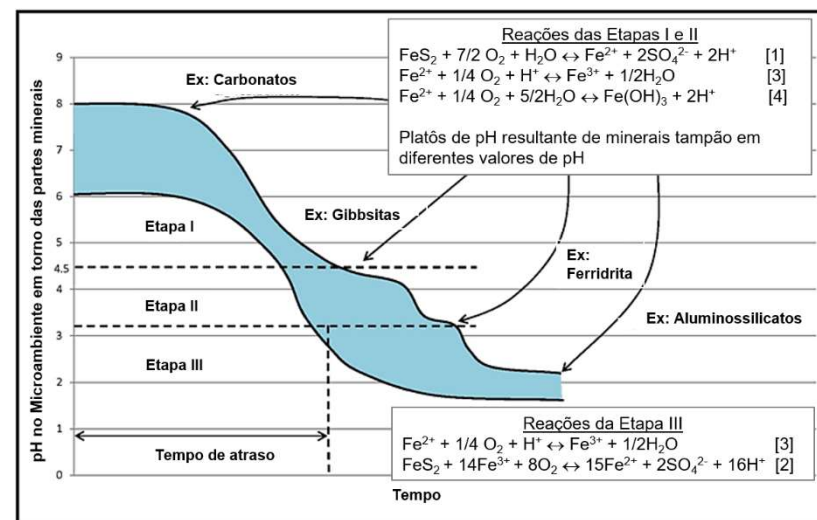


Figura 4: Dinâmica de evolução do processo de oxidação de sulfetos e geração de DAM – (Fonte: INAP, 2009).



1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1ST LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1^{ER} CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA



1. INTRODUÇÃO

A modelagem de qualidade futura da água da cava pode ser realizada utilizando o software PHREEQC (*pH REdox Equilibrium in C*), desenvolvido pelo *United States Geological Survey (USGS)*.

Atualmente este *software* é amplamente utilizado e aceito pela comunidade científica e regulatória nos EUA e na Europa, permitindo modelar as interações água-gás-rocha, reações de complexação, troca iônica, reações controladas pela cinética, transporte por dispersão e/ou difusão, entre outros (PARKHURST; APPELO, 2013).



1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1ST LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1^{ER} CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

HidroGe
Engenharia e Gestão de Projetos

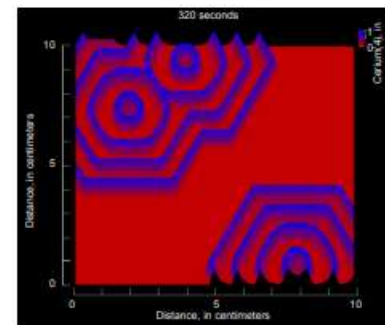
1. INTRODUÇÃO

- Update of *PHREEQE*
 - **pH Redox Equilibrium Equations**
 - Original in Fortran limited compared to current version
- Written in C language by David Parkhurst of USGS
- Uses Keyword Data Blocks to define problem
 - Not as restrictive in format as *MINTEQA2*



Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3—A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations

Chapter 43 of
Section A, Groundwater
Book 6, Modeling Techniques



Techniques and Methods 6–A43

U.S. Department of the Interior
U.S. Geological Survey



1. INTRODUÇÃO

De acordo com Castendyk (2009), um dos maiores problemas com modelagem geoquímica de predição de qualidade de lago de cava é o entendimento adequado das incertezas associadas com as predições. Porém, elas ainda representam a melhor estimativa para que as partes interessadas possam prever o que pode acontecer no futuro.

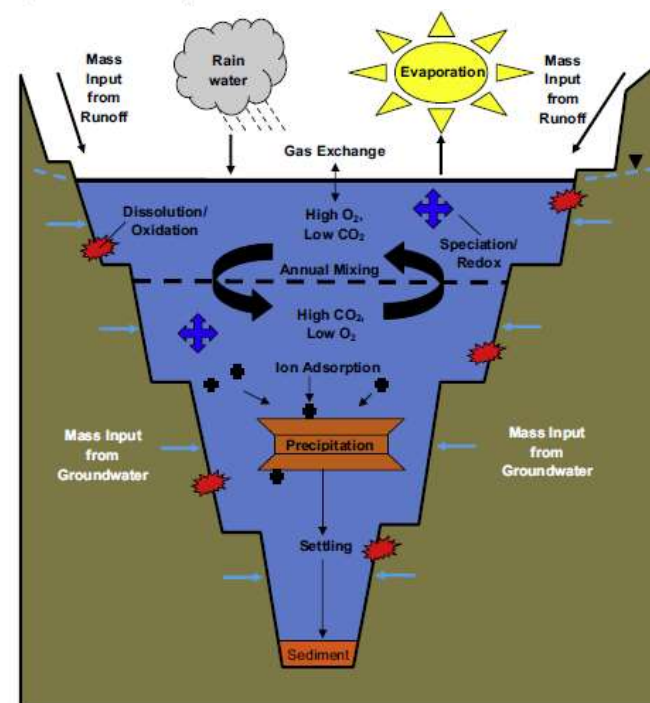


Figura 5: Exemplificação dos processos decorrentes em um lago de cava. Fonte: Modificado de Castendyk, 2009 apud Castendyk et al., 2014).



1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1ST LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1^{ER} CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA



2. OBJETIVOS

- Esse estudo busca determinar a futura qualidade da cava a céu aberto em mineração de ouro por meio de desenvolvimento de modelo geoquímico com o software PHREEQC, considerando o balanço hídrico, resultados de ensaios *free leach* com amostras da cava e equilíbrios de adsorção e precipitação das substâncias presentes no meio.



3. METODOLOGIA

Área de Estudo

A mina de ouro Riacho dos Machados é operada através de lavra a céu aberto em uma cava dividida em norte e sul. Na abertura da cava, a remoção do estéril e a extração do minério foram realizadas através do uso de explosivos ou desmonte mecânico para as porções mais intemperizadas.



Figura 6: Vista da Cava Central da MRDM (Hidrogeo, 2020).



1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1ST LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1^{ER} CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA



3. METODOLOGIA

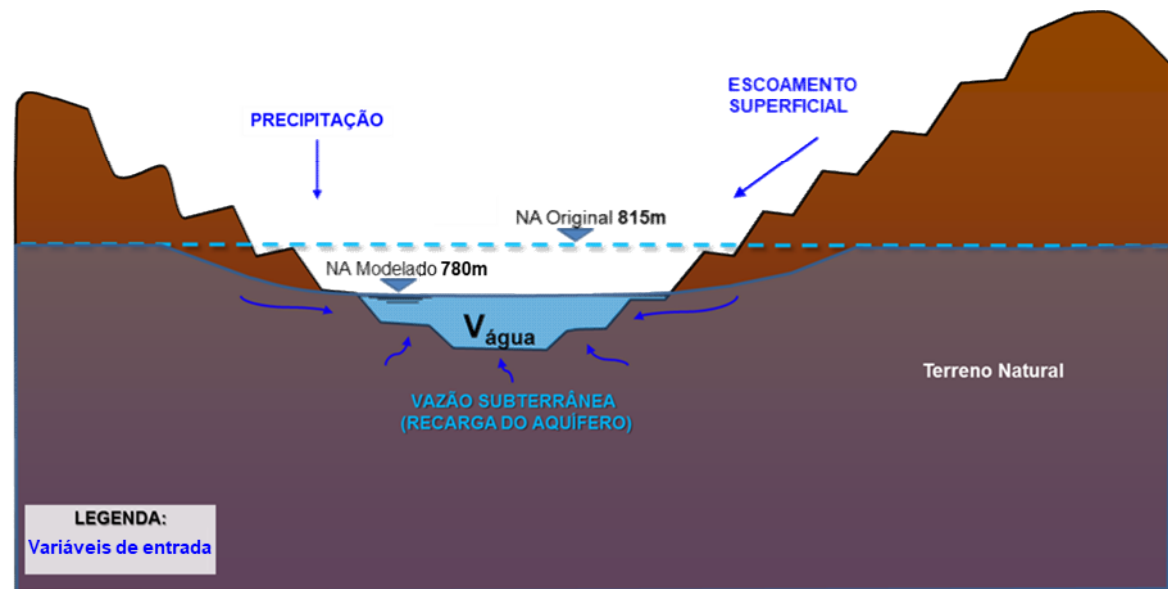
A partir de balanço hídrico com dados mais recentes, observou-se que em cerca de 40 anos o nível d'água atinge a cota 780,00 m, sendo uma elevação do nível em torno de 139 metros. Atingida essa cota, seriam necessários mais 40 anos para uma elevação de 31 metros até a cota 815,00 m (volume aproximado de 38 Mm³). Sendo assim, é provável o estabelecimento de um novo equilíbrio por volta da El. 780,00 m (volume aproximado de 22,5 Mm³), o qual será objeto de estudo do presente estudo (Pimenta de Ávila, 2019).



3. METODOLOGIA

- Modelamento da futura qualidade do lago da cava

- Modelo conceitual do modelamento de futura qualidade do lago da cava (Fonte: Pimenta de Ávila, 2019).





3. METODOLOGIA

- Dados de entrada do modelo
 - Os dados de entrada do modelo são referentes ao balanço hídrico simplificado da cava, elaborado pela Pimenta de Ávila Consultoria (2019), ao monitoramento do poço PA-46, localizado próximo à cava, e do lago da cava (PA-5 e PA-6), aos dados de qualidade de água de precipitação, às contribuições litológicas das paredes da cava e aos resultados de ensaios *free leach* dessas litologias.
 - A partir dessas informações foi elaborada uma representação o modelo conceitual do sistema, a fim de apresentar as variáveis pertinentes para o entendimento da área de estudo e seus processos.



Figura 7: Experimento de *free leaching* (PAC, 2019).



3. METODOLOGIA

- Software PHREEQC
 - Por meio do software PHREEQC, na versão 3.6.2, foram realizados os cálculos de mistura das soluções do sistema, de especiação química, de equilíbrio de precipitação e adsorção e de equilíbrio da solução com a atmosfera. Os dados utilizados para construção do modelo estão apresentados na Tabela 1.

Variáveis consideradas na modelagem da futura qualidade da água da cava

Parâmetro	Valor de entrada
Temperatura	25 °C
Potencial redox	Livre para variar e atingir equilíbrio
$pO_{2(g)}$	-0,7
Sorção	Realizada em sítios de hidr(óxidos) de ferro conforme Dzombak e Morel (1990)
Banco de dados	Minteq.v4.dat
Fases iniciais em equilíbrio	SiO ₂ (am-ppt), Apatita, Calcita, Ferridrita
Fases finais em equilíbrio	Alunita, CoFe ₂ O ₄ , CuMoO ₄ , Cuprousferrite, Fe(OH) ₂ .7Cl.3, Goetita,, Ferridrita, H-Jarosita, K-Jarosita, Na-Jarosita, Barita, Al(OH) ₃ (am) AlOHSO ₄ , Al ₄ (OH) ₁₀ SO ₄



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dados de contribuição e qualidade das diferentes fontes para o modelo geoquímico de futura qualidade do lago da cava.

- A contribuição do escoamento superficial é dividida entre as litologias presentes na cava:
- Clorita Biotita Xisto (CBX), Biotita Xisto (BX),
- Clorita Muscovita Xisto (CMX), Quartzo Muscovita Xisto (QMX),
- Quartzo Feldspato Xisto (QFX).

Descrição	CBX	BX	CMX	QMX	Qualidade atual	Água pluviométrica	Água subterrânea
Contribuição (%)	51,0	28,0	6,0	3,0	0,5	9,5	2,0
pH	5,01	5,31	4,44	2,94	7,43	6,52	6,83
pe	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	8,0	4,0
Alcalinidade (mg/L)	19,85	17,85	8,99	6,00	66,34	15,60	118,00
Cloreto (mg/L)	7,44	8,64	8,21	13,37	-	-	2,00
Sulfato (mg/L)	674,5	458,9	691,1	3.096,6	1.408,4	12,0	2,8
Alumínio (mg/L)	9,526	6,114	3,887	84,924	0,030	-	-
Arsênio (mg/L)	0,522	0,080	3,655	0,074	0,022	-	0,002
Bário (mg/L)	0,013	0,037	0,016	0,019	-	-	-
Cálcio (mg/L)	119,1	56,2	145,5	151,4	-	-	8,5
Cádmio (mg/L)	0,015	0,004	0,029	0,010	-	-	0,001
Cobalto (mg/L)	1,414	1,124	0,311	4,730	-	-	-
Cobre (mg/L)	1,916	1,033	0,393	17,092	-	-	-
Ferro (mg/L)	3,23	6,23	8,24	161,01	0,04	-	11,58
Potássio (mg/L)	23,6	27,7	20,6	16,9	-	-	3,7
Magnésio (mg/L)	32,9	33,4	18,3	230,6	-	-	15,2
Manganês (mg/L)	1,597	1,787	2,126	4,498	2,300	-	0,089
Molibdênio (mg/L)	0,015	0,011	0,010	0,010	-	-	-
Sódio (mg/L)	7,10	13,86	4,78	6,20	-	-	9,87
Níquel (mg/L)	6,454	6,432	0,823	50,392	0,341	-	0,005
Chumbo (mg/L)	0,011	0,015	2,825	0,011	-	-	0,002
Selênio (mg/L)	0,010	0,011	0,010	0,031	-	-	-
Silício (mg/L)	5,86	7,97	6,21	22,00	-	-	19,93
Estrôncio (mg/L)	0,291	0,345	0,245	0,217	-	-	-
Flúor (mg/L)	0,23	0,46	0,07	2,29	-	-	0,05
Vanádio (mg/L)	0,018	0,018	0,018	0,113	-	-	-
Zinco (mg/L)	3,361	0,557	3,775	1,178	0,054	-	0,003
Nitrato (mg/L)	0,29	1,87	0,10	0,02	-	-	0,20
Nitrito (mg/L)	0,084	1,156	0,038	0,020	-	-	-



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

- Resultados da modelagem geoquímica com o software PHREEQC para a qualidade do lago da cava

- O lago deve apresentar meio ligeiramente ácido, de modo que, apesar da presença de litologias com potencial de acidificação, a pequena contribuição não é suficiente para promover grande mobilização de metais.
- O íon sulfato apresentou diminuição considerável da concentração, causada pela precipitação dos minerais sulfatados, principalmente $Al_4(OH)_1OSO_4$.

Parâmetro	Saídas do modelo	Parâmetro	Saídas do modelo
pH	6,08	Manganês (mg/L)	1,59
pe	7,09	Molibdênio (mg/L)	<LQ
Cloreto (mg/L)	0,09	Sódio (mg/L)	8,18
Sulfato (mg/L)	607,3	Níquel (mg/L)	0,246
Alumínio (mg/L)	0,123	Chumbo (mg/L)	<LQ
Arsênio (mg/L)	<LQ	Selênio (mg/L)	<LQ
Bário (mg/L)	0,013	Silício (mg/L)	31,1
Cálcio (mg/L)	140,3	Estrôncio (mg/L)	0,266
Cádmio (mg/L)	<LQ	Flúor (mg/L)	0,320
Cobalto (mg/L)	<LQ	Vanádio (mg/L)	<LQ
Cobre (mg/L)	<LQ	Zinco (mg/L)	0,008
Ferro (mg/L)	<LQ	Nitrato (mg/L)	3,9
Potássio (mg/L)	21,6	Nitrito (mg/L)	0,017
Magnésio (mg/L)	32,6		

- LQ : resultados abaixo do limite de quantificação



5. CONCLUSÕES

- Através do software PHREEQC, utilizando como dados de entrada resultados de ensaios *free leach*, balanço hídrico e informações da literatura acerca de precipitação de minerais e adsorção de metais em minerais, foi possível prever a futura qualidade do lago de cava da Mineração Riacho dos Machados (MRDM);
- Os resultados evidenciam a qualidade de água que representa baixo risco ambiental para a área de estudo, tendo em vista o valor de pH de 6,08, concentração de sulfato dentro do esperado assim como dos metais e metaloides, tais como: níquel, cobre e arsênio;
- Tendo em vista o longo prazo que esse estudo se propôs a fazer (40 anos), é importante que seja realizado o acompanhamento da evolução da qualidade da água e das características físico-químicas e morfológicas da cava, a fim de validar o modelo e diminuir as incertezas.



6. AGRADECIMENTOS

- A Mineração Riacho dos Machados (Equinox Gold) por permitir a apresentação deste trabalho;
- A todos os técnicos que participaram da elaboração deste estudo;
- A comissão técnica e científica do CLADAM que aprovou o trabalho para ser apresentado.