

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

STEFANO DAMIAN BURIGO

**ANÁLISE DA DINÂMICA HIDROGEOLÓGICA DE DEPÓSITO DE
REJEITOS DA MINERAÇÃO PÓS-ENCERRAMENTO**

São Paulo

2020

STEFANO DAMIAN BURIGO

**ANÁLISE DA DINÂMICA HIDROGEOLÓGICA DE DEPÓSITO DE
REJEITOS DA MINERAÇÃO PÓS-ENCERRAMENTO**

Versão Corrigida

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Especialização: MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de *Brownfields*

Orientador: Prof.^o Dr. Reginaldo Antônio Bertolo

São Paulo

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada fonte.

Catalogação-na-publicação

Burigo, Stefano Damian

Análise da dinâmica hidrogeológica de depósito de rejeitos da mineração pós encerramento / S. D. Burigo -- São Paulo, 2020.

63 p.

Monografia (MBA em MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.rejeitos de mineração 2.águas subterrâneas 3.carga hidráulica
4.precipitação 5.vazão I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Química II.t.

AGRADECIMENTOS

Aos meus gerentes Leonardo Clemente, Carlos Silva e Flavio Barbosa por me concederam a oportunidade de continuar minha jornada acadêmica, através da realização desta pós-graduação. E por entenderem a importância da qualificação e capacitação do corpo técnico para a empresa.

À minha esposa, Kelly, por todo seu companheirismo e paciência ao longo dessa jornada, por me incentivar e apoiar a voltar aos estudos e por ser um exemplo de dedicação à área acadêmica e de pesquisa.

À minha família, Augusto, Beatriz, Mariana, fundamentais em todas etapas da minha vida, por estarem ao meu lado nas minhas principais vitórias e me incentivarem a continuar nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, Professor Reginaldo Bertolo, que à distância e em período atípico de pandemia cumpriu com louvor seu papel de me conduzir na elaboração dessa monografia.

Aos meus colegas de trabalho, em especial, Claudia Groposo, Helton Bertol e Ruben Aymoré, por todo incentivo e apoio ao longo desses anos de convivência.

Aos amigos de longa data.

RESUMO

BURIGO, Stefano Damian. Análise da dinâmica hidrogeológica de depósito de rejeitos da mineração pós-encerramento. 2020. 63 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de *Brownfields*) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

Os depósitos de rejeitos da mineração, quando mal projetados ou gerenciados, podem ser fonte ativa de poluição e, por este motivo, precisam ser sistematicamente monitorados, mesmos após o encerramento de suas atividades. O depósito de rejeito em estudo possui área de 62,2 ha, o qual foi construído sobre topografia irregular, sendo que a espessura dos rejeitos varia entre 10 m e 20 m. As análises das amostras de rejeitos foram classificadas, no geral, como solos areno-silto-argilosos a arenosos com pedregulhos, bem permeáveis ($k \sim 10^{-3}$ cm/s). As sondagens realizadas na área de estudo apontaram para a existência de sedimentos quaternários logo abaixo dos rejeitos, sendo que a litologia subsequente foi considerada como impenetrável, correspondendo ao manto do intemperismo da camada de siltito. Sobre os rejeitos foi instalada uma cobertura seca que conta com 0,15 m de calcário dolomítico, 0,50 m de argila compactada ($k \sim 10^{-6}$ a 10^{-7} cm/s), com o objetivo de minimizar a infiltração da precipitação, e 0,30 m de solo que tem a função de propiciar o crescimento da vegetação herbácea e servir de proteção para a camada argilosa. As análises para avaliação da dinâmica hidrogeológica contaram com a verificação da variação da carga hidráulica com auxílio de sensores automáticos em um conjunto de poços de monitoramento multiníveis sobre a pilha de rejeitos e em poço de monitoramento situado entre a pilha e corpo hídrico que está distante, aproximadamente, 65 a 70 metros da mesma. Monitorou-se, também, a vazão coletada em dreno profundo paralelo à base da pilha de rejeito, bem como os dados de precipitação da região. Por fim, avaliou-se a qualidade da água dos diferentes poços de monitoramento, bem como aquela proveniente do dreno profundo. Os resultados mostraram que o aquífero monitorado pelo poço de monitoramento PM-01S é o que sofre maior influência com a precipitação, seguido pelos aquíferos do PM-02 e PM-01R. Há uma tendência de redução do nível do lençol freático da pilha de rejeitos, contudo, ao longo do período monitorado, após precipitações volumosas, foi possível verificar aumento do nível da água. Verificou-se

que a maior correlação (0,61) entre precipitação e vazão da saída ocorre com o conjunto de dados de 4 dias consecutivos de chuva acumulada com a vazão do quinto dia subsequente. Em relação à correlação entre a variação da carga hidráulica dos poços de monitoramento PM-01R, PM-01S e PM-02 com a vazão da saída do dreno, foi possível verificar correlações da ordem de 0,64, 0,73 e 0,78, respectivamente. As análises de qualidade da água indicaram que o poço de monitoramento PM-01S é aquele de melhor qualidade, seguido pela saída do dreno, PM-02 e PM-01R.

Palavras-chave: rejeitos de mineração, águas subterrâneas, carga hidráulica, precipitação, vazão.

ABSTRACT

BURIGO, Stefano Damian. Analysis of the hydrogeological dynamics of post-closure mining tailings deposit. 2020. 63 p. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de *Brownfields*) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

Mining tailings deposits, when poorly designed or managed, can be an active source of pollution and, for this reason, need to be systematically monitored, even after the end of their activities. The tailings deposit under study has an area of 62.2 ha, which was built on an irregular topography, and the tailings thickness varies between 10 m and 20 m. The analysis of the tailings samples was classified, in general, as sandy-silt-clayey to sandy soils with boulders, well permeable ($k \sim 10^{-3}$ cm / s). The surveys carried out in the study area pointed to the existence of Quaternary Sediments just below the tailings, and the subsequent lithology was considered as impenetrable, corresponding to the mantle of weathering of the siltstone layer. A dry cover was installed over the tailings, which contains 0.15 m of dolomitic limestone, 0.50 m of compacted clay ($k \sim 10^{-6}$ to 10^{-7} cm / s), in order to minimize the infiltration of precipitation , and 0.30 m of soil that has the function of promoting the growth of herbaceous vegetation and serving as protection for the clay layer. The analyzes for the evaluation of the hydrogeological dynamics counted on the verification of the variation of the hydraulic load with the aid of automatic sensors in a set of multilevel monitoring wells on the tailings pile and in a monitoring well located between the pile and the water body, distant, approximately 65 to 70 meters from it. The flow collected in a deep drain parallel to the base of the tailings pile was also monitored, as well as the precipitation data for the region. Finally, the water quality of the different monitoring wells was evaluated, as well as that coming from the deep drain. The results showed that the aquifer monitored by the monitoring well PM-01S is the most affected by precipitation, followed by the aquifers of PM-02 and PM-01R. There is a tendency to reduce the level of the water table in the tailings pile, however, over the monitored period, after massive rainfall, it was possible to verify an increase in the water level. It was verified that the greatest correlation (0.61) between precipitation and discharge flow occurs with the data set of 4 consecutive days of accumulated rain with the flow of the

subsequent fifth day. In relation to the correlation between the variation of the hydraulic load of the monitoring wells PM-01R, PM-01S and PM-02 with the flow of the drain outlet, it was possible to verify correlations in the order of 0.64, 0.73 and 0, 78, respectively. The water quality analyzes indicated that the monitoring well PM-01S is the one with the best quality, followed by the drain outlet, PM-02 and PM-01R.

Keywords: mining tailings, groundwater, hydraulic load, precipitation, flow.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
2.	OBJETIVO.....	11
2.1.	Objetivo Geral.....	11
2.2.	Objetivos Específicos	11
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	12
3.1.	Rejeitos da mineração e a poluição ambiental.....	12
3.2.	Critérios técnicos do projeto de uma pilha de rejeitos.....	15
3.3.	Balanço hídrico de depósito de rejeitos pós encerramento.....	18
4.	ÁREA DE ESTUDO.....	20
4.1.	Características da área de estudo	20
4.2.	Hidrogeologia da área de estudo.....	24
4.3.	A configuração geotécnica do depósito de rejeitos em estudo	27
4.4.	Poços de monitoramento.....	30
4.5.	Dreno profundo.....	31
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	32
5.1.	Poços de monitoramento.....	32
5.2.	Medições de nível de água nos poços de monitoramento.....	32
5.3.	Medições de vazão proveniente do dreno profundo	35
5.4.	Medições da pluviometria.....	37
5.5.	Análise Estatística	38
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
6.1.	Análise da carga hidráulica dos poços de monitoramento frente às precipitações	40
6.2.	Análise da vazão na saída do dreno profundo	46
6.3.	Análise dos fluxos subterrâneos frente à qualidade da água.....	52
7.	CONCLUSÕES.....	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
	ANEXOS	60

1. INTRODUÇÃO

A indústria da mineração apresenta grande relevância na economia do Brasil. Contudo, inerente à atividade da mineração, a geração de resíduos é um dos principais aspectos ambientais que o setor precisa gerenciar para minimizar seu impacto ao meio ambiente. Nas últimas décadas, a legislação ambiental brasileira vem se tornando cada vez mais rigorosa, forçando a indústria da mineração a adotar padrões de qualidade ambiental cada vez mais elevados.

Dentre os principais resíduos gerados na indústria da mineração, pode-se destacar as pilhas de minérios pobres, estéreis, rochas, sedimentos, solos, lamas, entre outros, sendo que os tipos de resíduos gerados dependem do tipo de minério a ser produzido, bem como do processo de tratamento utilizado. Existem diversas técnicas para disposição dos resíduos, podendo-se elencar as seguintes alternativas: minas subterrâneas, cavas exauridas de minas, em pilhas, por empilhamento a seco (*método dry stacking*), por disposição em pasta e em barragens de contenção de rejeitos (IBRAM, 2016).

No Brasil, mesmo com o endurecimento da legislação ambiental e a existência de normas específicas para projetos de disposição de estéril em pilha e projetos de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação, recentemente, ocorreram tragédias de grandes proporções como o rompimento das barragens nas cidades de Mariana e Brumadinho, em Minas Gerais.

O desenvolvimento de projetos de estruturas para armazenamento de rejeitos e estéreis da mineração leva em consideração diversos estudos que têm a finalidade de conhecer as características dos materiais que serão depositados, as condições de percolação, os fatores de segurança, as condições hidrológicas, hidráulicas e operacionais, bem como as informações sobre quantidade de estéril, vida útil da pilha e tipos de materiais de construção. Além de todos os estudos realizados, na fase de operação, as rotinas técnicas e de segurança devem ser sistematicamente avaliadas. Por fim, o projeto da pilha de rejeitos deverá contemplar um plano de desativação, considerando todas as atividades após o fim da vida útil operacional, e um plano de fechamento (ABNT NBR 13029, 2017).

Ao longo deste estudo, buscou-se analisar a dinâmica hidrogeológica de um depósito de rejeitos da mineração após o seu encerramento. No entanto, por se tratar de

um depósito de rejeitos que teve sua construção iniciada na década de 50, muitos dos estudos, critérios e dispositivos exigidos, atualmente, pela legislação e normas, não foram levados em consideração à época, aumentando ainda mais a complexidade da dinâmica hidrogeológica a ser analisada.

O depósito de rejeito em estudo possui área de 62,2 ha, o qual foi construído sobre topografia irregular, sendo que a espessura dos rejeitos varia entre 10 m e 20 m. As análises das amostras de rejeitos foram classificadas, no geral, como solos areno-silto-argilosos a arenosos com pedregulhos, bem permeáveis ($k \sim 10^{-3}$ cm/s). As sondagens realizadas na área de estudo apontaram para a existência de sedimentos quaternários logo abaixo dos rejeitos, sendo que a litologia subsequente foi considerada como impenetrável, correspondendo ao manto do intemperismo da camada de siltito. Sobre os rejeitos foi instalada uma cobertura seca que conta com 0,15 m de calcário dolomítico, 0,50 m de argila compactada ($k \sim 10^{-6}$ a 10^{-7} cm/s), com o objetivo de minimizar a infiltração da precipitação, e 0,30 m de solo que tem a função de propiciar o crescimento da vegetação herbácea e servir de proteção para a camada argilosa.

As análises para avaliação da dinâmica hidrogeológica contaram com a verificação da variação da carga hidráulica com auxílio de sensores automáticos em um conjunto de poços de monitoramento multiníveis sobre a pilha de rejeitos e em um poço de monitoramento situado entre a pilha e um corpo hídrico que está distante, aproximadamente, 65 a 70 metros da mesma. Monitorou-se, também, a vazão coletada em dreno profundo paralelo à base da pilha de rejeitos, bem como os dados de precipitação da região. Por fim, avaliou-se a qualidade da água dos diferentes poços de monitoramento, bem como aquela proveniente do dreno profundo.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral

Analisar a dinâmica hidrogeológica de depósito de rejeito de mineração que já teve suas atividades encerradas, por meio da avaliação da relação entre as variações dos níveis de água em poços de monitoramento, vazão coletada por dreno profundo, precipitação e qualidade da água.

2.2. Objetivos Específicos

- Analisar a evolução do rebaixamento do nível da água do lençol freático da pilha de rejeitos.
- Analisar as variações da carga hidráulica na pilha de rejeitos e no substrato abaixo da pilha de rejeitos frente à pluviometria.
- Analisar a variação da vazão coletada por dreno profundo posicionado na base da pilha de rejeitos frente às variações do nível do lençol na pilha de rejeitos e no substrato abaixo da pilha de rejeitos, bem como frente à pluviometria.
- Analisar a dinâmica hidrogeológica considerando os fluxos subterrâneos e a qualidade da água dos poços de monitoramento e saída do dreno.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Rejeitos da mineração e a poluição ambiental

A mineração possui importante papel no desenvolvimento de um país. Ao longo da história do Brasil, a mineração teve grande destaque na economia, sendo que nos últimos anos, em virtude do aumento da demanda de insumos minerais, suas atividades foram intensificadas. De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro (BRASIL, 2019), no ano de 2017, a produção comercializada de minérios foi equivalente a R\$ 110,6 bilhões, sendo que as substâncias da classe dos não metálicos responderam por cerca de 20% desse total, enquanto os metálicos foram responsáveis por 80%, dos quais destaca-se o alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco.

Contudo, inerente aos processos produtivos, é a geração de resíduos. Na mineração, os principais resíduos gerados são as pilhas de minérios pobres, estéreis, rochas, sedimentos, solos, lamas, entre outros. Os resíduos da mineração são classificados em estéreis, sendo definidos como (i) material não aproveitável economicamente, cuja remoção se torna necessária para lavra do minério, e (ii) rejeitos, provenientes do processo de beneficiamento de minérios (ABNT NBR 13029, 2017).

O beneficiamento de minérios é um processo pelo qual o material lavrado é submetido a um tratamento industrial por métodos físico-químicos capazes de purificar ou enriquecer os minérios, segregando o material bruto em mineral bruto concentrado e rejeito (ARAÚJO, 2006).

Os tipos de rejeitos gerados dependem do tipo de minério a ser produzido, bem como do tratamento utilizado, podendo variar de materiais arenosos não plásticos (rejeitos granulares) até solos de granulometria fina e alta plasticidade (lamas). Em termos geotécnicos, os rejeitos granulares, compostos de frações de areias finas a médias, não plásticas, possuem alta condutividade hidráulica e resistência ao cisalhamento e baixa compressibilidade. Por outro lado, as lamas, compostas por partículas siltosas e argilosas, possuem alta plasticidade, difícil sedimentação e alta compressibilidade (ARAÚJO, 2006).

Dessa forma, a depender dos tipos de rejeitos gerados, o transporte para disposição pode ser realizado por caminhões ou correias transportadoras, quando na forma de pasta

ou granel, ou pelo bombeamento por meio de tubulações ou gravidade, quando se tratar de polpa, mistura de água e sólidos. No que diz respeito à disposição dos rejeitos, pode-se elencar as seguintes alternativas (IBRAM, 2016):

- Em minas subterrâneas;
- Em cavas exauridas de minas;
- Em pilhas;
- Por empilhamento a seco (método *dry stacking*);
- Por disposição em pasta;
- Em barragens de contenção de rejeitos (do tipo a montante, a jusante e “em linha de centro”).

Ifram (2016) elenca como fatores que influenciam na seleção do método de disposição, a natureza do processo de mineração, as condições geológicas e topográficas da região, as propriedades mecânicas dos materiais, o poder de impacto ambiental de contaminantes dos rejeitos e condições climáticas da região.

Em relação à sustentabilidade, os aspectos econômico, ambiental, social e governamental (regulamentação) são os principais fatores a serem levados em consideração para o gerenciamento de rejeitos da mineração. A Tabela 1 apresenta os quesitos para cada um dos fatores relacionados à sustentabilidade no gerenciamento de rejeitos da mineração.

Tabela 1 – Fatores relacionados à sustentabilidade do gerenciamento de rejeitos da mineração

Ambiental	Econômicos	Social	Governamental (regulação)
Poluição da água e do ar	Despesas de capital	Problemas de saúde	Conformidade legal
Esgotamento dos recursos hídricos	Despesas operacionais	Percepção dos <i>stakeholders</i>	
Alteração da paisagem	Custos com energia	Impactos culturais	
		Problemas de	
Destrução dos ecossistemas	Custos com encerramento	segurança para a sociedade (pós encerramento)	
Emissões			

Fonte: Adiansyah et. al, 2015

Adiansyah et. al (2015) desenvolveram um estudo no qual propuseram oito etapas para tomada de decisão no processo de gerenciamento sustentável de rejeitos da mineração, sendo elas:

- 1) Realizar ensaios de caracterização química do rejeito para verificar se há liberação de contaminantes;
- 2) Identificar e analisar as características e comportamento do rejeito por meio de análises laboratoriais, incluindo as propriedades reológicas e testes de bombeamento;
- 3) Identificar as possíveis tecnologias para o gerenciamento de rejeitos, levando em consideração as análises laboratoriais e a relação entre o consumo de água e energia;
- 4) Calcular o custo de cada opção considerando os principais componentes (aquisição de equipamentos e instalações, custos operacionais e de fechamento);
- 5) Identificar e calcular os possíveis impactos ambientais de cada opção;
- 6) Identificar a legislação e normas em vigor;
- 7) Envolver as partes interessadas relevantes por meio de processos de análise de decisão;
- 8) Realizar uma avaliação final para considerar todos os resultados das etapas anteriores.

Além do gerenciamento sustentável dos resíduos da mineração, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos buscando a valorização dos rejeitos da mineração. Silva et. al. (2017) realizaram uma revisão bibliográfica para verificar os estudos relacionados ao aproveitamento de rejeitos da mineração no Brasil. Os resultados mostraram que os estudos avaliados eram voltados para o reaproveitamento de resíduos na construção civil (89%), em especial, na fabricação de cerâmica vermelha, concreto, argamassas e filtros de barragens, e na agricultura (11%). Além disso, pode-se, também, elencar estudos como de Galvão et al. (2018), os quais reusaram rejeitos de minério de ferro para produção de pigmento para tintas sustentáveis.

Apesar do aumento do número de leis e normas, na última década, que buscaram a proteção do meio ambiente frente às atividades da indústria da mineração, diversos casos de poluição relacionados à mineração vêm sendo estudados em todo mundo. Modoi et al. (2014) avaliaram os riscos associados à poluição de metais pesados na água provenientes de resíduos da mineração na Romênia. Na Espanha, Gómez-González et al.

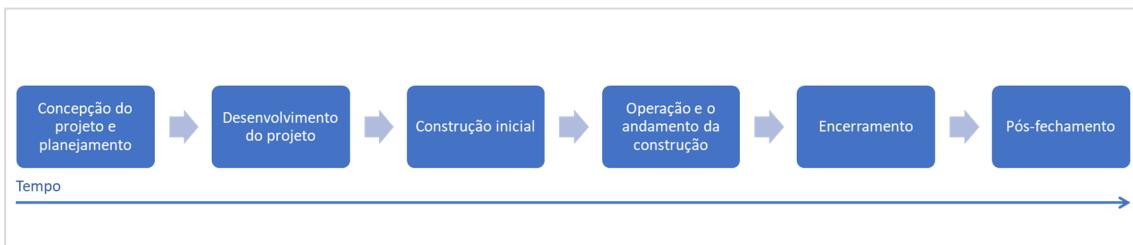
(2014) verificaram a propagação e o particionamento do arsênio, proveniente de resíduos de mineração, no solo. A avaliação ambiental de solos e sedimentos em uma região de mineração de mercúrio da Argélia, apresentou como resultados altas concentrações de metais, acima dos limites permitidos (SEKLAOUI et al, 2016). Na mineração de carvão no Brasil, em virtude da existência de pirita, as pilhas de rejeitos geram drenagem ácida de mina (DAM), efluente ácido contendo altas concentrações de ferro, alumínio e sulfato. A geração descontrolada de DAM, por sua vez, atinge corpos de água superficiais e subterrâneos, resultando na deterioração da qualidade dos mananciais (GALHARDI & BONOTTO, 2016).

Além da poluição do meio ambiente, que pode ser provocada por depósitos de rejeitos mal projetados e gerenciados, outro ponto de atenção em relação a essas estruturas são as rupturas de barragens. No Brasil, recentes tragédias nas cidades de Mariana e Brumadinho, ambas no estado de Minas Gerais, chamaram a atenção do mundo para a capacidade de destruição de vidas, do meio ambiente e até mesmo econômica que os desastres envolvendo barragens de rejeitos podem causar. Fernandes et al. (2016) estimam que o desastre em Mariana causará alterações na diversidade genética de populações de peixes, perda de vegetação a longo prazo, além de uma lenta recuperação das áreas contaminadas. Em Brumadinho, as análises realizadas na água do rio atingido pelos rejeitos da barragem indicaram que as concentrações de metais como Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, Cd e U estavam acima dos limites estabelecidos na Resolução CONAMA 357/2005. Testes de ecotoxicidade, também, mostraram que a água e o sedimentos do rio eram tóxicos para organismos como algas, crustáceos e peixes (VERGILIO et. al., 2020).

3.2. Critérios técnicos do projeto de uma pilha de rejeitos

Um projeto de um depósito de rejeitos da mineração deve levar em consideração as diferentes fases do seu ciclo de vida. De acordo com o Guia para o gerenciamento de depósitos de rejeitos da *Mining Association of Canada* (2017), o ciclo de vida de um depósito é composto por seis fases: concepção do projeto e planejamento, desenvolvimento do projeto, construção inicial, operação e o andamento da construção, encerramento e pós-fechamento (Figura 1).

Figura 1 – Ciclo de vida de um projeto de depósito de rejeito de mineração



Fonte: Adaptado de MAC, 2017.

Em termos operacionais, a disposição de resíduos em pilhas controladas é um processo em que ocorre o desaguamento da água por meio de bombas e a fração sólida remanescente é armazenada em pilhas similares às dos estéreis. Além da extração da água do resíduo, faz-se necessário remover eventuais frações argilosas existentes, com o objetivo de assegurar a estabilidade da pilha a longo prazo. O sistema de disposição em pilhas está associado, muitas vezes, à necessidade de adoção de um sistema para a fração fina dos rejeitos, sendo usualmente uma represa (SANCHEZ, 2002).

Segundo Portes (2013), o empilhamento drenado consiste em depositar rejeitos granulares por meio da técnica de aterros hidráulicos, sendo que para isso faz-se necessária a implantação de um sistema eficaz de drenagem interno à pilha, além do material depositado possuir características de condutividade hidráulica que propiciem a sua drenagem.

Ainda de acordo com Sanchez (2002), os principais componentes de uma pilha controlada são: dique de partida, drenagem interna e perimetral, sistema de drenagem superficial e canaleta de desvio perimetral.

No Brasil, a ABNT NBR 13029 (2017) estabelece as diretrizes mínimas para a elaboração e apresentação de projetos de pilha para disposição de estéril de mineração. A Tabela 2 apresenta os principais estudos que devem ser realizados para elaboração do projeto, conforme a norma.

Tabela 2 – Estudos previstos na ABNT NBR 13029 (2017)

Estudo	Objetivo
Locacional	Analisar diferentes opções locacionais e compará-las para tomada de decisão do local mais adequado
Caracterização química do estéril	Realizar ensaios para caracterização química do estéril e verificação do potencial de geração de DAM
Surgências	Verificar a existência de eventuais surgências na área do projeto e caracterizá-las
Hidrometeorologia e estudo de cheias	Descrever as características climáticas e hidrológicas da área do projeto
Sedimentológico	Estimar as taxas de sedimentos por erosão na bacia de contribuição e na pilha
Geológico	Realizar mapeamento geológico-geotécnico da área do projeto
Fundações	Conhecer as características geotécnicas e as condições hidrogeológicas das fundações das pilhas para verificar eventuais necessidade de tratamento quanto à estabilidade, adensamento e percolação
Caracterização física e geotécnica do estéril	Estimar densidades e resistência ao cisalhamento que serão adotados nos cálculos de estabilidade do projeto

Fonte: adaptado de ABNT NBR 13029 (2017)

O projeto da pilha de estéril, de acordo com a ABNT NBR 13029 (2017), deve apresentar as premissas e hipóteses admitidas, muitas delas relacionadas aos estudos prévios realizados, como características do estéril, condições de percolação, fatores de segurança, condições hidrológicas, hidráulicas e operacionais, bem como informações sobre quantidade de estéril, vida útil da pilha e tipos de materiais de construção.

No que diz respeito à geometria e arranjo geral, o projeto deve abordar a locação e a geometria final da pilha de estéril, incluindo detalhamento de bermas, taludes e seções críticas, curvas de elevação *versus* volume, sistemas de drenagem e contenção de sedimento. O projeto também deverá detalhar os acessos provisórios e definitivos, bem como a sequência de formação da pilha (construção do acesso à base, drenagem interna, drenagem superficial, instrumentação, revestimento vegetal, entre outros) (ABNT NBR 13029, 2017).

Caso os estudos geológico-geotécnicos apontem para a necessidade de tratamento das fundações, o projeto deverá apresentar detalhamento dos serviços necessários, como remoção ou tratamento de materiais inservíveis, controle de água subterrânea e superficial (ABNT NBR 13029, 2017).

Em termos de drenagem, para o dimensionamento da drenagem interna, o projeto deverá levar em consideração as características do estéril, da fundação e dos materiais dos drenos, bem como as vazões calculadas ou medidas na área do empreendimento e seus respectivos fatores de segurança. A drenagem interna poderá ser suprimida quando as pilhas forem constituídas de material rochoso, em virtude de sua condutividade hidráulica. No quesito drenagem superficial, os tempos mínimos de retorno recomendados pela norma devem ser avaliados para o dimensionamento de cada dispositivo. Para as drenagens internas e superficiais, o projeto deverá apresentar as locações, geometria dos dispositivos e transições, bem como suas especificações (ABNT NBR 13029, 2017).

O projeto também deverá estabelecer a proteção superficial da pilha que deverá ser aplicada nas bermas, plataformas e taludes, bem como a localização, detalhes construtivos e especificações da instrumentação de controle. O monitoramento deverá abranger, no mínimo, medição de vazão da drenagem interna e níveis de água no interior da pilha e sua fundação (ABNT NBR 13029, 2017).

Por fim, o projeto da pilha de rejeitos deverá contemplar um plano de desativação, considerando todas as atividades após o fim da vida útil operacional, e um plano de fechamento (ABNT NBR 13029, 2017).

3.3. Balanço hídrico de depósito de rejeitos pós encerramento

O balanço hídrico em um depósito de rejeitos da mineração após seu encerramento está fortemente condicionado à relação precipitação e escoamento superficial. Nessa condição, as principais perdas de água do depósito de rejeitos estão atreladas a transbordamentos de vertedouros e evaporação de água de lagoas, quando existentes, drenagem de rejeitos úmidos, além da infiltração da água contida na pilha para fundação e aterro do depósito e através da barragem. Após o encerramento das atividades do depósito de rejeitos, tanto o nível de água do seu lençol freático, quanto os fluxos de infiltração para a fundação e pela barragem tendem a diminuir exponencialmente, com alguma recuperação após períodos de chuvas prolongadas (Australian Government, 2016). O balanço hídrico de um depósito de rejeitos após seu encerramento pode ser calculado da seguinte forma:

$$PE = TV + AD + IF + IB + EV$$

Equação 1

Onde:

PE: diferença entre precipitação e escoamento superficial;

TV: transbordamento de vertedouro;

AD: água residual drenada;

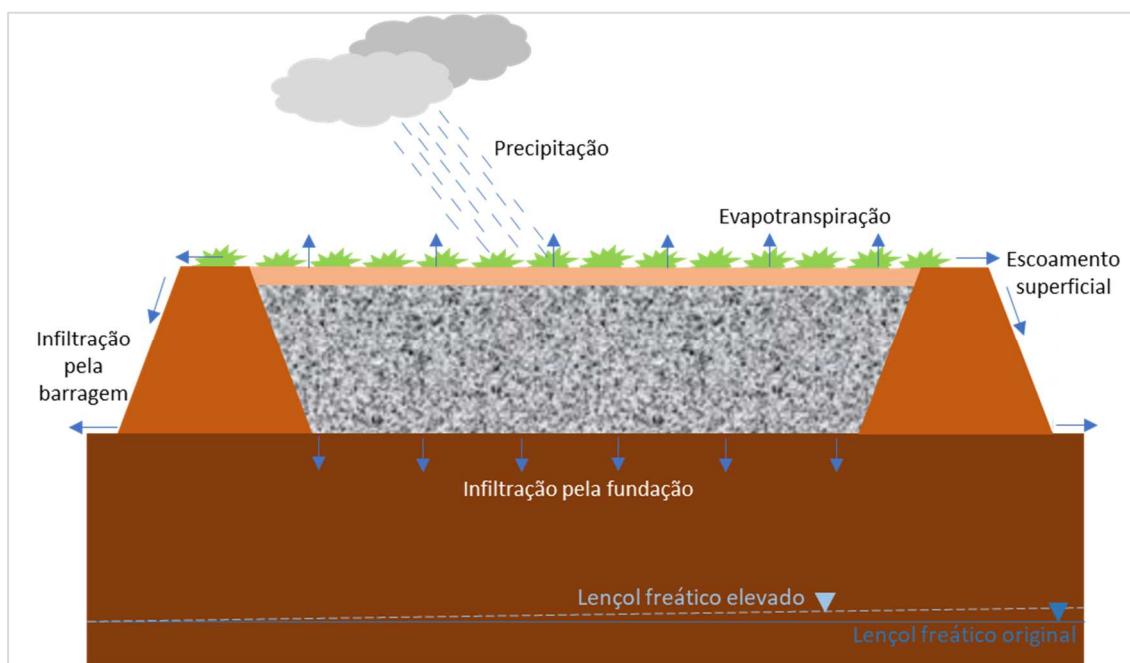
IF: infiltração para fundação;

IP: infiltração pela barragem;

EV: evapotranspiração;

A Figura 2 apresenta os principais componentes do balanço hídrico de um depósito de rejeitos após seu encerramento.

Figura 2 – Balanço hídrico de depósito de rejeitos após encerramento



Fonte: adaptado de Australian Government (2016).

4. ÁREA DE ESTUDO

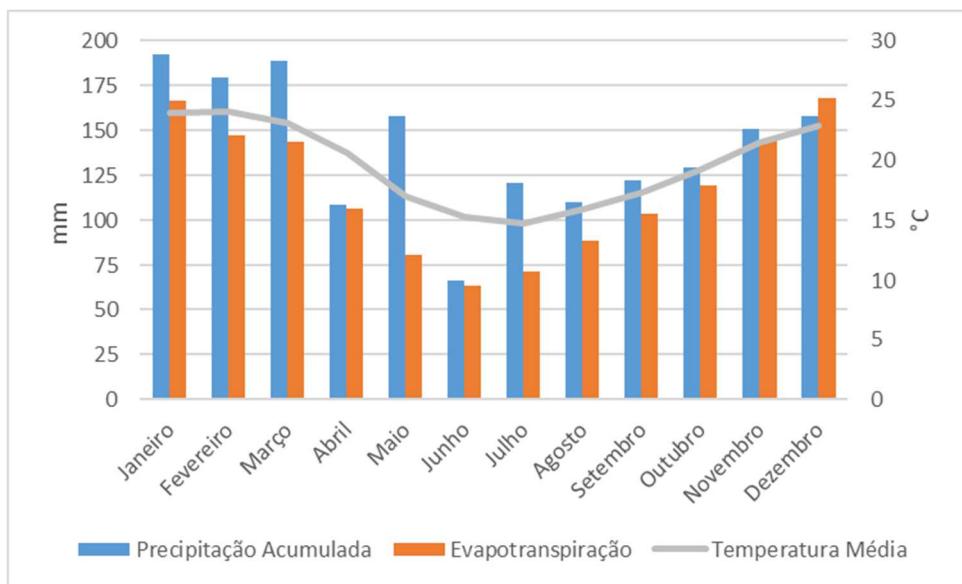
4.1. Características da área de estudo

O depósito de rejeitos da mineração em estudo ocupa uma área de aproximadamente 62,2 hectares, possuindo um volume de material aproximado de 10 milhões de m³. Por meio da análise histórica da área, foi possível verificar a evolução do uso e ocupação da área, sendo que na década de 50 já havia depósitos de rejeitos no local. Ao longo dos anos, o depósito de rejeitos continuou recebendo mais materiais, aumentando sua área de abrangência até início da década de 90. Cabe destacar que a preocupação ambiental e o consequente desenvolvimento da legislação e normas se intensificou a partir da década de 80. Portanto, boa parte do depósito de rejeitos foi construído sem levar em consideração este importante aspecto.

O entorno da área do depósito em questão é bastante antropizado, havendo a presença de empresas do ramo metal-mecânico e outros depósitos de rejeitos da mineração de empresas diversas. Em uma das faces do depósito de rejeitos em estudo, há um corpo hídrico que dista, aproximadamente, 65 a 70 metros.

Segundo a classificação climática de Köppen (ALVARES et. al., 2013), a área em estudo está situada no clima subtropical úmido de influência oceânica, sem estação seca, de verão quente (Cfa). De acordo com as normais climatológicas dos anos de 1981 a 2010 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020), as precipitações são bem distribuídas ao longo do ano, com maiores volumes no verão, sendo a média anual equivalente a 1684 mm. A temperatura média ao longo do ano é de 19,7 °C e a evapotranspiração total gira em torno de 1404 mm. A Figura 3 apresenta a temperatura média mensal, bem como a precipitação e a evapotranspiração acumulada mensal, ao longo de um ano.

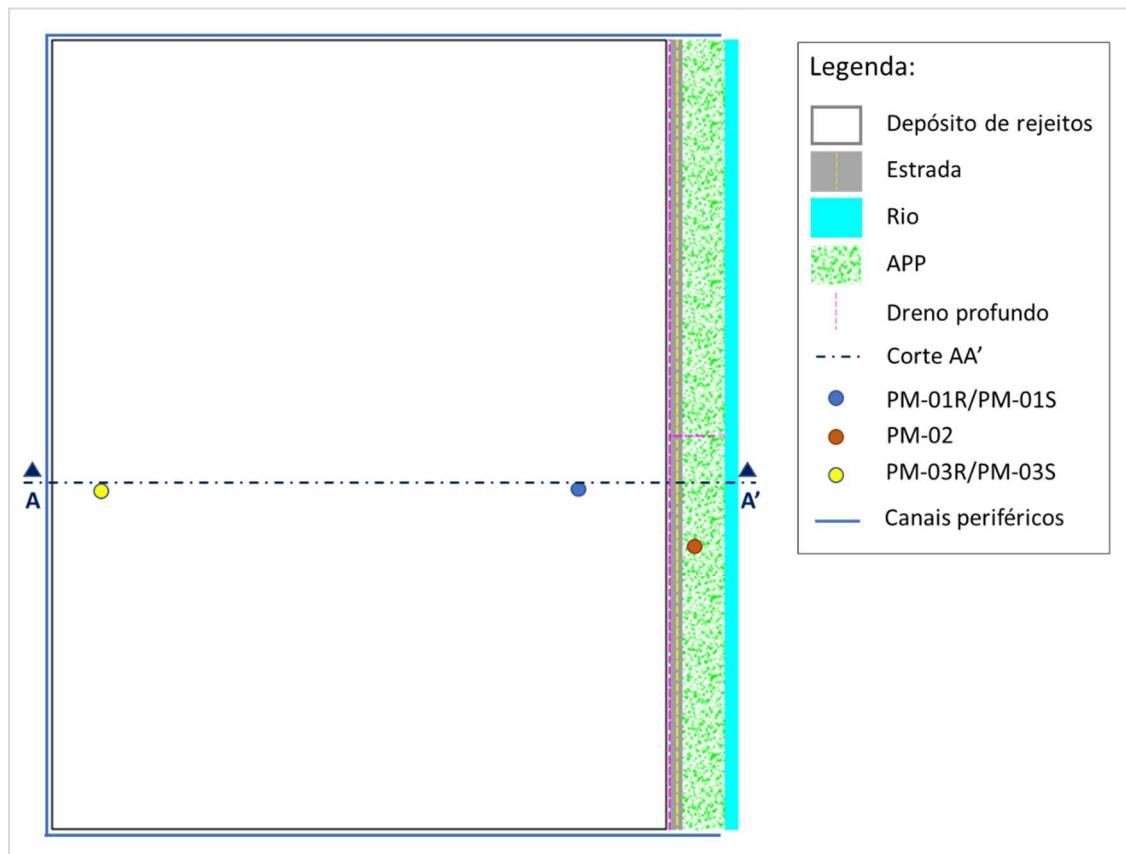
Figura 3 – Precipitação e evapotranspiração acumulada mensal e temperatura média mensal



Fonte: INMET (2020)

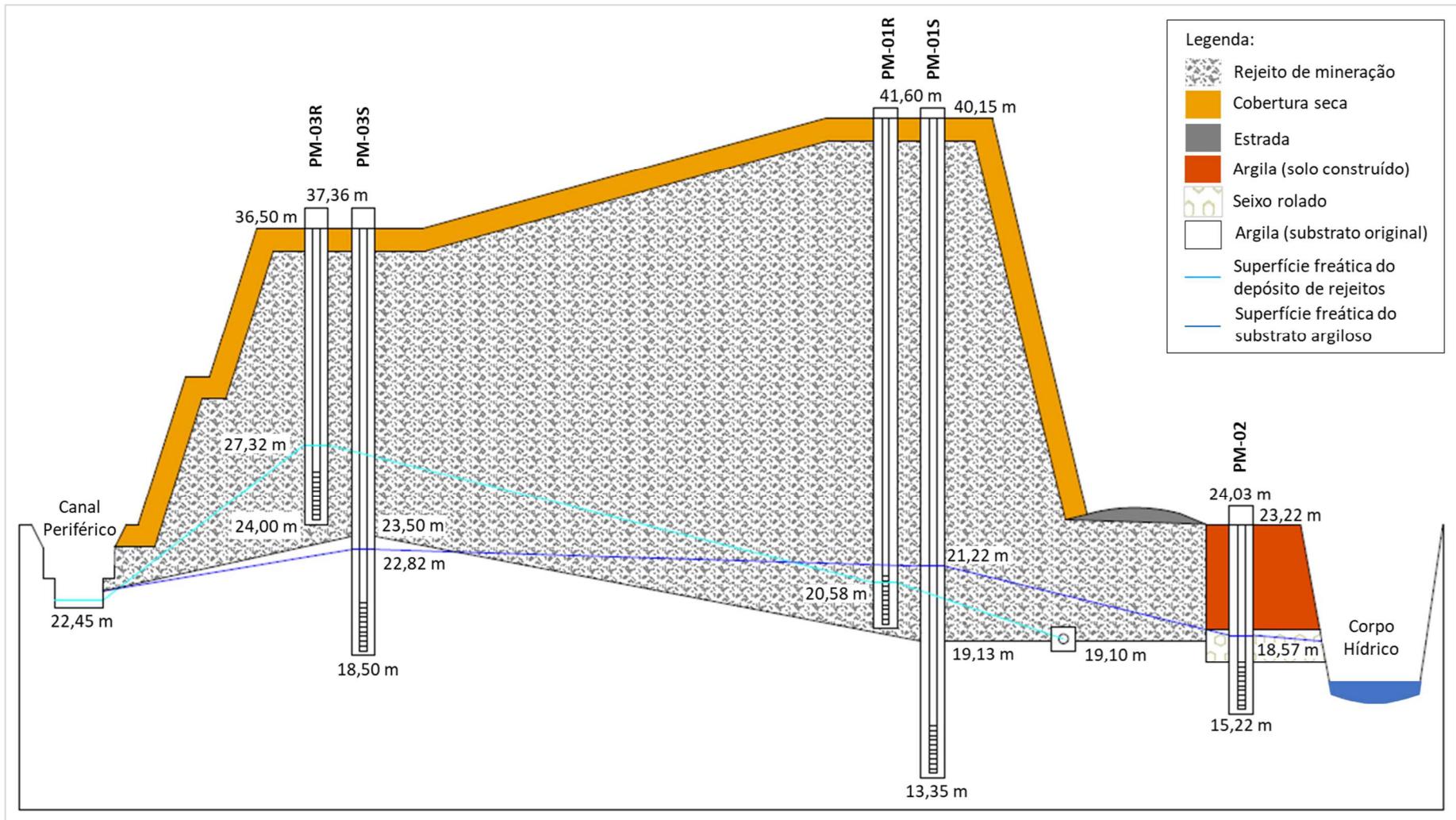
De acordo com o mapa potenciométrico da área de estudo, o fluxo subterrâneo tem sentido pilha de rejeitos para o rio. A Figura 4 mostra o croqui da área de estudo e os principais pontos notáveis que são mencionados ao longo deste estudo. O corte da seção hidroestratigráfica AA', indicado no croqui da área de estudo, está disponível na Figura 5.

Figura 4 – Croqui da área de estudo e seus pontos notáveis



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5 - Perfil hidroestratigráfico (Corte AA')



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. Hidrogeologia da área de estudo

A área da hidrogeologia é responsável pelos estudos da dinâmica da água subterrânea atrelada à componente geológica e às leis da física e da química, abrangendo subáreas como hidrogeoquímica; hidrogeomecânica; geohidrologia; litohidrologia (ABAS, 2020).

A pressão socioeconômica sobre os recursos naturais, em especial, sobre os recursos hídricos tem gerado diversos estudos para compreender a disponibilidade hídrica atual e futura frente à crescente demanda da sociedade. No que diz respeito à água subterrânea, a vulnerabilidade natural de um aquífero está diretamente relacionada à capacidade do meio físico de atenuar ou favorecer a contaminação da água disposta no subsolo por cargas antrópicas ou mesmo naturais (KREBS, 2004). Neste contexto, depósitos de rejeitos da mineração mal projetados ou gerenciados, podem representar fontes de contaminação de aquíferos localizados em unidades hidroestratigráficas que proporcionem a migração e dispersão dos contaminantes.

De acordo com o Mapa Hidrogeológico do Brasil (CPRM, 2020), o depósito de rejeito da mineração em estudo foi implantado sobre as unidades estratigráficas Palermo (aflorante) e Rio Bonito (subjacente). A formação Palermo possui espessura variando entre 10 e 100 m, sendo composta por arenito, siltito, siltito arenoso e folhelho, caracterizada pelo baixo grau de fraturamento, sendo pouco produtiva ou não aquífera. A Formação Rio Bonito, por sua vez, possui espessura variando entre 10 e 100 m, sendo composta por arenito e siltito, baixo grau de fraturamento e baixa produtividade, podendo ser moderada localmente. A

Tabela 3 sintetiza as informações hidroestratigráficas das Formações Palermo e Rio Bonito.

Tabela 3 – Informações das unidades hidroestratigráficas da área de estudo

	Unidade Estratigráfica Aflorante	Unidade Estratigráfica Subjacente
Unidade	Formação Palermo	Formação Rio Bonito
Litologia	arenito, siltito arenoso e folhelho	arenito e siltito
Espessura Média (m)	10 a 100	10 a 100
Unidade Hidrolítica	Granular (Gr)	Granular (Gr)
Espessura Média do Manto de Intemperismo (m)		5 a 30
Grau de Fraturamento		Baixo
Vazão (m ³ /h)	Menor que 1,0	10 a 25
Vazão Específica (m ³ /h/m)	Menor que 0,04	0,4 a 1,0
Transmissividade (m ² /s)	<10 ⁻⁶	10 ⁻⁵ a 10 ⁻⁴
Condutividade Hidráulica (cm/s)	<10 ⁻⁶	10 ⁻⁵ a 10 ⁻⁴
Produtividade	Pouco Produtiva ou Não Aquífera	Geralmente baixa, porém localmente moderada

Fonte: adaptado de CPRM (2020).

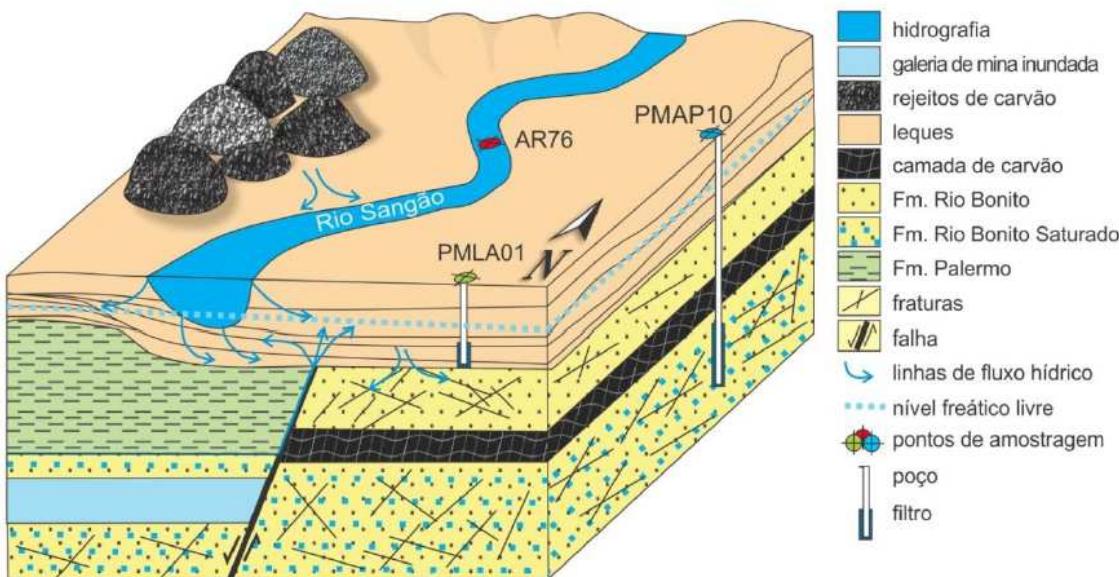
Superficialmente, as unidades estratigráficas da formação Palermo e Rio Bonito são sobrepostas pelo aquífero relacionado aos depósitos de leques aluviais, pertencente à unidade hidroestratigráfica Sedimentos Cenozoicos. O sistema de leques aluviais tem sua geração relacionada a materiais transportados pela ação da gravidade, por movimentos de massa tipo rastejo (lento) ou escorregamento (rápido), possuindo extensão, espessura e granulometria variadas, compreendendo desde argilas até blocos de rochas e matacões.

Em regiões de baixa declividade, em função do retrabalhamento e da deposição fluvial, podem ocorrer sedimentos arenosos e lamosos, eventualmente com cascalheiras (MACHADO, 2013). Trata-se de um aquífero com porosidade intergranular, com nível estático próximo à superfície, sendo que a recarga ocorre diretamente a partir das precipitações ou mesmo pelos rios, em períodos de maior deflúvio (KREBS & POSSA, 2008). Krebs (2004) relata que a espessura da camada de leques aluviais está limitada a 5,5 m na região da área de estudo. Estas coberturas possuem regime hidrogeológico de aquífero granular livre ou semiconfinados por lentes argilosas, denominado de Sistema Aquífero de Leques Aluviais. Em geral, poços instalados nessa litologia apresentam capacidade específica alta, de 6 m³/h/m, podendo fornecer vazões superiores a 30 m³/h (MACHADO, 2013). Dados provenientes do Relatório Técnico do IPT indicam valores de transmissividade (T) de 199,7 m³/dia, porosidade eficaz de 4,6 x 10⁻² e condutividade hidráulica (k) de 7,71 x 10⁻³ cm/s (SANTOS, 1975 *apud* MACHADO, 2013).

De forma geral, a complexidade estrutural dos compartimentos hídricos da área de estudo pode ser verificada na Figura 6. A presença de antigos depósitos de rejeitos da mineração são fontes expressivas de contaminação para o meio ambiente, já que muitos deles ainda carecem de coberturas e/ou estruturas que minimizariam a geração de drenagem ácida. As chuvas, ao se infiltrarem pelos depósitos, são carregadas pelos constituintes dos rejeitos e acabam carreando seus contaminantes aos rios superficialmente ou pelo lençol freático (leques aluviais). Esses contaminantes podem ainda alcançar as formações (Palermo e Rio Bonito) mais profundas, por meio das fraturas do compartimento rochoso. As galerias das minas subterrâneas desativadas, atualmente, inundadas, podem propiciar a surgência de drenagens ácidas na superfície através de falhas geológicas, podendo ser fonte de contaminação dos corpos hídricos mais superficiais.

Figura 6 - Representação dos compartimentos hídricos na região da área de estudo

BLOCO DIAGRAMA ESQUEMÁTICO



Fonte: HOELZEL & MIZUSAKI (2019).

Krebs & Possa (2008) verificaram que na bacia na qual está inserido o depósito de rejeitos em estudo, a hidroquímica da água contida na formação Rio Bonito possui grande variação composicional, sendo constatado que 48,5% das amostras foram classificadas como águas sulfatadas ou cloretadas sódicas; 24,2%, como sulfatadas ou cloretadas cárnicas ou magnesianas; 18,2%, como águas bicarbonatadas cárnicas ou magnesianas; e 9,1%, como águas bicarbonatadas sódicas. Tal fato pode ser explicado pela grande complexidade estrutural, uma vez que, na região, há presença de galerias em subsolo e falhas geológicas, além de áreas de recarga do aquífero estarem situadas em antigos locais de lavra ou mesmo onde foram depositados rejeitos da mineração. O aquífero relacionado aos depósitos de leques aluviais apresenta três classes de água bem definidas: águas bicarbonatadas cárnicas ou magnesianas (51,6%), sulfatadas ou cloretadas sódicas (25,8%), bicarbonatadas sódicas (16,1%). Por fim, somente 6,5% das águas foram classificadas como sulfatadas ou cloretadas cárnicas ou magnesianas.

4.3. A configuração geotécnica do depósito de rejeitos em estudo

O depósito de rejeitos em estudo foi objeto de um projeto de recuperação de área degradada (PRAD) desenvolvido entre os anos de 2011 a 2016. O PRAD teve como

premissas o remodelamento topográfico para eliminar voçorocas e disciplinar o fluxo das águas das chuvas. Após a etapa de movimentação dos rejeitos, o depósito recebeu uma camada de 0,15 m de calcário dolomítico (granulometria variando entre 9,50 a 19,50 mm e PRNT mínimo de 70%) e duas camadas de 0,25 m de argila compactada (coeficiente de condutividade hidráulica entre 10^{-6} e 10^{-7} cm/s). Sobre a camada impermeável de argila, adicionou-se 0,30 m de solo com fertilizantes que serve de substrato para crescimento da vegetação herbácea e proteção da camada argilosa. Uma rede de drenagem superficial foi instalada para coletar e transportar a água da chuva. Um sistema de canais periféricos em gabião foi construído circundando toda área do depósito de rejeitos, possuindo duas seções distintas (seção 1: profundidade: 2,50 m; largura base: 2,00 m; largura topo: 3,00 m; seção 2: profundidade: 2,70 m; largura base: 2,50 m; largura topo: 3,50 m).

O Diagnóstico Ambiental da área constatou que o depósito de rejeitos possui espessuras variadas que vão de, aproximadamente, 10 m a 20 m. Em vistorias realizadas, anteriormente à realização das obras de recuperação ambiental, foi possível verificar que os rejeitos depositados na área possuíam granulometria heterogênea, sendo que as bordas do depósito eram compostas por rejeitos de granulometria grossa, formando uma espécie de dique externo, enquanto o rejeito de granulometria fina encontrava-se na parte interna do depósito. As análises das 30 amostras de rejeito de granulometria mais fina apontaram que esse material pode ser classificado texturalmente, na maior parte das amostras, como solos areno-silto-argilosos, uma vez que, em média, a fração areia corresponde a 50,7%, enquanto silte e argila, representam 35,4% e 13,9%, respectivamente. Os ensaios de condutividade hidráulica, em laboratório, das amostras coletadas indicaram valor médio de $5,25 \times 10^{-3}$ cm/s e mediana de $1,80 \times 10^{-3}$ cm/s, característico de solos de elevada condutividade hidráulica. Os valores médios de índice de vazios, porosidade total e efetiva corresponderam a 0,909; 47,0% e 14,8%, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de caracterização física dos rejeitos finos

	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	k (cm/s)*	e*	n_{total} (%)*	n_{efetiva} (%)*
Máximo	83,5	89,1	49,6	$2,02E^{-02}$	1,471	59,5	29,6
Médio	50,7	34,5	13,9	$5,25E^{-03}$	0,909	47,0	14,8
Mediana	54,4	32,1	9,4	$1,80E^{-03}$	0,890	47,1	14,7
Mínimo	2,6	11,9	3,3	$8,58E^{-05}$	0,613	38,0	5,0
Desvio Padrão	22,6	17,1	11,2	$6,86E^{-03}$	0,214	5,7	7,5
Amostras	30	30	30	18	28	28	18

Legenda: k – coeficiente de condutividade hidráulica; e - índice de vazios; n – porosidade.

*Ensaios realizados em amostras indeformadas.

Fonte: Diagnóstico Ambiental da área em estudo.

As análises das amostras de rejeitos de granulometria mais grosseira apresentaram valores médios para areia de 78,5%, enquanto a fração silte e argila representaram 15,6% e 5,9%, respectivamente, sendo classificadas, texturalmente, como solos arenosos com pedregulhos, pouco siltosos a argilosos. Os valores de condutividade hidráulica em laboratório se mostraram elevados, característicos de solos bem permeáveis, sendo a média equivalente a $1,63 \times 10^{-3}$ cm/s e a mediana, $1,26 \times 10^{-3}$ cm/s. Os valores médios de índice de vazios, porosidade total e efetiva corresponderam a 0,753; 42,3% e 20,8%, respectivamente. A Tabela 5 apresenta a síntese dos resultados dos ensaios de caracterização física dos rejeitos de granulometria grossa.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de caracterização física dos rejeitos grossos

	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	k (cm/s)*	e*	n_{total} (%)*	n_{efetiva} (%)*
Máximo	87,7	24,6	10,4	$3,94E^{-03}$	1,176	54,0	26,5
Médio	78,5	15,6	5,9	$1,63E^{-03}$	0,753	42,3	20,8
Mediana	78,5	14,6	5,6	$1,26E^{-03}$	0,724	42,0	22,5
Mínimo	67,6	8,5	1,3	$7,30E^{-04}$	0,366	26,8	8,2
Desvio Padrão	5,8	4,6	2,4	$1,10E^{-03}$	0,195	6,5	5,9
Amostras	15	15	15	7	13	13	10

Legenda: k – coeficiente de condutividade hidráulica; e - índice de vazios; n – porosidade.

*Ensaios realizados em amostras indeformadas.

Fonte: Diagnóstico Ambiental da área em estudo.

As sondagens realizadas na área de estudo apontaram para a existência de sedimentos quaternários logo abaixo dos rejeitos. De acordo com os testemunhos, essa litologia apresenta pequena expressão na área, granulometria predominantemente silto-arenoso-argilosa, verificando-se, em algumas zonas, a ocorrência de termos mais grosseiros, com um predomínio da fração arenosa ou argilosa.

A litologia situada abaixo dos sedimentos quaternários foi considerada como impenetrável, correspondendo ao manto do intemperismo da camada de siltito de coloração cinza-alaranjada-esverdeada. Texturalmente, por apresentar grande variação, o siltito pode ser classificado desde areias siltosas, passando por siltes arenoso-argilosos até argilas silto-arenosas (areia: 25,7%; silte: 39,4%; argila: 34,9%). A condutividade hidráulica média verificada no siltito foi de $4,44 \times 10^{-4}$ cm/s e a mediana, $1,81 \times 10^{-4}$ cm/s, similar a solos siltosos a silto-arenosos. No que diz respeito à porosidade, os resultados mostraram que a porosidade total média do siltito girou em torno de 53,2%, enquanto a média da porosidade efetiva foi equivalente a 7,0% (Tabela 6).

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de caracterização física do siltito

	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	k (cm/s)*	e*	n_{total} (%)*	n_{efetiva} (%)*
Máximo	62,7	55,5	61,8	$2,70E^{-03}$	1,882	65,3	14,7
Médio	25,7	39,4	34,9	$4,44E^{-04}$	1,176	53,2	7,0
Mediana	21,0	39,4	34,4	$1,81E^{-04}$	1,181	54,1	6,3
Mínimo	5,5	20,6	5,5	$6,78E^{-07}$	0,568	36,2	4,0
Desvio Padrão	15,5	8,8	13,4	$8,60E^{-04}$	0,299	6,6	3,4
Amostras	37	37	37	9	27	27	8

Legenda: k – coeficiente de condutividade hidráulica; e - índice de vazios; n – porosidade.

*Ensaios realizados em amostras indeformadas.

Fonte: Diagnóstico Ambiental da área em estudo.

4.4. Poços de monitoramento

Neste estudo, foram avaliadas as cargas hidráulicas de três poços de monitoramento por meio de sensores automáticos. O par multinível PM-01R e PM-01S, situado sobre o depósito de rejeito, tem os filtros posicionados na porção inferior da pilha de rejeitos e no substrato abaixo da pilha, respectivamente. O PM-02 monitora a qualidade da água entre o depósito de rejeitos e o rio. Os perfis litológicos dos poços de monitoramento PM-01R, PM-01S e PM-02, encontram-se nos Anexos 01 e 02.

Além dos poços citados, sobre a pilha de rejeitos há outro conjunto de poços multiníveis, cujos monitoramentos da carga hidráulica não são realizados pelos sensores automáticos e, por este motivo, não são objeto deste estudo. Contudo, para fins de modelo conceitual, considerando as informações da última campanha de monitoramento, realizada em 28/11/2019, a carga hidráulica do poço de monitoramento que possui filtro instalado na parte inferior da pilha de rejeito (PM-03R) foi de 27,32 m, enquanto, no poço com filtro posicionado no substrato abaixo do depósito (PM-03S), foi de 22,82 m.

4.5. Dreno profundo

O projeto de recuperação ambiental do depósito de rejeitos da mineração em estudo previu a instalação de um dreno profundo com o objetivo de coletar eventuais drenagens subterrâneas que se deslocam de dentro da pilha sentido rio, já que o fluxo subterrâneo, de acordo com o mapa potenciométrico, sugere este sentido.

O dreno profundo foi instalado na base do talude da pilha de rejeitos, paralelo ao depósito e ao rio. Ao todo, o dreno possui 900 m de extensão, sendo que cada segmento de 450 m direciona a drenagem para o centro do dreno onde foi instalada uma caixa de passagem que é responsável por mudar a direção do fluido que, desta forma, escoa por um dreno instalado perpendicularmente ao dreno profundo e deságua no rio.

A instalação do dreno profundo buscou a interface da pilha de rejeitos com o substrato adjacente. Contudo, em virtude da irregularidade do terreno original, no qual a pilha de rejeitos foi construída, 614,1 m (68,2%) estão posicionados na camada de rejeitos e 286,9 m (31,8%), na camada argilosa. A interface do dreno profundo com o depósito de rejeitos e o substrato argiloso pode ser verificada no Anexo 03.

Os segmentos do dreno profundo foram instalados em tubulação de concreto poroso de 40 cm de diâmetro. As extremidades dos segmentos estão locadas na cota 19,427 m, sendo que a interligação junto a caixa de passagem foi realizada na cota 19,000 m, proporcionando declividade de 0,095%. A instalação do dreno profundo foi realizada em vala revestida por manta geotêxtil, sendo preenchida por brita.

O segmento de jusante da caixa de passagem foi instalado em tubulação de concreto não poroso de 40 cm de diâmetro, possuindo declividade de 0,50%. Na saída desse trecho junto ao rio, foi instalado um dispositivo de vedação que permite a saída da drenagem de dentro da tubulação, mas, à medida que o nível do rio se eleva, a pressão da água do rio empurra o dispositivo que veda a saída da tubulação, impedindo a entrada da água.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Poços de monitoramento

Os poços de monitoramento, objeto deste estudo, foram instalados por sonda rotativa e ferramentas diamantadas em conformidade com a ABNT NBR 15495-1 (2007)

– Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares.

Os poços de monitoramento foram instalados de acordo com as seguintes especificações:

- CAP de fundo de 2”;
- Filtro de 2 m de comprimento e diâmetro de 2”;
- Pré filtro de PVC com diâmetro entre 1 e 2 mm de espessura variada;
- Revestimento (tubo de PVC) de 1 e 2 m de comprimento e diâmetro de 2”;
- Selo de bentonita (proteção sanitária) de espessura variada;
- Selo de concreto com espessura de 30 cm – proteção sanitária;
- Tampão de PVC de 2” (tampa de proteção interna);
- Caixa de proteção (tubo de concreto de 1 m de comprimento e diâmetro de 8”);
- Câmara de calçada (ferro fundido) de 8” – tampa de proteção externa.

5.2. Medições de nível de água nos poços de monitoramento

Para a medição automática do nível de água dos poços de monitoramento, utilizou-se sensores de medição de pressão com capacidade de armazenamento interno de dados, de acordo com periodicidade previamente definida. Basicamente, o sistema é composto de um sensor de pressão absoluta (Cera Diver®) que fica posicionado na coluna d’água que possui a capacidade de medir a soma da pressão da coluna d’água e a pressão atmosférica. Para realizar a compensação das variações da pressão atmosférica, um sensor automático (Baro Diver®) é posicionado dentro do poço de monitoramento, acima do nível d’água. Na Figura 7 é possível verificar os sensores utilizados no estudo.

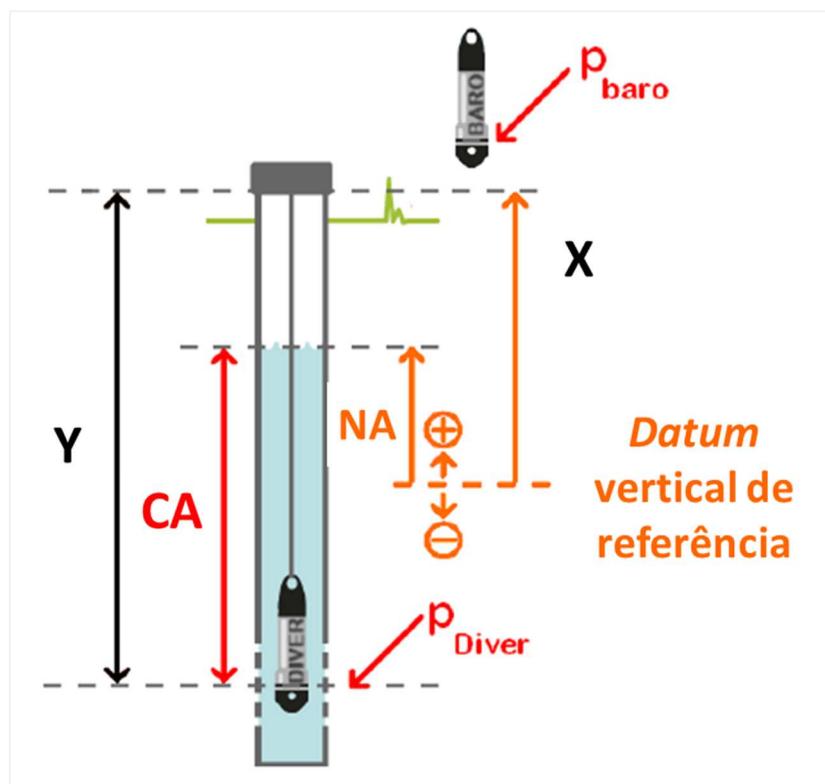
Figura 7 – Sensores automáticos utilizados na medição do nível d’água dos poços de monitoramento



Fonte: VAN ESSEN INSTRUMENTS (2016)

A Figura 8 apresenta um esquema de como a medição do nível de água (NA) funciona. Para medição do nível de água, faz-se necessário estabelecer um *datum* de referência vertical. Se o nível d’água estiver acima do *datum* de referência, ele terá um valor positivo, caso contrário, esse valor será negativo. A distância entre o revestimento protetor do poço de monitoramento (X) e o *datum* de referência vertical é medido. O sensor (p_{diver}) é suspenso por um cabo de comprimento conhecido (Y). Além disso, o sensor que realizará a compensação atmosférica (p_{baro}) também é instalado acima do nível d’água (VAN ESSEN INSTRUMENTS, 2016).

Figura 8 – Esquema com as principais informações necessárias ao cálculo do nível de água de poço de monitoramento



Fonte: Adaptado de VAN ESSEN INSTRUMENTS (2016).

Para o cálculo da coluna d'água (CA) é utilizada a seguinte equação:

$$CA = 9806,65 \frac{p_{diver} - p_{baro}}{\rho g} \quad \text{Equação 2}$$

onde:

p é a pressão em cmH₂O;

g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s);

ρ é a densidade da água (1.000 kg/m³).

Em relação ao *datum* vertical de referência, o nível d'água (NA) pode ser calculado de acordo com a equação a seguir:

$$NA = X - Y + CA \quad \text{Equação 3}$$

Substituindo CA da Equação 2 na Equação 3, obtém-se a seguinte equação:

$$NA = X - Y + 9806,65 \frac{p_{diver} - p_{baro}}{\rho g} \quad \text{Equação 4}$$

Para obtenção dos dados registrados na memória dos equipamentos, os sensores são retirados dos poços de monitoramentos e, então, acoplados a uma unidade leitora que se conecta ao computador via cabo USB. Os dados são diretamente exportados para o *software* Diver-Office, o qual executa a compensação barométrica, apresentando como resultado o nível d'água no poço de monitoramento.

A Tabela 7 apresenta os dados referentes à instalação dos sensores nos poços de monitoramento.

Tabela 7 – Dados dos sensores automáticos instalados nos poços de monitoramento

Dados	Poço de Monitoramento			
	PM-01R	PM-01S	PM-02	
Fabricante	Van Essen	Van Essen	Van Essen	Van Essen
Modelo	Cera Diver	Baro Diver	Cera Diver	Cera Diver
Número de Série	W8365	AT281	W8368	W8352
Intervalo de medições (h)	04:00	04:00	04:00	04:00
Cota da boca do poço (m)	41,61	41,58	41,58	24,03
Profundidade do poço (m)	21,78	26,20	26,20	8,78
Nível d'água instalado (m)	20,99	20,99	20,24	5,35
Coluna d'água (m)	0,79	NA	5,96	3,43
Profundidade do sensor (m)	0,57	NA	2,30	2,34
Comprimento cabo + sensor (m)	21,56	5,00	22,54	7,69
Distância do fundo (m)	0,22	21,2	3,66	1,09

NA: não aplicável, sensor posicionado acima do nível d'água.

5.3. Medições de vazão provenientes do dreno profundo

De acordo com a ABNT NBR 13403:1995 – Medição de vazão em efluentes líquidos e corpos receptores – escoamento livre, existem diversos métodos para medição, sendo que deverá ser escolhido aquele mais adequado à medição que será realizada.

A referida norma lista os seguintes métodos para medição de vazão: calha Palmer-Bowlus, calha Parshall, flutuadores, magnético (eletromagnético), molinete, orifícios, bocais e tubos curtos, traçadores, ultra-sônico (acústico), vertedor e volumétrico. Para orientar a escolha da técnica, a norma traz uma relação de métodos recomendados de acordo com a vazão, apresentando também as vantagens e desvantagens de cada método.

Por se tratar da medição de efluente proveniente de dreno, com vazão variando de 0,52 L/s a 2,4 L/s, considerada baixa, para o estudo em questão, optou-se pelo método volumétrico, já que o mesmo é de fácil operação e baixo custo.

A ABNT NBR 13403 (1995) define o Método Volumétrico como aquele em que a aferição está relacionada ao tempo que a vazão do efluente necessita para encher o volume de um recipiente previamente conhecido. Dessa forma, a razão do volume conhecido pelo tempo é equivalente à vazão. Segundo a norma, o erro do método é de até 2%, sendo realizado de forma descontínua, fornecendo a vazão média, sem necessidade de calibração de equipamentos.

Para a medição em campo, adotou-se um recipiente de volume de 11 L e cronômetro digital. As medições eram iniciadas ao posicionar o recipiente sob o fluxo do efluente, sendo que, simultaneamente, o cronômetro era acionado, iniciando a contagem do tempo. Assim que o enchimento do recipiente era finalizado, o cronômetro era acionado novamente, interrompendo a contagem do tempo. As medições eram repetidas de forma que, em três delas, a diferença de tempo verificado era inferior a 10%. Posteriormente à validação das medições, os tempos medidos eram lançados em planilha eletrônica para cálculo do tempo médio e da vazão média. A Figura 9 apresenta a medição da vazão proveniente do dreno profundo por meio do método volumétrico.

Figura 9 – Medição da vazão proveniente do dreno profundo



Fonte: arquivo do autor.

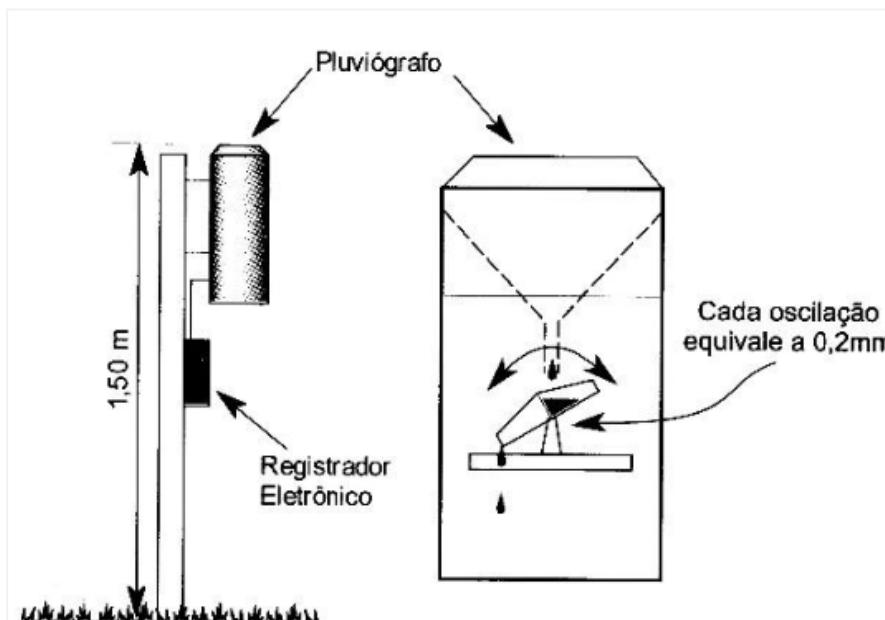
5.4. Medições da pluviometria

Existem diversos métodos para medir a precipitação, podendo ser realizado de forma direta, por meio da coleta da chuva, utilizando pluviômetro e pluviógrafo ou indireta, por meio de radares ou mesmo imagens de satélites.

No presente estudo, utilizou-se um pluviógrafo da rede do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). Os pluviógrafos são equipamentos que fornecem o monitoramento contínuo da precipitação, podendo ser mecânicos, nos quais a quantificação da água coletada é realizada por uma balança e as informações da precipitação são registradas em papel. Já os pluviógrafos mais modernos são eletrônicos, dotados de memória (*datalogger*) para armazenamento dos dados, podendo, também, transmiti-los via rádio ou telefone celular (COLLISCHONN & TASSI, 2008). De acordo com o CEMADEM (2020), a transmissão dos dados de chuva acumulada, em milímetros, ocorre a cada 10 minutos, ao passo que, em período sem chuva, a transmissão da informação de 0 milímetros se dá a cada 60 minutos. Os dados, então, são processados e disponibilizados para a Sala de Situação do CEMADEN e, posteriormente, ficam disponíveis para acesso no sítio do Centro por meio de mapa interativo que apresenta o volume de chuvas ocorridas no local nas últimas 24 horas. Também é possível ter acesso a série histórica de dados dos equipamentos ou período de interesse.

Os pluviógrafos utilizados atualmente são aqueles dotados de cubas basculantes (Figura 10). O princípio do funcionamento deste modelo está baseado em um sistema de cubas articuladas por um ponto central, o qual conduz a água coletada para um funil. A báscula posicionada na “posição para cima”, ao coletar 0,2 milímetros de altura de chuva, tem sua posição alterada em decorrência do peso da água coletada. O movimento alternado de enchimento e esvaziamento das básculas persiste até o final da precipitação. Os movimentos são registrados por um sensor, sendo registrado a um *data logger* acoplado ao equipamento (MONSANO et. al, 2015).

Figura 10 - Pluviógrafo de cubas basculantes



Fonte: ARAÚJO (2017) apud COLLISCHON & DORNELLES (2015)

Os dados de precipitação utilizados neste estudo foram retirados do sítio do CEMADEN referentes à pluviógrafo localizado em área adjacente à área de estudo, mais especificamente, junto à extrema da propriedade. A proximidade da localização do pluviógrafo em relação à área de estudo confere grande confiabilidade nos dados de precipitação que estão sendo utilizados no estudo.

5.5. Análise Estatística

Neste estudo, foram realizadas análises de correlação linear de Pearson entre as variações das cargas hidráulicas verificadas nos poços de monitoramento PM-01R, PM-01S e PM-02. Além disso, efetuou-se a análise da correlação entre a precipitação e a variação da vazão na saída do dreno, bem como o tempo de resposta entre uma determinada precipitação e o seu reflexo na vazão. Por fim, buscou-se, também, analisar a correlação entre a variação das cargas hidráulicas dos referidos poços de monitoramento com a vazão na saída do dreno.

Para todas as correlações realizadas, analisou-se o índice de significância.

O programa estatístico utilizado nas análises de correlação e índice de significância foi o SPSS 20 (IBM SPSS Statistics Visualizador, Armonk, NY, EUA). Para a confecção dos gráficos, utilizou-se o programa Microsoft Excel.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Análise da carga hidráulica dos poços de monitoramento frente às precipitações

Os dados das precipitações, provenientes do banco do CEMADEN, medidas no pluviôgrafo situado no limite da área de estudo, para o período de agosto de 2019 a abril de 2020, totalizaram 852 mm, o equivalente a uma média mensal de 94,7 mm. No geral, a maioria dos meses (agosto/2019, setembro/2019, dezembro/2019, fevereiro/2020, março/2020 e abril/2020) apresentaram precipitações abaixo das normais, sendo que os meses de agosto/2019, setembro/2019, dezembro/2019, março/2020 e abril/2020 foram caracterizados por períodos bastante secos. Por outro lado, nos meses de outubro/2019 e janeiro/2020, a quantidade de chuva registrada foi acima da normal para a região. Por fim, o mês de novembro apresentou chuvas que estiveram dentro das normais climatológicas. A Tabela 8 apresenta um comparativo da precipitação ao longo dos meses de agosto/2019 a abril/2020 frente às normais climatológicas do período de 1960 a 2004.

Tabela 8 – Comparativo da precipitação dos meses de agosto de 2019 a abril de 2020 frente às normais climatológicas (1960 a 2004)

Mês	Normal Climatológica (mm)	Precipitação Medida (mm)	Comparação
Agosto/2019	90 - 110	58,6	Abaixo da normal
Setembro/2019	110 - 130	37,4	Abaixo da normal
Outubro/2019	110 – 130	162	Acima da normal
Novembro/2019	110 – 130	111,8	Conforme normal
Dezembro/2019	130 – 150	62,6	Abaixo da normal
Janeiro/2020	150 -170	219,2	Acima da normal
Fevereiro/2020	170 – 190	108,8	Abaixo da normal
Março/2020	150 – 170	32,2	Abaixo da normal
Abri/2020	70 – 90	59,4	Abaixo da normal

Fonte: Adaptado pelo autor; EPAGRI/CIRAM (2020); CEMADENM (2020).

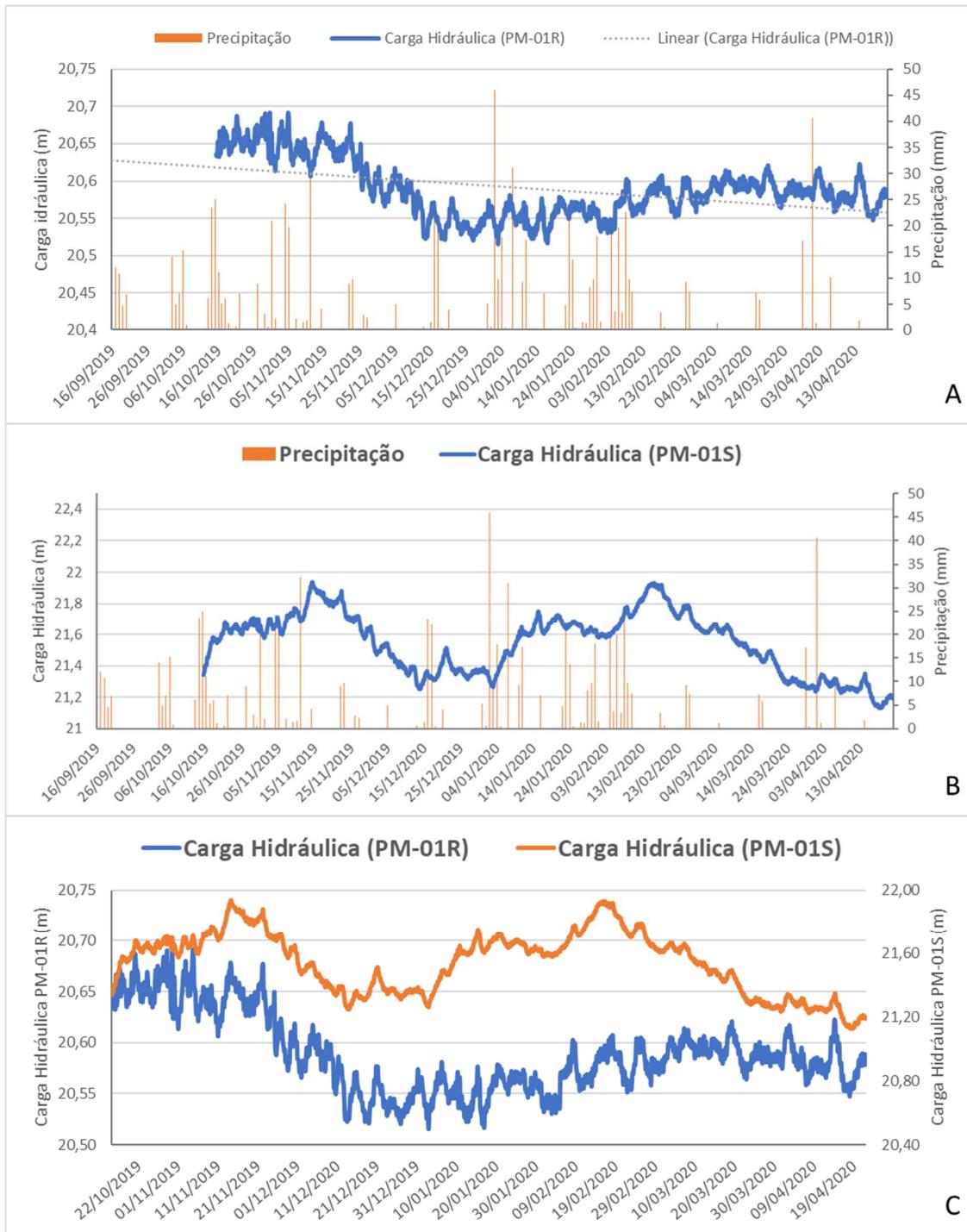
O monitoramento da carga hidráulica do poço de monitoramento com filtro instalado na porção inferior da pilha de rejeitos (PM-01R), realizado por meio dos sensores automáticos, ocorreu ao longo do período de 15/10/2019 a 22/04/2020. A carga hidráulica inicial medida foi de 20,64 m, sendo a máxima equivalente a 20,69 m e a mínima, 20,52 m. O gráfico gerado pelas cargas hidráulicas medidas apresenta, ao longo do período monitorado, tendência de diminuição. Contudo, é possível verificar uma certa

variação quando se analisa a carga hidráulica média por períodos. Ao longo do período de 15/10/2019 a 22/11/2019, a carga hidráulica média foi equivalente a 20,65 m. Contudo, após um período de estiagem (11/12/2019 a 05/02/2019), a carga hidráulica média reduziu para 20,55 m. Posteriormente, após um período de precipitações volumosas (06/02/2019 a 22/04/2020), a carga hidráulica média apresentou um pequeno aumento, girando em torno de 20,58 m.

Avaliando, agora, a evolução da carga hidráulica do poço de monitoramento PM-01S, par multinível do poço PM-01R, o qual possui filtro posicionado na litologia que está sob a pilha de rejeitos, é possível verificar que, para o período de 15/10/2019 a 22/04/2020, a medição inicial foi de 21,34 m. Os resultados apontam carga hidráulica média de 21,54 m, mínima de 21,13 e máxima de 21,94 m. Dessa forma, a variação da carga hidráulica no PM-01S oscilou 0,81 m no período.

Ao confrontar as cargas hidráulicas dos poços de monitoramento PM-01R e PM-01S é possível verificar que a carga hidráulica do PM-01S, que possui filtro situado na litologia sob o depósito de rejeitos, é superior àquela do PM-01R, o qual possui filtro instalado na porção inferior do depósito de rejeitos. Tal configuração sugere que, nesta porção do depósito de rejeitos, há um fluxo ascendente da água subterrânea para dentro da pilha, caracterizando uma possível recarga do lençol contido no interior do depósito. Contudo, vale destacar que o perfil litológico do PM-01S indica que o substrato abaixo do depósito de rejeitos é caracterizado por argila, material de baixa condutividade hidráulica. Além disso, em uma análise visual das curvas de carga hidráulica dos referidos poços de monitoramento, é possível verificar que o comportamento das mesmas apresenta algumas similaridades, sendo que a análise estatística mostra uma correlação linear de Pearson, positiva e significativa ($p > 0,01$), equivalente a 0,40. O comportamento das cargas hidráulicas dos poços de monitoramento PM-01R e PM-01S é demonstrado na Figura 11.

Figura 11 – Precipitação e variação das cargas hidráulicas dos poços de monitoramento PM-01R (A), PM-01S (B) e comparativo entre a carga hidráulica de ambos poços (C)



Fonte: elaborado pelo autor.

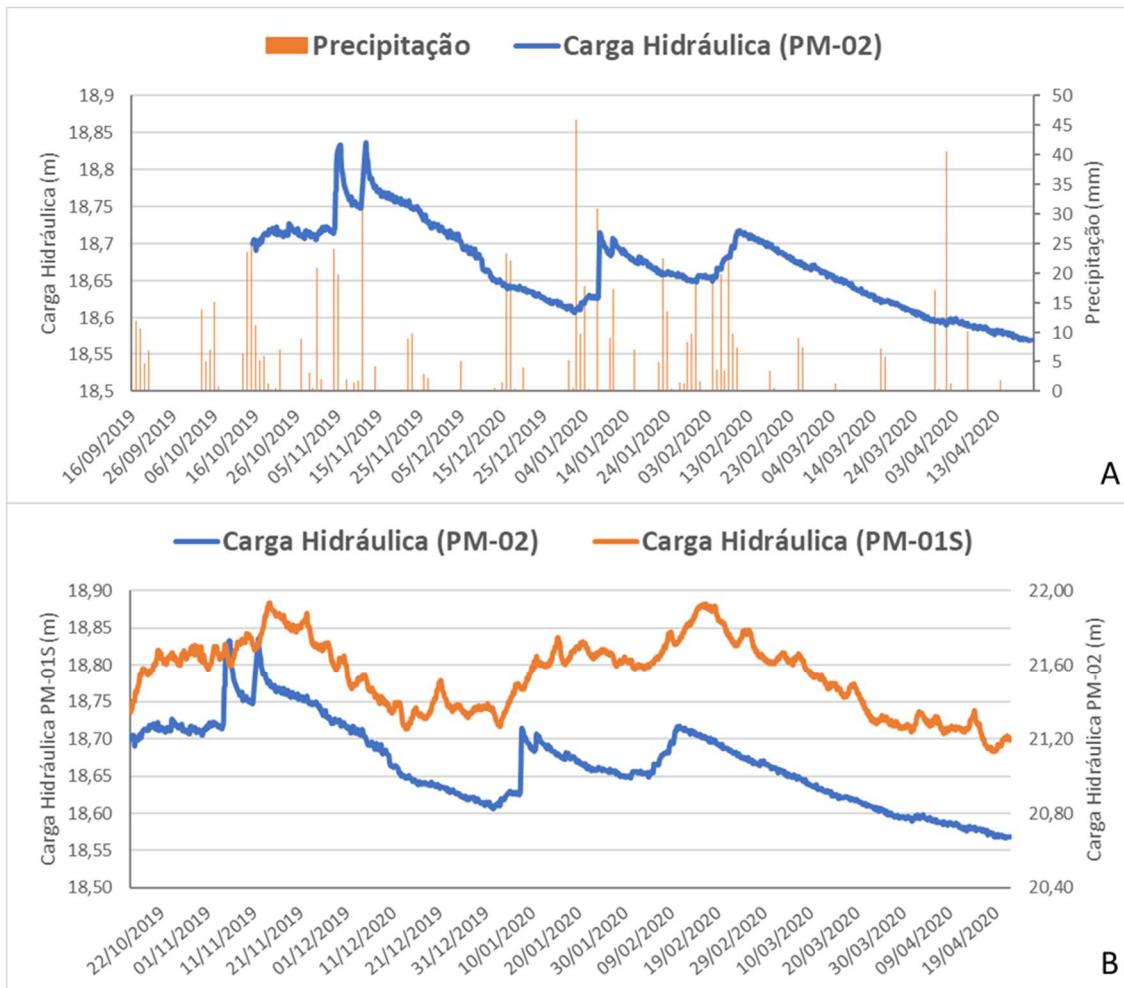
Estudo realizado por Souza (2012) avaliou, por um período de dois anos, o desempenho de 4 tipos de cobertura seca para depósitos de rejeito similar àquele

depositado na área de estudo. No piloto, foram instaladas 4 células de 110 m³ de rejeitos grossos (granulometria de 25 a 37 mm) com área superficial de 56,25 m², 16 m² de área de base e 3 m de altura. Todas as células foram impermeabilizadas na base com manta tipo geomembrana de PVC com manta geotêxtil de poliéster e possuíam dispositivo para coleta do volume percolado. Para fins de avaliação a primeira célula foi deixada sem nenhuma cobertura. Na segunda célula, adotou-se uma camada de 30 cm de rejeito grosso e fino compactado. Para a terceira célula, sobre a camada de 30 cm de rejeito fino e grosso compactado, utilizou-se uma camada de 30 cm de argila compactada e outra superior de 30 cm de solo não compactado. Por fim, na quarta célula, sobre a camada de rejeito grosso e fino, utilizou-se 30 cm de cinza grossa compactada, 30 cm de argila compactada, 30 cm de cinza grossa compactada, sendo a camada superior composta de 30 cm de solo não compactado. O coeficiente de condutividade hidráulica (k) da cinza grossa e da argila eram, respectivamente, $2,45 \times 10^{-4}$ cm/s e $3,25 \times 10^{-6}$ cm/s. O estudo monitorou a precipitação ao longo dos anos de 2008 e 2009, a qual totalizou 3.549,9 mm. Para coleta da água que infiltrou pelas células, na base das mesmas, foram instalados lisímetros, tanques de base e laterais impermeáveis, abertos na parte superior, de 2 m de diâmetro e 2 m de altura. Os resultados mostraram que o volume coletado nos lisímetros nas células 1, 2, 3 e 4 foram, respectivamente, 52.356,7 L, 18.157,3 L, 183,7 L e 7.354,1 L. Dessa forma, é possível verificar que a cobertura aplicada à célula 3, que apresenta certa similaridade com a cobertura seca instalada na área de estudo, foi a que apresentou a maior eficiência quanto à impermeabilização superior do depósito de rejeitos. De modo geral, é possível verificar que apenas 0,4% (14,6 mm) da precipitação para os anos de 2008 e 2009 foi coletada no lisímetro dessa célula, mostrando que a infiltração da água de chuva foi drasticamente reduzida. Considerando os resultados desse estudo, é possível verificar que há ocorrência da contribuição direta da água da chuva para o lençol da pilha de rejeitos, contudo, pode-se considerar como sendo quase desprezível.

Por fim, o monitoramento da carga hidráulica do poço de monitoramento PM-02, situado a 50 m da margem do rio, apresentou oscilações que vão desde 18,57 m a 18,84 m, ao longo do período analisado. Por meio da curva apresentada na Figura 12, é possível verificar que houve picos na carga hidráulica do poço em questão, seguido por períodos de redução gradual. Para uma avaliação mais assertiva da dinâmica da água subterrânea no poço PM-02, seria importante avaliar, também, o nível d'água no rio, o qual pode influenciar diretamente o lençol freático das áreas que margeiam o mesmo.

Considerando que o filtro dos poços de monitoramento PM-01S e PM-02 foram posicionados em cotas abaixo da cota da base da pilha de rejeitos, cabe verificar a interação hidrogeológica entre os respectivos aquíferos. De acordo com a Figura 12, é possível verificar que as oscilações das curvas das cargas hidráulicas do poços de monitoramento PM-01S e PM-02 apresentam similaridades. Efetuando a análise de correlação entre a variação da carga hidráulica dos referidos poços de monitoramento, verifica-se um coeficiente de correlação linear de Pearson positivo equivalente a 0,81, considerado forte, que também foi considerado significativo ($p < 0,01$). O maior coeficiente de correlação, 0,82, é verificado quando correlacionada a carga hidráulica do PM-02 e a carga hidráulica do PM-01S do segundo dia subsequente. Mesmo apresentando diferenças de carga hidráulica que variam de 2,56 m a 3,23 m, os resultados indicam a existência de interconexão entre os aquíferos dos poços de monitoramento avaliados, sendo que o fluxo da água subterrânea tem sentido PM-01S para PM-02. Além disso, de acordo com o gráfico é possível verificar que os picos do PM-02 ocorrem anteriormente àqueles verificados no PM-01R, sendo que este atraso pode ser explicado pela recarga direta da chuva do lençol freático no PM-02, enquanto que o PM-01R, por estar situado abaixo da pilha de rejeitos, tem o nível do aquífero alterado de forma indireta, possivelmente, pelo lençol freático regional.

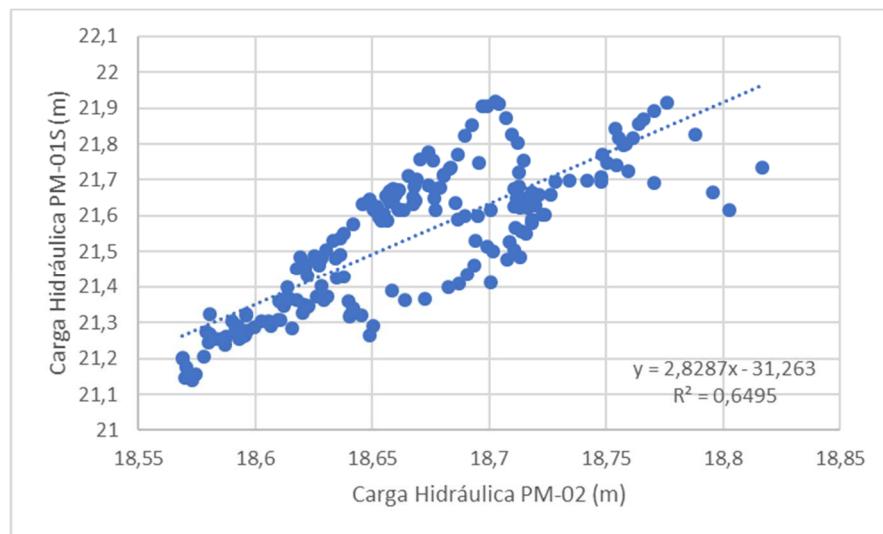
Figura 12 – Precipitação e carga hidráulica do poço de monitoramento PM-02 (A) e comparativo entre as cargas hidráulicas dos poços de monitoramento PM-02 e PM-01S (B)



Fonte: elaborado pelo autor.

A dispersão dos pontos referente à correlação entre as cargas hidráulicas diárias médias dos poços de monitoramento PM-01S e PM-02, bem como a reta de regressão linear são apresentadas na Figura 13.

Figura 13 – Dispersão dos pontos referente à correlação entre a média da carga hidráulica dos poços de monitoramento PM-01S e PM-02



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 9, são apresentados os dados consolidados da variação da carga hidráulica nos poços de monitoramento PM-01R, PM-01S e PM-02 para o período analisado. Os dados indicam que o poço PM-01S é aquele que sofre maior influência das precipitações, enquanto o seu par multinível, PM-01R, é aquele que sofre menor influência.

Tabela 9 – Dados consolidados da variação da carga hidráulica nos poços de monitoramento PM-01R, PM-01S e PM-02

Carga Hidráulica	PM-01R	PM-01S	PM-02
Mínima (m)	20,52	21,13	18,57
Média (m)	20,59	21,54	18,67
Máxima (m)	20,69	21,94	18,84
Amplitude da variação (m)	0,18	0,81	0,27

Fonte: elaborado pelo autor.

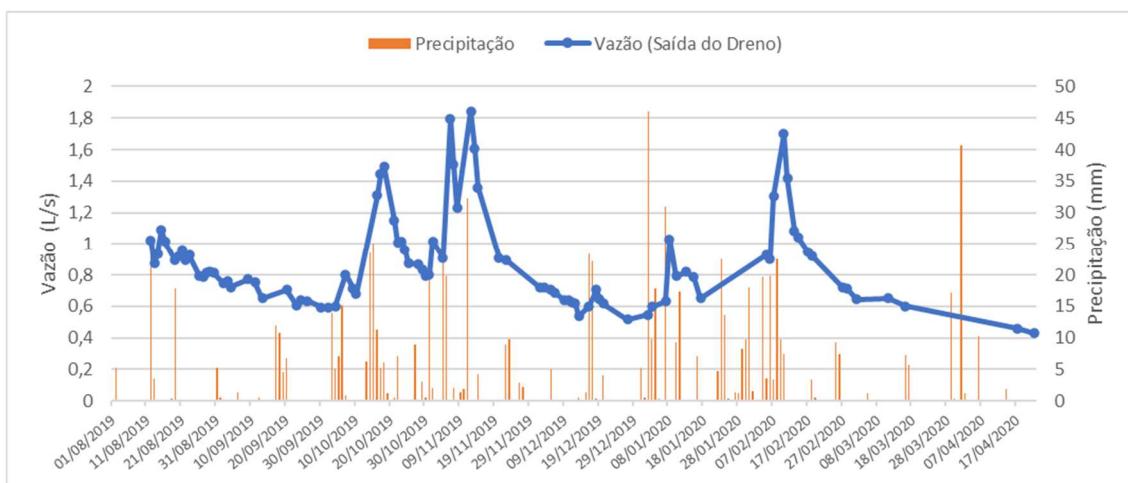
6.2. Análise da vazão na saída do dreno profundo

O dreno profundo foi concebido com o objetivo de coletar eventuais fluxos subterrâneos provenientes do depósito de rejeitos em direção ao rio. Contudo, de acordo com o projeto, é possível verificar que parte do dreno foi assentado sobre rejeitos de mineração, aproximadamente 614,1 m, e parte, 285,9 m, sobre a litologia que está abaixo

do depósito. Dessa forma, espera-se que as vazões coletadas pelo dreno sejam provenientes desses estratos, estando sob influência dos seus respectivos aquíferos.

O monitoramento da vazão na saída do dreno, que coleta as águas provenientes do dreno profundo, apresenta grande variação, estando o seu aumento relacionado à períodos chuvosos, enquanto a redução da vazão é verificada em períodos secos. Para o período avaliado, as vazões mínima e máxima foram equivalentes a 0,43 L/s e 1,84 L/s, enquanto a vazão média girou em torno de 0,87 L/s. A Figura 14 apresenta os resultados do monitoramento da vazão proveniente do dreno profundo e a precipitação.

Figura 14 – Monitoramento da vazão proveniente do dreno profundo e precipitação



Fonte: elaborado pelo autor.

Ainda, de acordo com a Figura 14, é possível verificar que, após eventos de precipitações mais intensas, a resposta da variação da vazão é verificada em poucos dias. Efetuando a análise estatística da correlação dos dados da precipitação e vazão na saída do dreno para diferentes configurações de precipitação acumulada e vazão, observou-se que o coeficiente de correlação linear de Pearson para precipitações acumuladas de 4 dias consecutivos e a vazão do quinto dia subsequente foi a que apresentou o maior valor, 0,61, sendo positiva e significativa ($p > 0,01$). Contudo, cabe ponderar que, como o monitoramento da vazão foi realizado de forma manual, não foi possível coletar dados em todos os dias do período analisado, por isso, a avaliação da correlação acabou sendo prejudicada, pois houve chuvas intensas que não puderam ter a vazão de resposta monitorada. Além disso, outro fator que pode ter colaborado para uma menor correlação dos dados está relacionado ao horário das medições realizadas que, ao longo do estudo,

não puderam ser padronizadas. Por fim, considerando que o dreno profundo foi posicionado em diferentes substratos que possuem diferentes dinâmicas de variação do nível de água, conforme já verificado neste estudo, é provável que as contribuições de cada substrato influenciem na vazão do dreno em períodos desiguais, dificultando a análise de correlação entre a precipitação e vazão. A Tabela 10 mostra os coeficientes de correlação de Pearson obtidos nas diferentes simulações realizadas entre os dados de vazão e precipitação acumulada.

Tabela 10 – Análises da correlação entre precipitação e vazão da saída do dreno

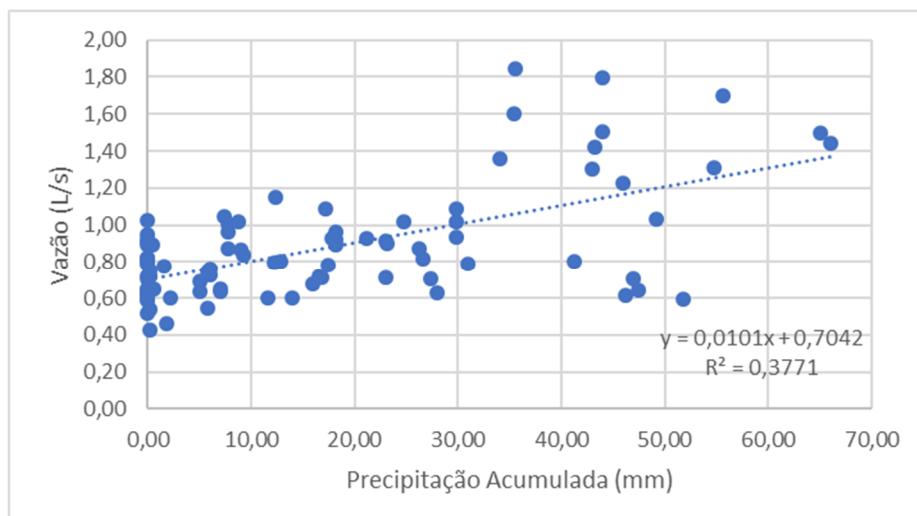
Precipitação	Vazão	Coeficiente de Correlação (r)
Acumulada em 4 dias	Medida no 5º dia	0,61
Acumulada em 3 dias	Medida no 4º dia	0,59
Acumulada em 5 dias	Medida no 6º dia	0,58
Acumulada em 4 dias	Medida no 6º dia	0,55
Acumulada em 3 dias	Medida no 5º dia	0,55
Acumulada em 2 dias	Medida no 3º dia	0,52
Acumulada em 4 dias	Medida no 4º dia	0,50
Acumulada da semana	Média da semana	0,60*

Nota: todas as correlações avaliadas são significativas ($p < 0,01$). *Correlação significativa ($p < 0,05$).

Fonte: elaborado pelo autor.

A dispersão dos pontos referente à correlação entre a precipitação acumulada em 4 dias e a vazão medida no quinto dia subsequente, bem como a reta de regressão linear é apresentada na Figura 15.

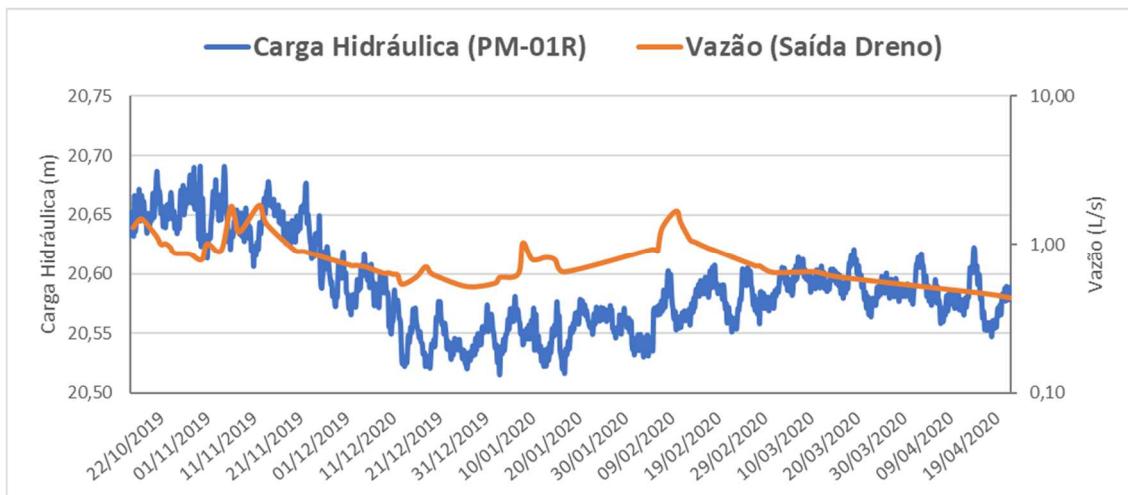
Figura 15 – Dispersão dos pontos referente à correlação entre a precipitação acumulada em 4 dias e a vazão medida no quinto dia subsequente



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme verificado anteriormente, os dados da vazão na saída do dreno são fortemente influenciados pela precipitação, apresentando picos após eventos de chuvas intensas. Por outro lado, a influência da precipitação sobre a carga hidráulica é menos abrupta no poço de monitoramento PM-01R, apresentando leves variações nas cargas hidráulicas considerando períodos secos e chuvosos. A Figura 16 mostra a variação da vazão na saída do dreno e da carga hidráulica verificada ao longo do período monitorado.

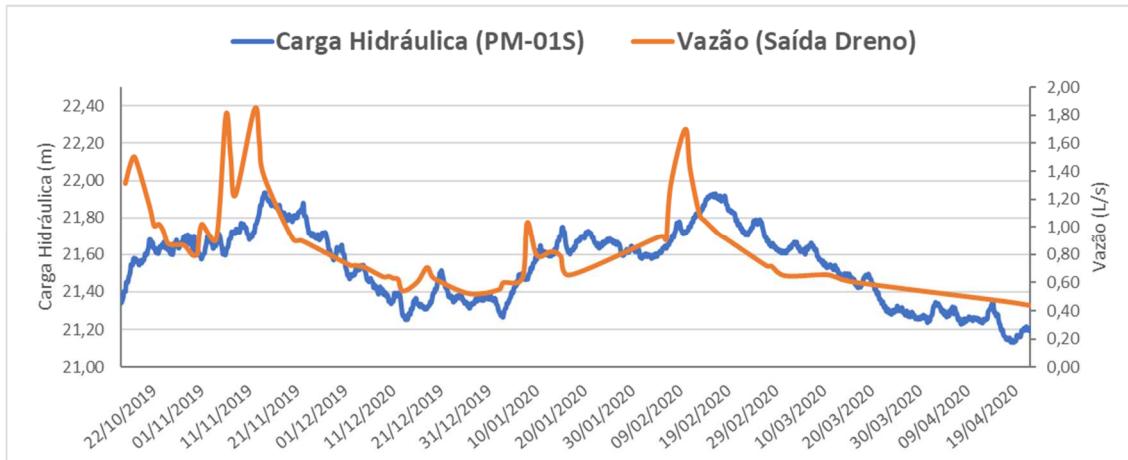
Figura 16 – Monitoramento da vazão na saída do dreno e a carga hidráulica do poço de Monitoramento PM-01R



Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando novamente as vazões medidas na saída do dreno, e comparando-as às cargas hidráulicas do poço de monitoramento PM-01S, é possível verificar que as oscilações de ambos os dados são similares, com picos e períodos de recessão ocorrendo em momentos próximos (Figura 17).

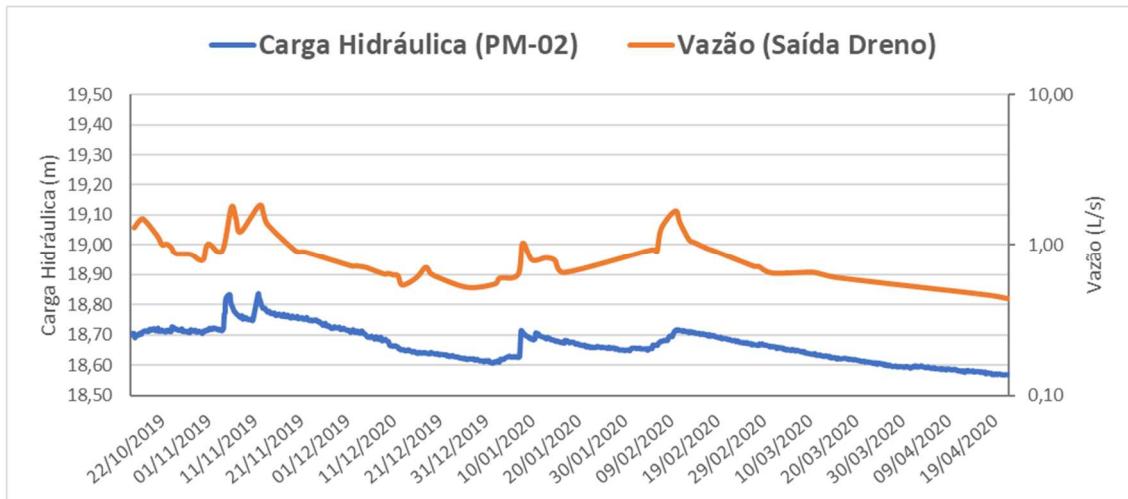
Figura 17 – Monitoramento da vazão na saída do dreno e a carga hidráulica do poço de Monitoramento PM-01S



Fonte: elaborado pelo autor.

Por fim, a análise da variação da vazão na saída do dreno e da carga hidráulica do poço de monitoramento PM-02 aponta para oscilações muito similares nas curvas, indicando a existência de relação entre as mesmas, conforme demonstrado na Figura 18.

Figura 18 – Monitoramento da vazão na saída do dreno e a carga hidráulica do poço de Monitoramento PM-02



Fonte: elaborado pelo autor.

As comparações realizadas entre as vazões na saída do dreno e as cargas hidráulicas dos poços de monitoramento mostraram certo grau de similaridade entre as curvas. Para confirmar a correlação entre as variações de vazões e as cargas hidráulicas medidas, procedeu-se a análise de correlação entre os dados, considerando, para tanto, dados coletados no mesmo dia, bem como em dias subsequentes. As próprias curvas plotadas já apontam para os conjuntos de dados que apresentam maiores correlações,

contudo, buscou-se, também, verificar quais pares de dados apresentaram melhores correlações.

Como já era de se esperar, considerando a análise dos gráficos, o conjunto de dados de carga hidráulica que apresentou a maior correlação com a vazão na saída do dreno foi aquele do poço de monitoramento PM-02. Considerando a vazão e a carga hidráulica (média) do mesmo dia, o coeficiente de correlação de Pearson foi positivo igual a 0,78. No caso da correlação entre a carga hidráulica do PM-01S e a vazão na saída do dreno, o maior coeficiente de correlação foi de 0,73, considerando os dados da vazão do dia e a média da carga hidráulica do sétimo dia subsequente. Por fim, para o PM-01R, 0,64 foi o maior coeficiente de correlação verificado, para o qual foram considerados os dados de vazão do dia e a média da carga hidráulica do oitavo dia subsequente. A Tabela 11 apresenta os resultados para a análise de correlação entre vazão na saída do dreno e da carga hidráulica dos poços de monitoramento PM-01R, PM-01S e PM-02.

Tabela 11 – Análise da correlação da vazão na saída do dreno e da carga hidráulica dos poços de monitoramento PM-01R, PM-01S e PM-02.

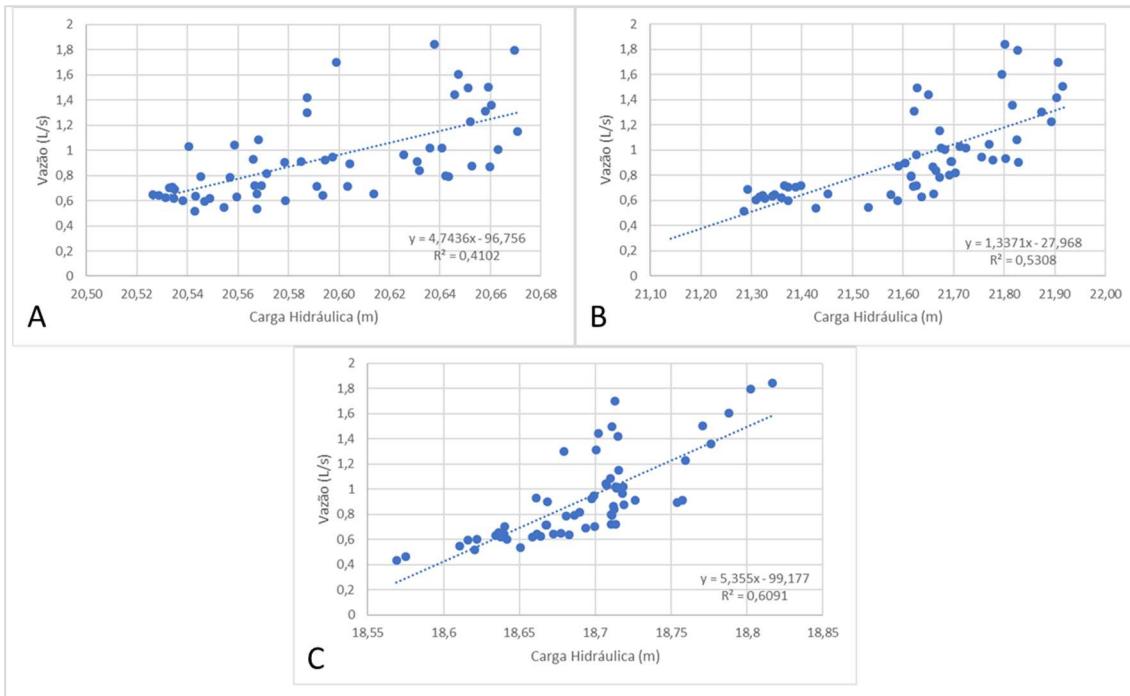
Vazão saída do dreno	Carga Hidráulica	Coeficiente de Correlação (r)		
		PM-01R	PM-01S	PM-02
Medida no dia	Média do dia	0,49	0,57	0,78
Medida no dia	Média do dia subsequente	0,57	0,65	0,73
Medida no dia	Média do 2º dia subsequente	0,57	0,69	0,73
Medida no dia	Média do 3º dia subsequente	0,53	0,71	0,76
Medida no dia	Média do 4º dia subsequente	0,51	0,71	0,72
Medida no dia	Média do 5º dia subsequente	0,51	0,71	0,68
Medida no dia	Média do 6º dia subsequente	0,57	0,72	0,66
Medida no dia	Média do 7º dia subsequente	0,63	0,73	0,64
Medida no dia	Média do 8º dia subsequente	0,64	0,70	0,60
Medida no dia	Média do 9º dia subsequente	0,62	0,68	0,62
Medida no dia	Média do 10º dia subsequente	0,61	0,66	0,64

Nota: todas as correlações avaliadas são significativas ($p < 0,01$).

Fonte: elaborado pelo autor.

A dispersão dos pontos referente às maiores correlações verificadas entre vazão da saída do dreno e cargas hidráulicas dos poços de monitoramento PM-01R, PM-01S e PM-02 podem ser verificadas na Figura 19.

Figura 19 - Dispersão dos pontos referente às maiores correlações verificadas entre a vazão da saída do dreno e a carga hidráulica dos poços de monitoramento PM-01R (A), PM-01S (B) e PM-02 (C)



Fonte: elaborado pelo autor.

6.3. Análise dos fluxos subterrâneos frente à qualidade da água

Os resultados de correlação sugerem que a vazão da saída do dreno é fortemente influenciada pela variação da carga hidráulica do aquífero avaliado pelos poços de monitoramento PM-02 e PM-01S, os quais possuem, também, uma forte correlação entre suas cargas hidráulicas. A variação da carga hidráulica do aquífero monitorado pelo PM-01R, por sua vez, também influencia a vazão da saída do dreno, contudo sua correlação não é tão forte quanto dos demais aquíferos analisados.

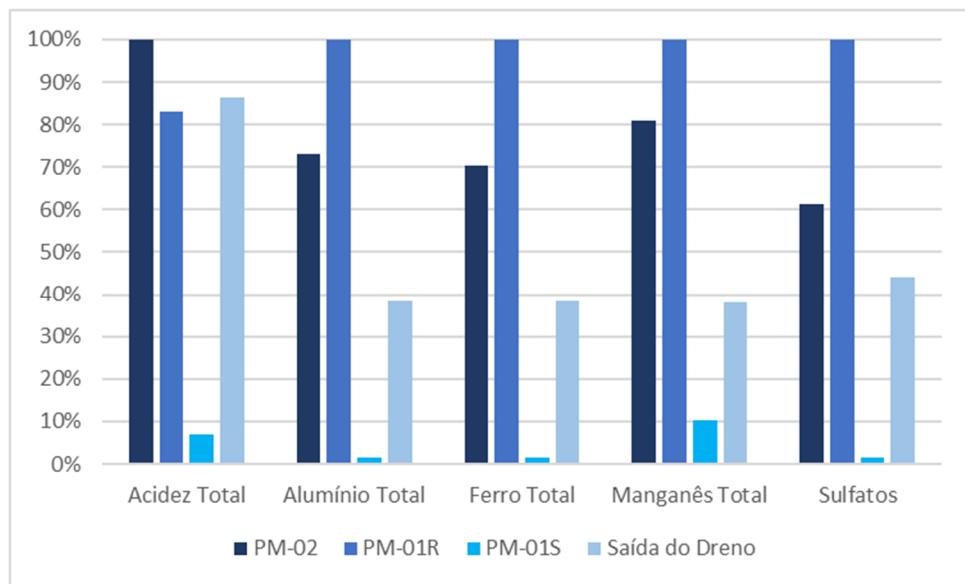
Contudo, ao efetuar uma análise qualitativa da média da concentração das últimas três amostras de água coletadas nos poços de monitoramento PM-01R, PM-01S, PM-02 e saída do dreno, é possível verificar que, de modo geral, o PM-01R é aquele que apresenta maiores concentrações dos parâmetros avaliados (acidez total, ferro total, alumínio total, manganês total e sulfatos). Considerando a maior concentração média verificada para determinado parâmetro como 100%, efetuou-se uma relação da concentração desse ponto com aquelas dos demais pontos de amostragem. Dessa forma,

verifica-se que, na sequência, em ordem decrescente, o PM-02 é o ponto que tem a segunda maior concentração dos parâmetros avaliados, seguido pela saída do dreno e, por último, o PM-01S, o qual possui baixas concentrações (Figura 20).

Dessa forma, considerando que os aquíferos analisados nos poços de monitoramento PM-01S e PM-02 estão interconectados e que o fluxo da água subterrânea possui sentido PM-01S para PM-02, pode-se afirmar que a água subterrânea que está abaixo da pilha de rejeitos, de qualidade superior, em algum momento acaba sendo carregada pelos constituintes dos rejeitos, sendo que isso pode ocorrer tanto pelo contato direto com o rejeito ou mesmo por meio da mistura de água com concentrações superiores desses constituintes.

Considerando uma possível recarga do lençol freático da pilha de rejeitos na área do poço multinível PM-01, por mais que a água subterrânea do PM-01S apresente qualidade superior, ao ascender para o interior da pilha, este fluxo será carregado quimicamente pelos constituintes dos rejeitos da mineração por simples mistura com o aquífero superior ou mesmo pela dissolução desses compostos em virtude do contato direto da água do aquífero subjacente com o rejeito.

Figura 20 – Análise da concentração média dos parâmetros analisados nas amostras de água dos poços de monitoramento PM-01R, PM-01S, PM-02 e saída do dreno



Fonte: elaborado pelo autor.

7. CONCLUSÕES

Os impactos ambientais dos rejeitos de mineração são objeto de diversos estudos tanto no Brasil quanto no exterior. O gerenciamento adequado dos rejeitos é de extrema importância para que a mineração consiga manter níveis ambientalmente sustentáveis, que vem se tornando cada vez mais rígidos nas últimas décadas.

Neste estudo, buscou-se analisar a dinâmica hidrogeológica de um depósito de rejeito de mineração que já teve suas atividades encerradas, por meio da avaliação da relação entre as variações dos níveis de água em poços de monitoramento, vazão coletada por dreno profundo, precipitação e qualidade da água.

Os resultados da avaliação da variação do nível d'água nos poços de monitoramento mostraram que a oscilação do aquífero situado abaixo do depósito de rejeitos possui amplitude maior que aquela verificada nos aquíferos do PM-01R e PM-02. A variação do nível de água do aquífero suspenso da pilha apresentou tendência de redução. Contudo, após período de chuvas intensas, foi possível verificar um leve aumento do nível da água, indicando a existência de possíveis recargas provenientes do lençol freático regional (leques aluviais), fato este que pode ser inferido, uma vez que a carga hidráulica do poço de monitoramento PM-01S é superior à do PM-01R.

Estudo desenvolvido por Souza (2012) mostrou que a infiltração da água da chuva em depósito de rejeito dotado de cobertura seca similar ao implantado no depósito em estudo é praticamente desprezível (0,4%), corroborando com a tese de que o lençol freático regional é o responsável pela recarga do lençol do depósito de rejeitos.

Ainda com relação ao lençol freático da pilha de rejeitos, a ausência de um sistema de drenagem no interior da pilha, conforme requisito da ABNT NBR 13029 (2017) e indicado por Sanchez (2002), dificultará o rebaixamento total do nível da água.

Por mais que os aquíferos dos poços de monitoramento PM-01S e PM-02 possuam diferenças de carga hidráulica que variaram de 2,56 m a 3,23 m ao longo do período monitorado, os resultados indicaram que ambos possuem interligação, sendo que o fluxo subterrâneo tem sentido PM-01S para PM-02.

Quanto à vazão da saída do dreno, os resultados mostraram que a variação da mesma está relacionada às precipitações, sendo que chuvas acumuladas ao longo de 4

dias serão verificadas no quinto dia subsequente. Em relação aos aquíferos monitorados, verificou-se que aqueles onde se situa o PM-01S e, principalmente, o PM-02 estão fortemente correlacionados à vazão da saída do dreno. A correlação entre a variação da carga hidráulica do poço de monitoramento PM-01R e a vazão da saída do dreno também se mostrou boa, porém inferior aos demais poços.

Contudo, ao analisar a qualidade da água dos pontos monitorados, é possível verificar que o poço de monitoramento PM-01S possui a melhor qualidade, seguido pela saída do dreno, pelo PM-02 e PM-01R. Dessa forma, por mais que os aquíferos monitorados pelo PM-01S e PM-02 estejam interconectados, sendo que o fluxo subterrâneo flui do primeiro para o segundo, a qualidade da água do PM-02 tem significativa redução, provavelmente por que a água do lençol freático do depósito de rejeitos tem contato com a água do substrato, reduzindo a qualidade do mesmo, impactando, consequentemente, a qualidade da água monitorada nesse poço e na saída do dreno.

As análises de correlação da vazão da saída do dreno e precipitação, mostraram que as chuvas acumuladas em 4 dias e a vazão do quinto dia subsequente apresentaram o maior valor absoluto, 0,61. Enquanto a correlação das cargas hidráulicas dos poços de monitoramento PM-02, PM-01S e PM-01 e vazão da saída do dreno foram equivalentes a 0,78, 0,73 e 0,64, respectivamente.

No que diz respeito à continuidade do monitoramento da dinâmica hidrogeológica do depósito de rejeitos da mineração, por se tratar de uma área de aproximadamente 60 ha, a instalação de novos poços de monitoramento é de fundamental importância para a compreensão da dinâmica hidrogeológica do depósito em toda sua extensão, bem como do impacto do lençol freático regional na recarga do aquífero do depósito de rejeitos.

Quanto à flutuação do nível dos aquíferos frente à precipitação, em especial do lençol freático do depósito de rejeitos, para confirmar se as tendências verificadas neste estudo se perpetuam no médio e longo prazo, bem como a quantificação de eventuais recargas, faz-se necessário dados de um período de monitoramento mais longo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAS. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. Estudos hidrogeológicos – Termos Hidrogeológicos Básicos. Disponível em: <<https://www.abas.org/publicacoes/estudos-hidrogeologicos>>. Acesso em: 11 de abril de 2020.
- ABNT NBR 13028, de 14 de Novembro de 2017. Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). Mineração – Elaboração e apresentação de projetos de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 13029, de 24 de Julho de 2017. Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). Mineração – Elaboração e apresentação de projetos de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 13403, de 31 de julho de 1995. Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). Medição de vazão em efluentes líquidos e corpos receptores – escoamento livre. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 15495-1, de 18 de junho de 2007. Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados Parte 1: Projeto e construção. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ADIANSYAH et. al. A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. Journal of Cleaner Production Volume 108, Part A, 1 December 2015, Pages 1050-1062.
- ALVARES, C. A. et. al. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 22, No. 6, 711–728, 2013.
- ARAÚJO, A. R. M. Desenvolvimento e calibração de um pluviógrafo. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Trabalho de Conclusão de Curso, 2017.
- ARAÚJO, C. B. (2006). Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 133p.

AUSTRALIAN GOVERNMENT. Tailings Management – Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry. Setembro/2016.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas / Coord. Geral Osvaldo Barbosa Ferreira Filho; Equipe Técnica por Marina Dalla Costa et al.; – Brasília: ANM, 2019. 34 p.: il.

CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Dados dos pluviômetros automáticos, 2020. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br>>. Acesso em: 04 de abril de 2020.

COLLISCHON, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. 2^a ed. Porto Alegre: ABRH, 2015.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. Introduzindo Hidrologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. Disponível em: <https://ctec.ufal.br/professor/crfj/Pos/Hidrologia/apostila_Completa_2008.pdf>. Acesso em: 04 de abril de 2020.

CPRM. Serviço Geológico do brasil. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) - Mapa Hidrogeológico do Brasil. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>>. Acesso em: 11 de abril de 2020.

EPAGRI/CIRAM. Empresa de Pesquisa Agropecuária e de Extensão Rural de Santa Catarina S.A. / Centro Integrado de Informações de Recursos Ambientais de Santa Catarina. Climatologia das Chuvas. Disponível em: <http://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=141&Itemid=363>. Acesso em: 11 de maio de 2020.

FERNANDES, G. W. et al. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. Natureza & Conservação. Volume 14, Issue 2, July–December 2016, Pages 35-45.

GALHARDI, J. A.; BONOTTO, D. M. Hydrogeochemical features of surface water and groundwater contaminated with acid mine drainage (AMD) in coal mining areas: a case study in southern Brazil. Environmental Science and Pollution Research volume 23, pages18911–18927(2016)

GALVÃO, J. L. B. et al. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. *Journal of Cleaner Production*. Volume 200, 2018, Páginas 412-422.

GÓMEZ-GONZÁLEZ, M. A. et al. Spread and partitioning of arsenic in soils from a mine waste site in Madrid province (Spain) *Sci. Total Environ.*, 500–501 (2014), pp. 23-33.

HOELZEL. M.; MIZUSAKI, A. M. P. Interconectividade de aquíferos e os efeitos da drenagem ácida de mina na qualidade das águas da Bacia Carbonífera de Santa Catarina (SC). *Revista Geociências*, v. 38, n. 4, p. 999 - 1015, 2019.

IBRAM (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO). Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração; organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2016.

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Normais climatológicas referente aos anos de 1981 a 2010. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 28 de abril de 2020.

KREBS, A.S.J. Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do Rio Araranguá, SC. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

KREBS, A. S. J.; POSSA, M. V. O papel da hidrogeologia como instrumento de gestão ambiental na mineração do carvão. In: SOARES, P. S. M.; SANTOS, M. D. C.; POSSA, M. V. Carvão Brasileiro: tecnologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008, p. 109 - 127.

MACHADO, J.L.F. Mapa Hidrogeológico do Estado de Santa Catarina. Porto Alegre: CPRM, 2013. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/11594>>. Acesso em: 11 de abril de 2020.

MINING ASSOCIATION OF CANADA (MAC). A Guide to the Management of Tailings Facilities. Third Edition. Canadá. Outubro, 2017.

MODOI, O. C. et al. Environmental risks due to heavy metal pollution of water resulted from mining wastes in NW Romania. *Environmental Engineering and Management Journal*. Vol. 13. No 9. September, 2014.

MONSANO, et. al. Calibração de pluviômetros de báscula: metodologia para análise e correção dos dados em campo. XV Safety, Health and Environment World Congress. Porto, Portugal, 2015.

PORTESES, A. M. C. Avaliação da disposição de rejeitos de minérios de ferro nas consistências polpa e torta. (Dissertação). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013

SANCHES, L. E. Manejo de residuos sólidos en mineria. In: Curso Internacional de aspectos geológicos de protección ambiental, 2., 2000, Campinas. Notas de clases Montevideo. Montevideo: UNESCO, 2002. p 255-256.

SANTOS, J. P. Estudos Hidrogeológicos para o Abastecimento de Água da Cidade de Laguna – SC. São Paulo: IPT;CASAN, 1975. (Relatório 8002).

SILVA et. al. Gestão de resíduos industriais: um estudo do aproveitamento de rejeitos da mineração. Anais do IX Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe (2017). ISSN 2447-0635

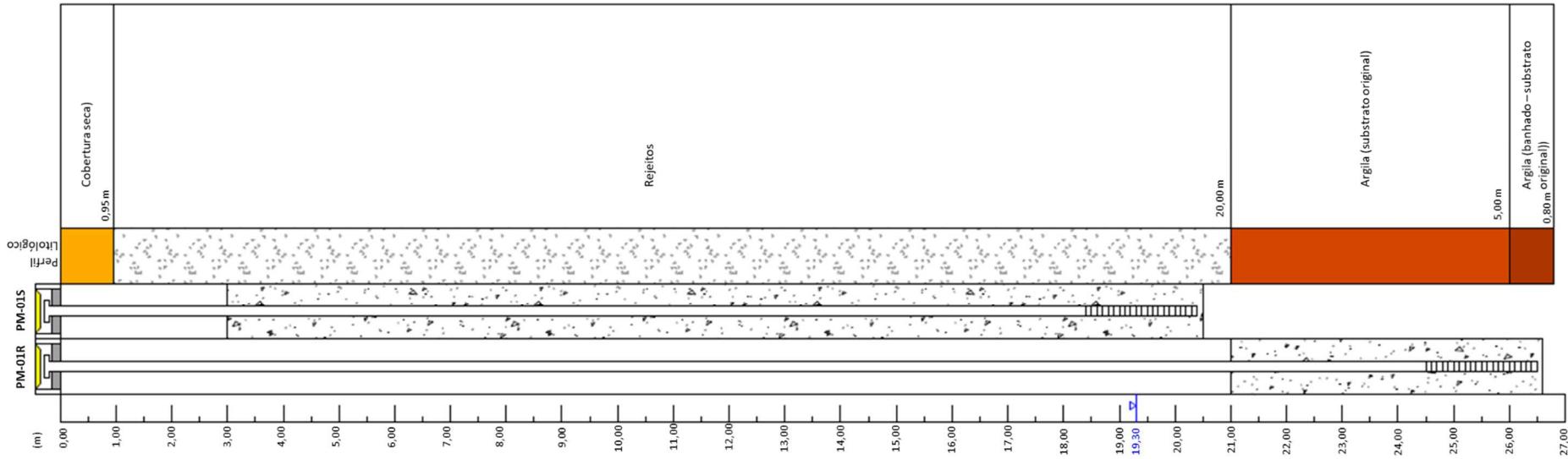
SEKLAOUI, M. et. al. Environmental assessment of mining industry solid pollution in the mercurial district of Azzaba, northeast Algeria. Environmental Monitoring and Assessment. Volume 188, Article number: 621 (2016).

VERGILIO, C. S. et. al. Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). Scientific Reports volume 10, Article number: 5936 (2020).

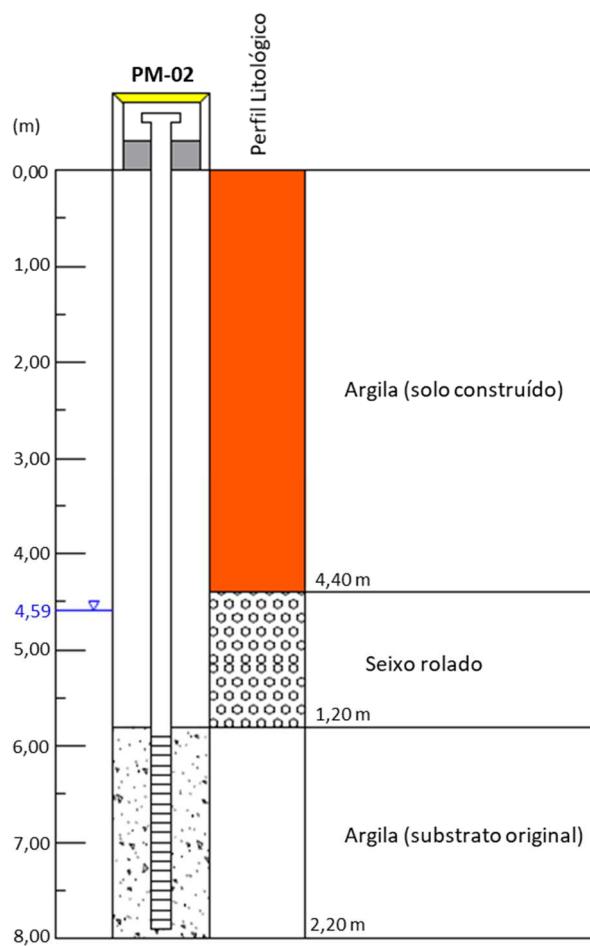
VAN ESSEN INSTRUMENTS. Product Manual – Diver. Fevereiro de 2016. Disponível em: <<https://www.vanessen.com/images/PDFs/Diver-ProductManual-en.pdf>>. Acesso em: 06 de abril de 2020.

ANEXOS

ANEXO 01 – Perfil Litológico-Construtivo dos poços de monitoramento PM-01R e PM-01S



ANEXO 02 – Perfil Litológico do poço de monitoramento PM-02



ANEXO 03 – Dreno Profundo

