

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DRENAGEM ÁCIDA E LIXIVIAÇÃO DE METAIS EM PILHAS DE ESTÉRIL E BARRAGEM DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

Nathália Augusta Ferreira Sales Coutinho, Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos

Flávio de Moraes Vasconcelos, Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos
flavio.vasconcelos@hidrogeoeng.com.br

Hairton Costa Ferreira, Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos

Marcos Rogério Palma, Pilar de Goiás Desenvolvimento Mineral/Equinox Gold

Denner Dias Ribeiro, Pilar de Goiás Desenvolvimento Mineral/Equinox Gold

RESUMO

As pilhas de estéril e a barragem de rejeito são as principais fontes de potencial contaminação dos recursos hídricos em uma área de mineração. Para fins de gestão ambiental destas fontes, foi realizado um trabalho de caracterização e avaliação do potencial de geração de drenagem ácida de rocha e lixiviação de metais dessas estruturas. Foram coletadas 48 amostras das pilhas de estéril e 10 amostras do material depositado na barragem de rejeitos. As amostras foram analisadas segundo as metodologias MABA, NAG, SPLP e ABNT NBR 10.006:2004. Concluiu-se que devido a capacidade de neutralização da acidez da geologia local (presença de carbonatos), o potencial de geração de DAM é pouco provável, ou inexistente. Observou-se baixo potencial de solubilização de compostos inorgânicos, com a exceção para os seguintes parâmetros: Al, As, Ag, cianeto e sulfato.

PALAVRAS-CHAVE

Oxidação de Sulfetos; Drenagem Ácida de Mina; Lixiviação de Metais.

ABSTRACT

Waste piles and tailings dam are the main sources of potential contamination of water resources in a mining area. For the purposes of environmental management of these sources of contamination, work was carried out to characterize and assess the potential for generating acidic rock drainage and metal leaching from these structures. Forty eight samples were collected from the waste piles and 10 samples of the material deposited in the tailings dam. The samples were analyzed according to the MABA, NAG, SPLP and ABNT NBR 10.006:2004 methodologies. It was concluded due to the ability to neutralize the acidity of local geology (presence of carbonates), the potential for generating acid mine drainage is unlikely, or non-existent. A low solubilization potential of inorganic compounds was observed, except of the following parameters: aluminum, arsenic, cyanide, silver, and sulfate.

KEYWORDS

Sulfide Oxidation; Acid Mine Drainage; Metal Leaching.

INTRODUÇÃO

A drenagem ácida de mina (DAM) é formada pela oxidação natural de minerais de sulfeto quando expostos ao ar e a água. Ao mesmo tempo podem ocorrer reações na interface dos minerais que podem gerar alcalinidade em solução. Atividades que envolvem a escavação de rochas que possuem minerais sulfetados, como a mineração, aceleram o processo de oxidação desses sulfetos, pois tais atividades aumentam a exposição desses minerais ao intemperismo e a micro organismos (Figura 1).

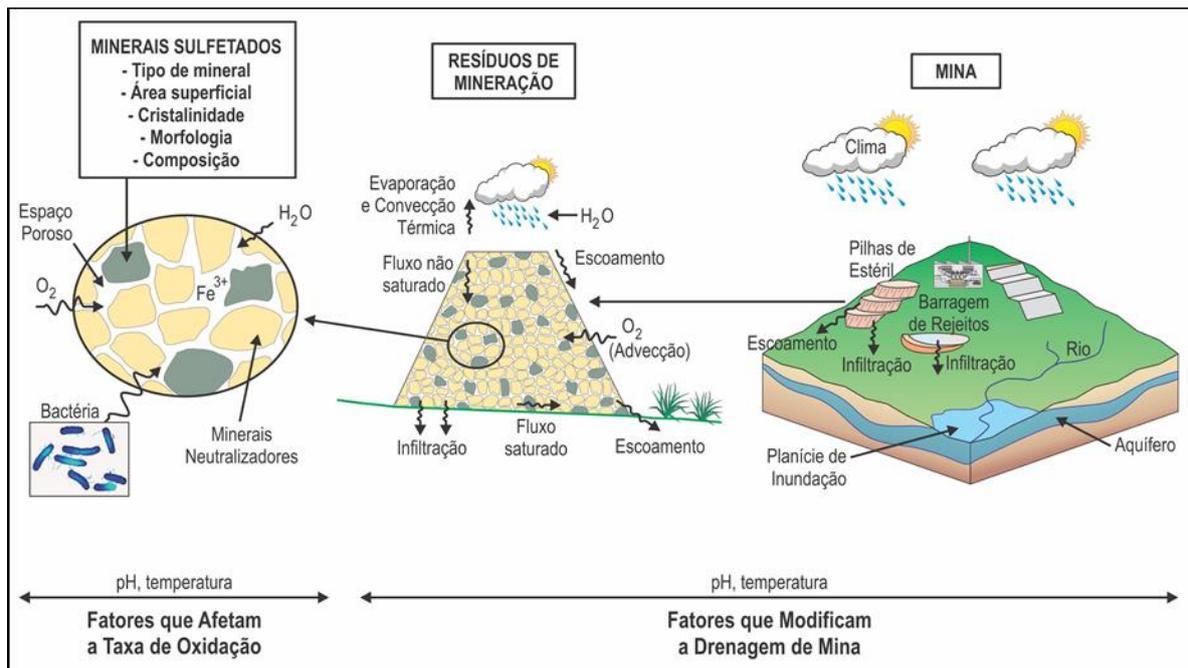


Figura 1: Fatores que afetam a geração de drenagem ácida em uma mineração [1].

A formação de drenagem ácida é difícil de ser estabilizada uma vez iniciada, pois trata-se de um processo que ocorre (e pode ser até mesmo acelerado) até que um dos reagentes (minerais de sulfeto, oxigênio, água) sejam esgotados ou não estejam mais disponíveis para a reação.

A adequada caracterização dos resíduos da mineração, a previsão da qualidade de drenagem e o manejo de resíduos de minas podem ser realizados, ou minimizados, na maioria dos casos, a formação de DAM. No entanto a prevenção deve começar na exploração mineral e continuar durante todo o ciclo de vida da mina. A indústria da mineração no mundo todo reconhece que o planejamento e gestão da DAM de forma contínua é imprescindível para a prevenção dos recursos hídricos locais.

A investigação da DAM acontece através de ensaios químicos laboratoriais que objetiva a caracterização do potencial de geração de ácido de uma amostra, sendo esse método utilizado em uma primeira etapa do programa de determinação do potencial de DAM. Esse método define o balanço entre minerais potencialmente geradores de acidez e aqueles potencialmente consumidores de acidez.

A região de Pilar de Goiás é constituída por terrenos vulcano-sedimentares com baixo grau de metamorfismo sendo inserido do contexto de *greenstone belt* de idade arqueana. As unidades do *greenstone* estão divididas, da base ao topo, nas seguintes formações: Córrego Fundo, Cedrolina, Boqueirão e Serra do Moinho. Estas unidades consistem, respectivamente, em metakomatiitos, metabasaltos, rochas de origem química e rochas metassedimentares [2]. Como a formação é carbonatada existe potencial de neutralização dentro das rochas encaixantes (lentes de calcixistos e mármore). A presença de carbonato de cálcio é reportada em todo o pacote de rochas e por vezes com mineralizações expressivas de calcita.

A mineralização de ouro é hospedada principalmente por clorita xisto e por quartzo clorita xisto intercalado. A alteração hidrotermal moderada a intensa é dada por veios de quartzo e sulfetação, com presença de pirita, pirrotita, arsenopirita e mais raramente calcopirita, galena e esfalerita. O ouro geralmente ocorre de graça em veias de quartzo ou nas bordas dos cristais de arsenopirita [2].

Neste contexto, o presente trabalho investigou o potencial de geração de drenagem ácida de rochas estéreis e rejeitos e lixiviação de metais, através de análises químicas nas amostras do empreendimento mineralário da Equinox Gold em sua unidade de Pilar de Goiás.

METODOLOGIA

O empreendimento mineralário da Equinox Gold localiza-se no município de Pilar de Goiás, no quadrante NW do Estado de Goiás. Saindo da cidade de Goiânia, o acesso se dá pela BR-153 a uma distância aproximada de 263 km. Já tomando por base a cidade de Brasília, a 280 km, o acesso se dá seguindo pela BR-070 até a cidade de Pirinópolis, seguindo a partir deste ponto pela BR-153 até Pilar de Goiás, Figura 2.

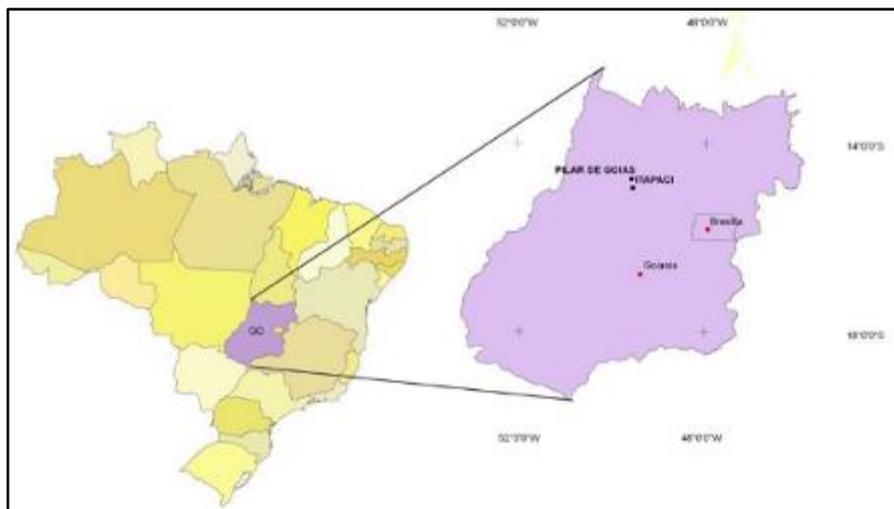


Figura 2: Mapa com a localização dos municípios de Pilar de Goiás e Itapaci – GO.

A unidade é a única ocupação industrial relevante na vizinhança, existem pilhas de estéreis e uma barragem. Com exceção do centro urbano de Pilar de Goiás, localizado a aproximadamente dois quilômetros da unidade, todo o perímetro de entorno desta é ocupado por propriedades rurais e áreas residenciais não adensadas.

Os principais componentes da unidade Pilar de Goiás são: 1 mina subterrânea, 3 depósitos de estéril, 1 área industrial, 1 barragem de rejeito, instalações administrativas, de apoio e infraestrutura.

Geologia local

As jazidas minerais às quais se associa o empreendimento estão compreendidas em um contexto geológico regional caracterizado pela ocorrência de um complexo arcabouço litológico e estrutural que ocorre de forma bem pronunciada marcando feições conhecidas como “Cinturões de Rocha” ou pelo termo “Greenstone Belts”, como se encontra na literatura específica mundial.

Foi realizada pesquisa bibliográfica da geologia regional e local da área a fim de ser possível correlacionar com as formações pedológicas locais.

Amostragem

O empreendimento mineral de Pilar de Goiás possui 3 pilhas de estéril denominadas Atalas, Pista e Grotta, e uma barragem de rejeitos. Realizou-se a coleta de 48 amostras nas pilhas de estéril e 10 amostras na barragem de rejeitos para ensaios estáticos de potencial de drenagem ácida e lixiviação de metais, entre as amostras foram coletadas replicatas para o controle de qualidade, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Amostragem nas pilhas de estéril e barragem de rejeitos.

Local	Quantidade de amostras	QA/QC
Pilha dos Atalas	24	2
Pilha da Pista	12	1
Pilha da Grotta	12	1
Barragem de rejeitos	10	1

Para realização da amostragem levou-se em consideração que as amostras coletadas devem medir o grau de representatividade das condições da área estudada. A distribuição e localização dos pontos de amostragem devem ser adequadas para fornecer a representatividade planejada.

Antes da realização da amostragem fez-se o reconhecimento da área para definição da malha de amostragem. Para retirada da amostra usou-se uma picareta e cavadeira manual, onde se realizou um furo inicial de aproximadamente 20 cm para retirada da superfície não representativa, e em seguida coletou-se o material abaixo dessa camada. As amostras foram peneiradas utilizando uma peneira de 2 mm, embaladas, identificadas e encaminhadas para o laboratório Campo em Paracatu/MG.

Todas as amostras das pilhas de estéril foram do tipo compostas (10 subamostras compõem uma amostra global), e na barragem de rejeitos foi do tipo pontual. Entre cada ponto de

amostragem realizou-se a correta limpeza dos equipamentos, evitando contaminações cruzadas.

Ensaio estáticos de predição de drenagem ácida

O principal objetivo dos ensaios estáticos é a caracterização do potencial de geração de ácido de uma amostra, sendo esse método utilizado em uma primeira etapa do programa de determinação do potencial de DAM. Esse método define o balanço entre minerais potencialmente geradores de acidez e aqueles potencialmente consumidores de acidez. Os ensaios estáticos realizados em todas as amostras foram *Modified Acid Base Accounting* (MABA) - e *Net Acid Generation* (NAG).

O ensaio MABA comumente empregado na avaliação do potencial estático de geração de drenagem ácida, objetiva determinar o balanço entre a produção e o consumo de ácido a partir de ensaios geoquímicos de determinada amostra. O teste consiste em coletar os seguintes parâmetros: Potencial de Neutralização (PN) e Potencial de Acidez (PA), expressos em kg CaCO₃ /kg.

Para caracterizar uma amostra como potencialmente geradora de acidez, ou não geradora de acidez, são propostos uma série de critérios, a abordagem utilizada é do Guia de Drenagem Ácida (Gard Guide) [1]:

- $PN/PA < 1$: Potencialmente Gerador de Acidez;
- $1 < PN/PA < 2$: Potencial Incerto de Geração de Acidez;
- $PN/PA > 2$: Baixa Probabilidade de Gerar Acidez.

O teste NAG é a reação química de uma amostra com o catalisador peróxido de hidrogênio (H₂O₂), com o intuito de oxidar rapidamente os minerais sulfetados. As reações de potencial de neutralização e potencial de acidificação ocorrem simultaneamente resultando assim na quantidade de ácido gerado, por exemplo, um pH NAG inferior a 4,5 indica que a amostra está gerando ácido.

Ensaio cinéticos de solubilização e lixiviação de metais

Para a investigação do potencial de solubilização de metais das amostras da pilha de estéril e da barragem de rejeitos seguiu-se a metodologia ABNT NBR 10.006:2004 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos [3].

Para a investigação do potencial de lixiviação de metais seguiu-se a metodologia *Synthetic Precipitation Leaching Procedure* (SPLP) [4].

Analisou-se 24 amostras das pilhas de estéril e 5 amostras do material da barragem de rejeitos nesta etapa.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Geologia regional e local

Na região central do Brasil, encontra-se a província Tocantins que é dividida entre três grupos principais de rochas: (i) Granitos Greenstones, que inclui os Greenstones de Pilar, Guarinos e Crixás; (ii) Rochas Máficas e Ultramáficas pertencentes aos complexos de Canabrava, Barro Alto e Niquelândia; (iii) Rochas da seqüência vulcano-sedimentar de Lucelândia, Coitezeiro e Palmeirópolis.

Os complexos gnáissicos da região (Pilar, Guarinos e Crixás) são geralmente compostos por Gnaisses tonalíticos, Biotita-granitos, Biotita-granodiorito e corpos pegmatíticos, além de feições intrusivas. Os Greenstone Belts são cobertos a Sul e a Norte por rochas sedimentares metamorfisadas de idade brasileira (Neoproterozóico) dos Grupos Araxá e Santa Teresina, respectivamente.

Em termos mais locais é possível individualizar na área em estudo, os Greenstone Belts de Pilar e Guarinos, que são representados predominantemente por rochas vulcânicas básicas e metassedimentares. A feição estrutural mais notável das litologias do Greenstone relaciona-se à intensa deformação, em regime essencialmente dútil.

Nesta faixa aurífera verifica-se a presença de corpos de Xistos carbonosos pertencentes à Formação Serra do Moinho, sotoposta à Clorita-granada-xistos e Gnaisses félsicos e superposta à Talco-sericita-xistos da mesma formação. A Serra do Moinho é descrita pelo CPRM como Clorita-sericita-quartzo xisto, xisto carbonoso, muscovita-quartzo xisto, clorita-biotita xisto, muscovita quartzito, biotita xisto feldspático, xisto magnesiano e anfibolítico, talco-clorita xisto e formação ferrífera (metachert) (Figura 3).

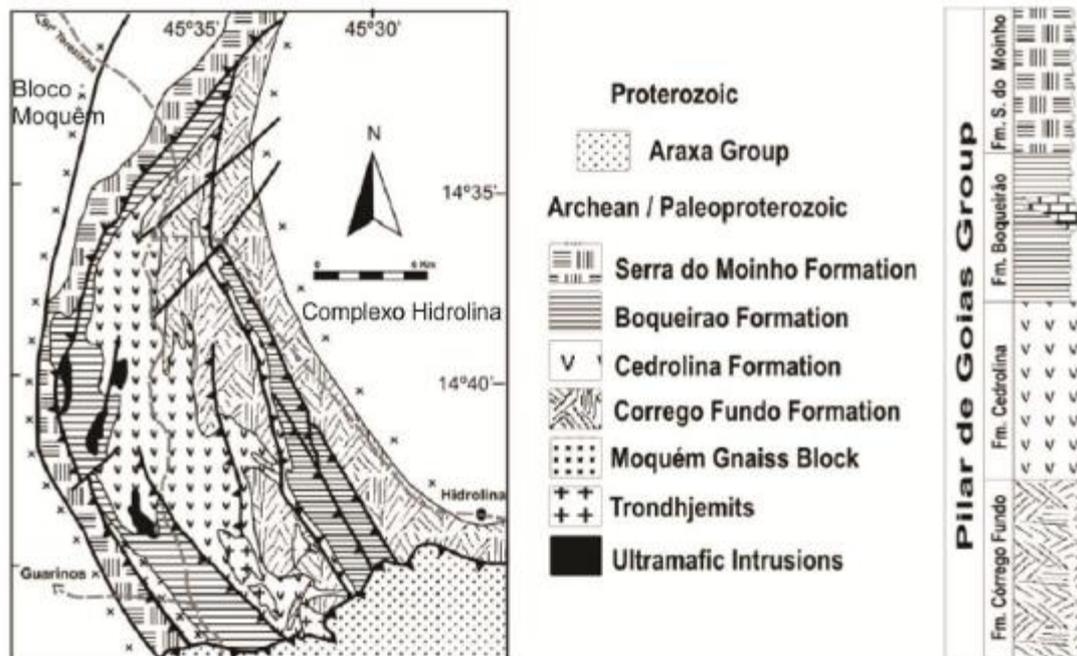


Figura 3: Mapa geológico do *Greenstone belt* de Pilar de Goiás e coluna estratigráfica (Fonte: Souza, 2011).

A paragênese mineralógica do depósito de Pilar pode ser identificada através da zona de alteração metamórfica proximal. Essa identificação do tipo de depósito é muito importante para ser possível constatar a mineralogia a ser esperada nessa jazida. Nesta classificação de depósito, o ouro ocorre associado aos sulfetos, comumente na arsenopirita, onde encontra-se nas bordas, incluso ou nas fraturas deste mineral. Pode-se apresentar também de forma livre em veios quartzo-carbonáticos com sulfetos.

Portanto, pode-se esperar que nesse depósito haverá capacidade de tamponamento da acidez gerada pelas pilhas de estéril, uma vez que a calcita também está presente nas rochas encaixantes e na zona mineralizada.

Amostragem

A Figura 4 apresenta a localização dos pontos de amostragem na pilha de estéril dos Atalas, a Figura 5 na pilha de estéril da Pista, a Figura 6 na pilha de estéril da Grotá, e a Figura 7 a localização dos pontos na barragem de rejeitos.

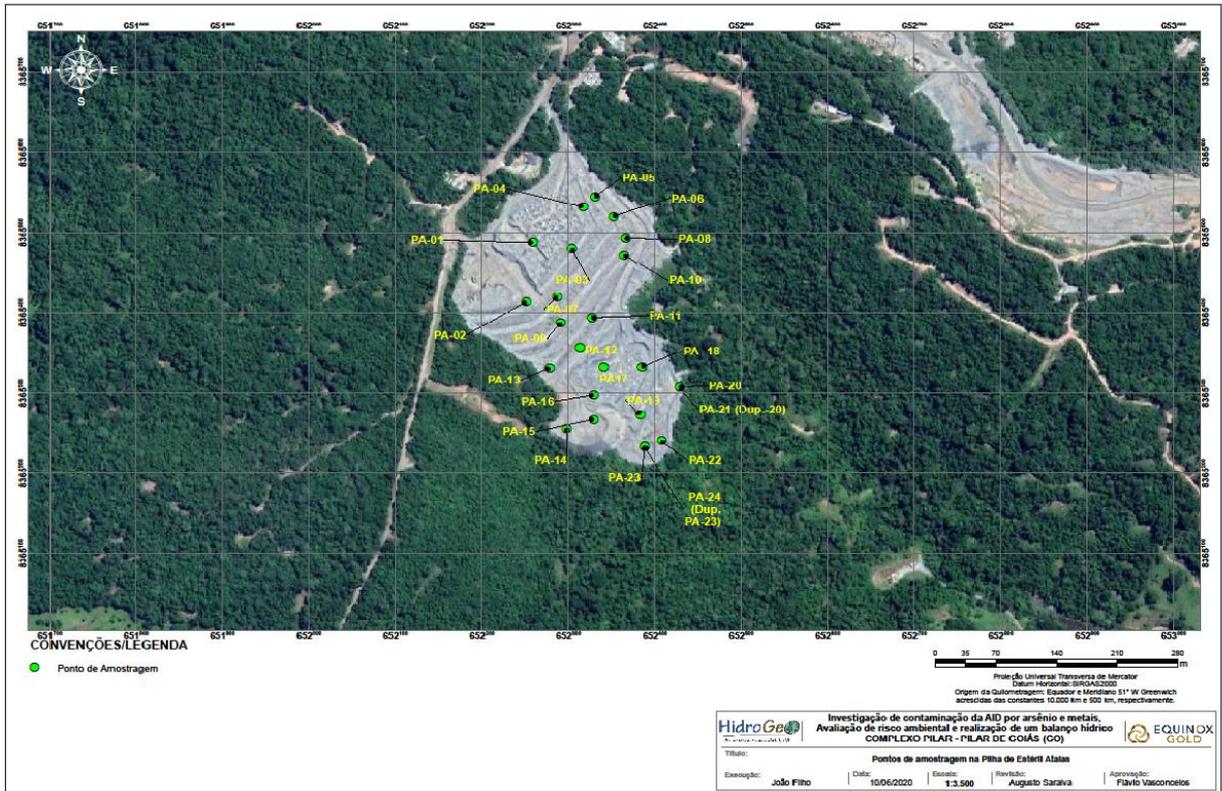


Figura 4: Localização dos pontos de amostragem na pilha de estéril dos Atalas.

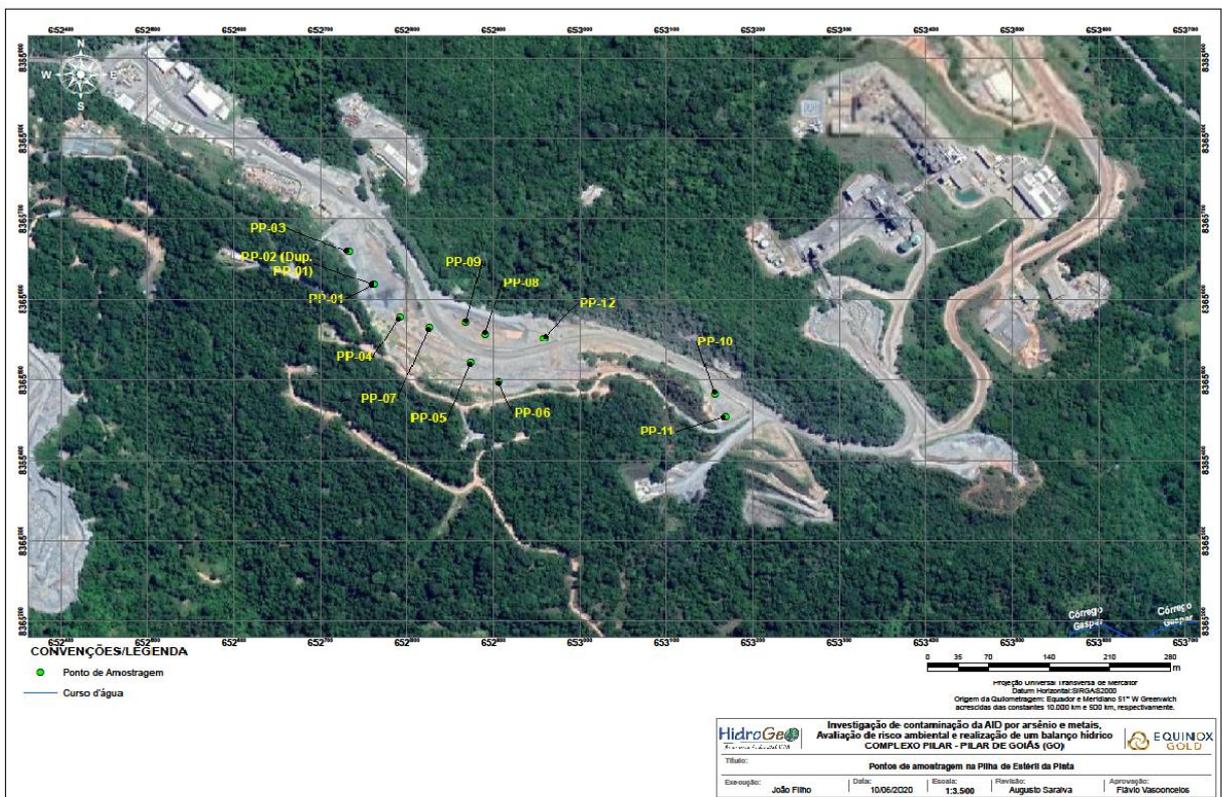


Figura 5: Localização dos pontos de amostragem na pilha de estéril da Pista.



Figura 6: Localização dos pontos de amostragem na pilha de estéril da Grota.

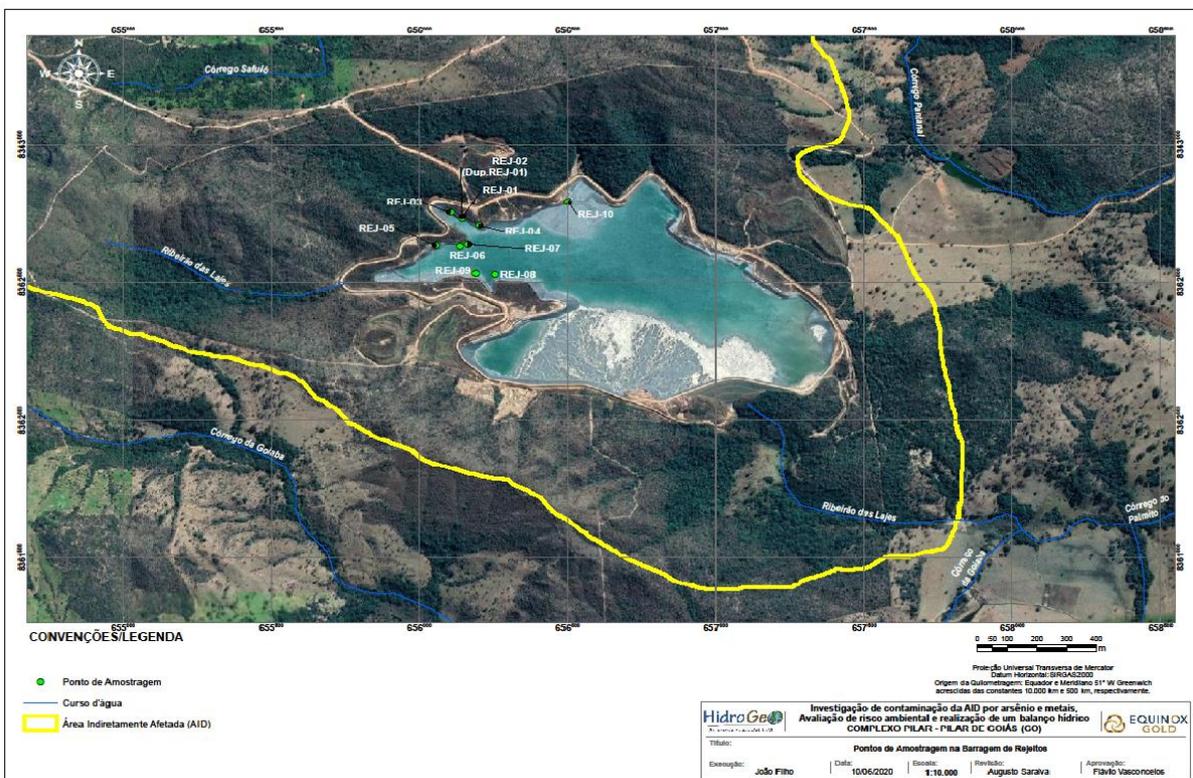


Figura 7: Localização dos pontos de amostragem na barragem de rejeitos.

Potencial de geração de drenagem ácida de mina

Sulfato versus Enxofre Total

A relação entre Sulfato e Enxofre total demonstra o nível de oxidação das amostras caracterizadas. Ou seja, quando o sulfato for igual ao enxofre total, é indicado que a amostra se oxidou totalmente, já no caso em que o sulfato é igual a zero, este fato indica que 100% da amostra ainda está na forma de sulfeto.

Observa-se na Figura 8 que todas as amostras coletadas passaram por estágios de oxidação, apresentando assim uma oxidação parcial.

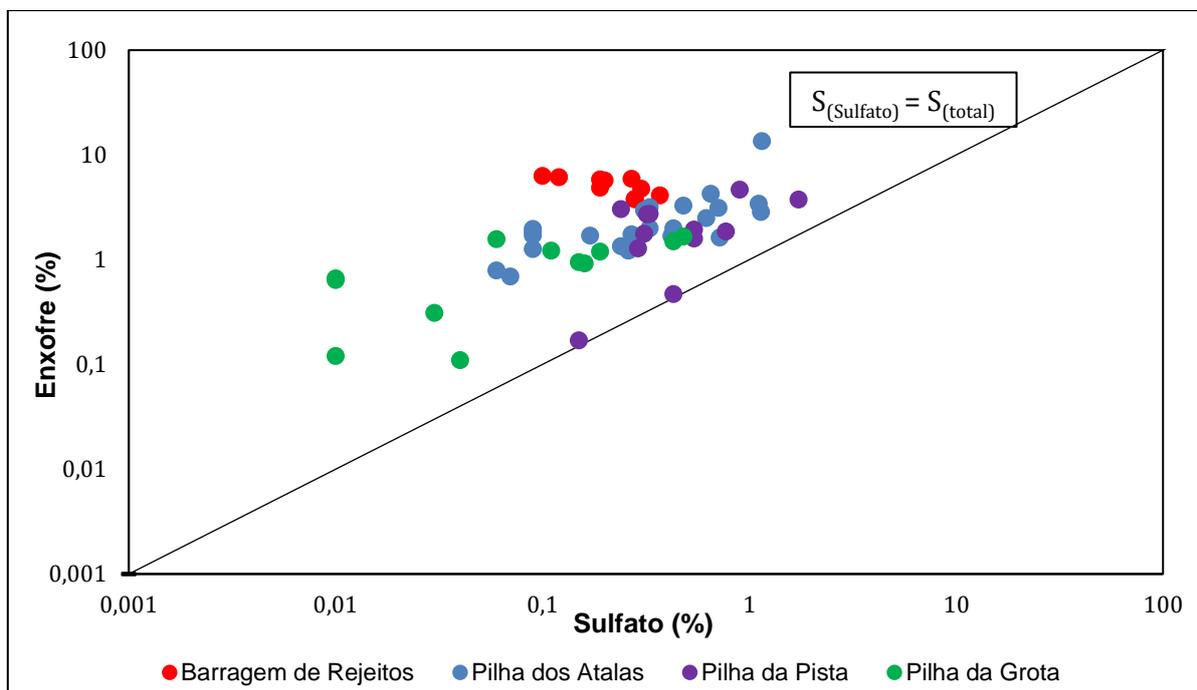


Figura 8: Gráfico de sulfato versus enxofre total.

Pode-se constatar que o processo de oxidação está em curso em todas as amostras coletadas nas pilhas de estéril e na barragem de rejeito. Lembrando que a barragem de rejeito é revestida em sua base por uma camada de polietileno de alta densidade (PEAD) e, portanto, é capaz de reter todos os sulfatos e metais dentro de sua estrutura.

Potencial de Neutralização (PN) e Potencial de Acidificação (PA)

A primeira avaliação pode ser aferida a partir da razão entre esses dois parâmetros. Observa-se que os resultados são semelhantes em todos os pontos no qual as amostras apresentam valores maiores que 4,0, Figura 9. Esses valores podem ser interpretados como de baixo potencial gerador de acidez, ou até mesmo inexistente.

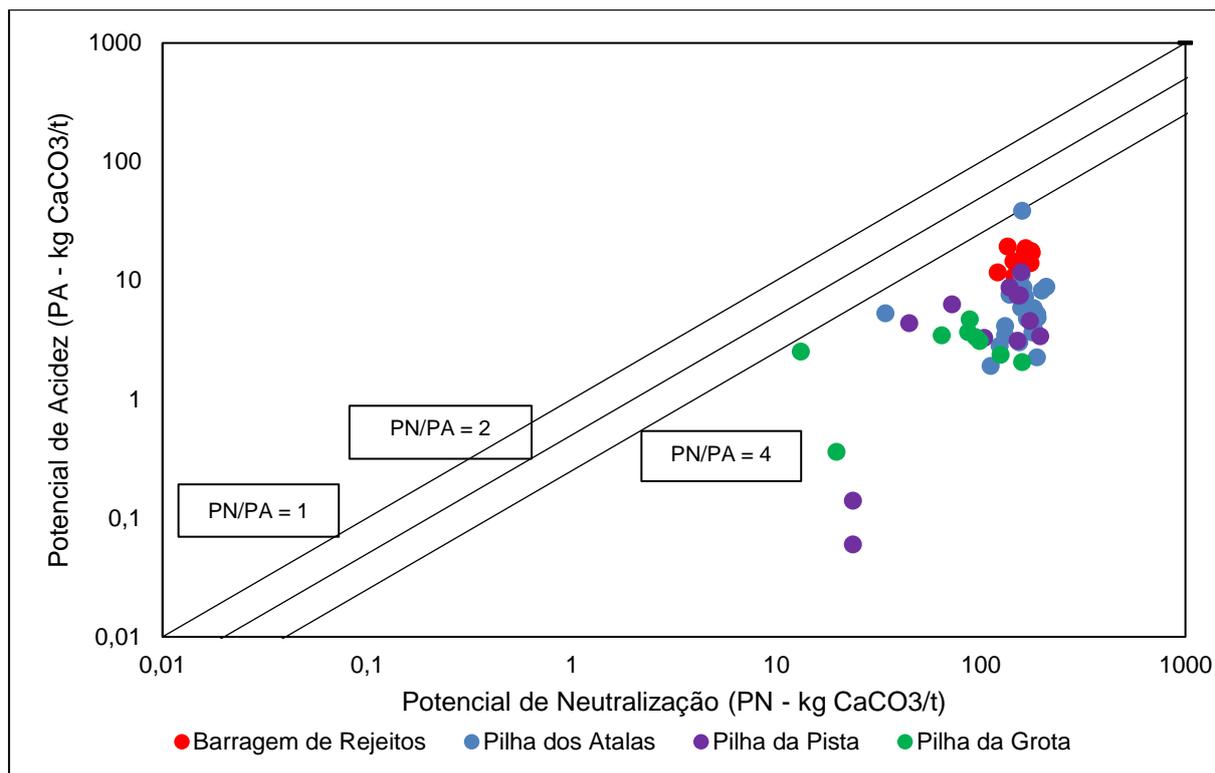


Figura 9: Gráfico da relação de potencial de neutralização (PN) versus potencial de acidificação (PA).

O mesmo padrão de comportamento foi reportado nos últimos anos desde que esse projeto de mineração teve sua retomada de atividades. Os trabalhos desenvolvidos anteriormente apresentam o mesmo padrão de resultados [5, 6, 7, 8]. Portanto é possível concluir que o aprofundamento das atividades de lavra subterrânea não atingiu nenhum nível mais sulfetado e com maior potencial de geração de acidez.

Potencial de Neutralização (PN), Potencial de Acidificação (PA) e NAG pH

As amostras não apresentaram $\text{pH} < 4,5$. Dessa forma, todas as amostras submetidas a este teste podem ser classificadas como não geradora de acidez como apresentado na Figura 10.

Observa-se que mesmo após um ataque de uma solução oxidante o pH gerado ainda fica maior que 4,5 e em sua média por volta de 5,5 sugerindo um baixo potencial de geração de acidez a curto e médio prazo. Esse mesmo padrão também foi observado em estudos anteriores [5, 7].

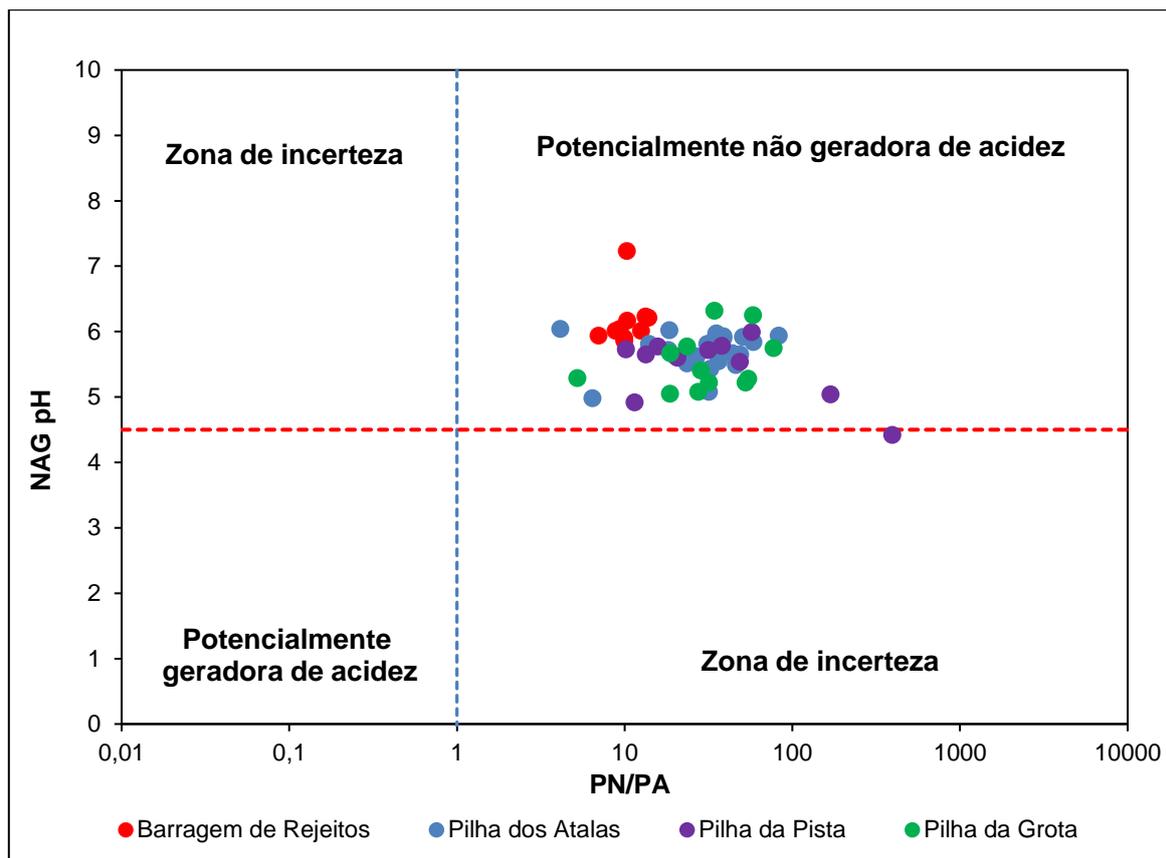


Figura 10: Gráfico da relação entre a razão PN/PA e pH do ensaio de NAG.

Potencial de solubilização e lixiviação de metais

Os resultados dos ensaios de solubilização foram comparados com os padrões para o ensaio apresentados no anexo G da norma ABNT 10.004/04 [9]. Observa-se que os seguintes compostos químicos apresentaram potencial de solubilização: **alumínio, arsênio, cianeto, prata e sulfato**.

O cianeto total está associado ao processo de beneficiamento da amostra de rejeito e não à geologia local. Esse parâmetro somente aparece nas amostras coletadas na barragem de rejeito. Os parâmetros alumínio, arsênio, prata e sulfato são de origem da geologia local, a partir da mineralogia dos depósitos, o ouro está associado aos sulfetos (principalmente pirita (FeS), pirrotita (Fe_{1-x}S) e arsenopirita (FeAsS) e às vezes galena (PbS) e esfalerita (ZnS)). No caso da arsenopirita (FeAsS) se espera que ocorra a solubilização de arsênio. Em relação aos outros metais, espera-se que estes possam solubilizar devido à oxidação dos outros sulfetos. O alumínio está associado a silicatos presentes na mineralogia local (feldspatos e até óxidos de alumínio) e podem se solubilizar com a existência de acidez localizada intersticialmente entre grãos que possuem sulfetos.

Como foi mencionado anteriormente, o parâmetro cianeto total origina-se da etapa de extração do ouro, que é solubilizado em solução contendo cianeto nos tanques de lixiviação, e depois recuperado por carvão ativado [10]. Os resíduos não aproveitáveis são direcionados à barragem de rejeito. Isso pode ser evidenciado uma vez que o parâmetro cianeto total apresenta valor acima do valor máximo permitido (VMP) somente na barragem de rejeito. Apesar do alto valor de cianeto total direcionado a barragem de rejeito, visando proteger o

meio ambiente (principalmente solo e lençol freático), a estrutura de contenção é envelopada por geomembrana PEAD (polietileno de alta densidade). Esta geomembrana, especificamente, é resistente a meios agressivos como meios ácidos e atua principalmente como barreira impermeável com o intuito de controlar infiltrações, percolação ou fluxos de água.

A eficácia da geomembrana PEAD é evidenciada a partir dos resultados de água subterrânea. Visto que em condições geoquímicas, a água subterrânea, é um indicador de carga contaminante móvel, portanto, o material não oferece risco de contaminação ao lençol freático. Pode-se verificar que os valores da água subterrânea da barragem de rejeito estão abaixo de 0,07 mg/L (VMP – Valor Máximo Permitidos para cianeto conforme CONAMA N°396/08) [11, 12].

A norma utilizada para a lixiviação de metais [4] não indica valores de referência técnica para avaliar os resultados de forma objetiva. Utiliza-se então a experiência profissional para definir os parâmetros que apresentaram potencial de lixiviação. Neste caso, os parâmetros que apresentaram um potencial de lixiviação por este ensaio foram: ferro total, manganês total e níquel total.

O parâmetro ferro total foi lixiviado de todas as amostras da barragem de rejeito, 59% das amostras da pilha de estéril Atalas, 42% das amostras da pilha de estéril da pista e uma amostra da pilha de estéril da Grotta.

Com relação ao manganês total foi observado que duas amostras coletadas na barragem de rejeito, duas amostras da pilha de estéril Atalas, duas amostras da pilha de estéril da Pista e três amostras da pilha de estéril da Grotta este parâmetro apresentou concentração mais elevada. Já com relação ao níquel total foi evidenciado somente em duas amostras da pilha de estéril da Pista que esse elemento ocorre em maior concentração.

Os dados de monitoramento ambiental deste empreendimento indicaram que um poço de monitoramento de água subterrânea localizado a jusante da pilha de estéril Atalas está solubilizando os metais lixiviados: ferro total, manganês total e níquel total. Isso pode ser evidenciado nos valores das análises de água subterrânea visto que esses metais citados se encontram acima do VMP (Valor Máximo Permitido) da norma CONAMA N°396/08 [12]. O valor de ferro total segundo a norma é de 0,1 mg/L, manganês total é de 0,1 mg/L e já o valor de níquel total é de 0,02 mg/L.

CONCLUSÃO

Os resultados foram interpretados segundo metodologia internacional apresentada no Guia de Drenagem Ácida de Rocha [1] e concluem que apesar das amostras serem compostas por sulfetos, devido a capacidade de neutralização da acidez da geologia local (i.e., presença de carbonatos), o potencial de geração de drenagem ácida é pouco provável, ou inexistente.

O potencial de solubilização e lixiviação de metais e outros compostos inorgânicos aniônicos foram encontrados nos pontos selecionados de amostragem. Contudo, a barragem de rejeito é impermeabilizada com manta de PEAD que não apresenta nenhum potencial de

contaminação do lençol freático local. Resultados de monitoramento de água subterrânea comprovam essa hipótese de que não está ocorrendo a solubilização de metais e cianeto para a água subterrânea local.

Em relação às pilhas de estéril, o potencial de solubilização e lixiviação de metais (Al, Ag, Fe, Mn, Ni e As) e de sulfato existe. Este fato é corroborado pelo monitoramento hídrico realizado em poços a jusante da pilha de estéril dos Atalas.

A partir desse estudo poderá se avaliar melhor os riscos ambientais associados a estas fontes de contaminação. Caso a pluma esteja dentro da área da operação e não exista captação do recurso hídrico subterrânea, fica caracterizado uma ausência de risco. Nesse caso o foco passará a ser o controle da fonte, que seria a cobertura das pilhas, que é um procedimento internacionalmente aceito e de comprovada eficácia, geralmente executado em planos de fechamento de mina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INAP - The International Network for Acid Prevention (2009). Global Acid Rock Drainage Guide. International Network for Acid Prevention. Skellefteå, Sweden.

[2] BrioGold Exploration (2017). Exploration Report.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004). NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro.

[4] USEPA - United States Environmental Protection Agency (1994). Synthetic Precipitation Leaching Procedure. 30p.

[5] AECOM (2012a). Projeto Conceitual da PDE da Grota Pilar de Goiás (GO). 308-1870-0010-RT-001-R2.

[6] AECOM (2012b). Estudo Geoquímico para Avaliação do Potencial de Contaminação na barragem de Rejeitos a ser implantada no projeto Pilar. Pilar de Goiás (GO). 305-1870-0009-RT-003.

[7] EGi. (2013a). Stage 1 Geochemical Review Report.

[8] EGi. (2013b). Stage 2 Site Visit Report Geochemistry and Recommendations for Tailings Management Pilar Project.

[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004). NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro/RJ.

[10] Lottermoser, B. G. (2010). Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts. 3 ed. Springer. Australia.

[11] Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos (2020). Investigação da contaminação na AID por arsênio e metais. HDG-20P005-RH-RT-001-00.

[12] BRASIL (2008). Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 396 de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.