

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**



**INTERCONNECTIVIDADE DE AQUÍFEROS E OS EFEITOS DA
DRENAGEM ÁCIDA DE MINA NA QUALIDADE DAS ÁGUAS DA
BACIA CARBONÍFERA DE SANTA CATARINA (SC)**

MARLON HOELZEL

Orientadora:

Profa. Dra. Ana Maria Pimentel Mizusaki

**Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do
título de Mestre em Geociências.**

Porto Alegre, 2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**INTERCONNECTIVIDADE DE AQUÍFEROS E OS EFEITOS DA DRENAGEM ÁCIDA
DE MINA NA QUALIDADE DAS ÁGUAS DA BACIA CARBONÍFERA DE SANTA
CATARINA (SC)**

MARLON HOELZEL

ORIENTADORA: Profa. Dra. Ana Maria Pimentel Mizusaki

COMISSÃO EXAMINADORA:

Dr. Cássio Roberto da Silva – CPRM

Dr. Diogo Rodrigues Silva – CPRM

Dra. Dione Macedo – MME

Dissertação de Mestrado apresentada
como requisito parcial para obtenção
do título de Mestre em Geociências.

Porto Alegre, 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Hoelzel, Marlon
INTERCONECTIVIDADE DE AQUIFEROS E OS EFEITOS DA
DRENAGEM ÁCIDA DE MINA NA QUALIDADE DAS ÁGUAS DA
BACIA CARBONÍFERA DE SANTA CATARINA (SC) / Marlon
Hoelzel. -- 2018.
63 f.
Orientadora: Ana Maria Pimentel Mizusaki.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências,
Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto
Alegre, BR-RS, 2018.

1. hidroquímica. 2. isótopos estáveis. 3. água
subterrânea. 4. drenagem ácida de mina. I. Mizusaki,
Ana Maria Pimentel, orient. II. Título.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Araranguá, na região sul do Estado de Santa Catarina, destacando-se a área de estudo formada pelas Sub-bacias dos rios Mãe Luzia, Sangão e dos Porcos (modificado de IBGE, 2016 – Datum: SIRGAS2000) 03
- Figura 2 – A). Observar as pilhas de rejeito com intensa geração de drenagem ácida (município de Treviso; 22J 650057/6843237; CPRM/2017); B) depósito de rejeitos da mineração do carvão destacando-se a abundante presença de sulfetos (município de Criciúma ; 22J 653809/6823121; CPRM/2011); C) drenagem superficial impactada pela drenagem ácida de mina, com intensa precipitação de hidróxido de ferro (município de Treviso; 22J 649685/6843915; CPRM/2017); D) boca de mina abandonada com surgência permanente de drenagem ácida de mina (município de Siderópolis; 22J 655190/6833655; CPRM/2010) 05
- Figura 3 – A) Obra de recuperação ambiental na fase de reconstituição topográfica das pilhas de estéril da mineração a céu aberto (município de Treviso; 22J 650130/6844129; CPRM/2017); B) obra de recuperação ambiental na fase de cobertura de material argiloso sobre os rejeitos da mineração, com objetivo de isolar os minerais sulfetados e inibir a geração de drenagem ácida de mina (município de Siderópolis; 22J 654869/6833439; CPRM/2015); C) Área em processo de recuperação com cobertura argilosa dos eséreis da mineração a céu aberto (município de Siderópolis; 22J 652931/6835553; CPRM/2016). D) Área em processo de recuperação ambiental após a fase de revegetação (município de Siderópolis; 22J 652931/6835553; CPRM/2016) 06
- Figura 4 – A) Medição de vazão com equipamento Flow Tracker no ponto AR76 – Rio Sangão (município de Forquilha; 22J 653603/6818053; CPRM, 2016); B) medição de vazão com equipamento M9 do Sistema ADCP – Acoustic Doppler Current Profile no Ponto AR85 – Rio Mãe Luzia (município de Maracajá; 22J 652250/6810336; CPRM, 2016) 07
- Figura 5 – A) perfuração do poço de monitoramento PMAP05 (município de Siderópolis; 22J 654930/6833159; CPRM, 2015) B) detalhe do poço de monitoramento PMAP05 (município de Siderópolis; 22J 654930/6833159; CPRM, 2015); C) poço de monitoramento PMAP11 (município de Içara; 22J

666378/6814017; CPRM, 2016) D) detalhe da surgência de água subterrânea do poço de monitoramento PMAP11 (município de Içara; 22J 666378/6814017; CPRM, 2016)	08
Figura 06 – Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná (Milani <i>et al.</i> , 2007) com indicação do intervalo estratigráfico de interesse, representado pelas formações Rio Bonito e Palermo	10
Figura 7 - Mapa geológico e tectônico com localização dos pontos de amostragem de água superficial e água subterrânea da área de estudo (modificado de Krebs, 2004)	13
Figura 8 – A) Detalhe da amostragem de água subterrânea em poço de monitoramento pelo método de baixa vazão (município de Siderópolis; 22J 654930/6833159; CPRM, 2017); B) medição dos parâmetros de qualidade e amostragem de água superficial no Rio Mãe Luzia (município de Treviso; 22J 650496/6843484; CPRM, 2017)	19

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação de amostras de água superficial analisadas na Bacia Hidrográfica do Araranguá (ver figura 1). (*) processo de destilação em sistema fechado antes da análise	21
Quadro 02 – Relação de amostras de água subterrânea analisadas nos poços de monitoramento da Bacia Hidrográfica do Araranguá (ver Fig. 1). (*) processo de destilação em sistema fechado	22
Quadro 3 – Parâmetros utilizados e métodos analíticos	25

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE QUADROS

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Objetivos	02
1.2 Localização da Área de Estudo	02
1.3 Contexto da mineração do carvão	04
2. GEOLOGIA DA ÁREA	09
3. COMPARTIMENTAÇÃO HÍDRICA DA ÁREA	14
4. TRABALHOS ANTERIORES	16
5. METODOLOGIA	18
5.1. Amostragem de Água Superficial	20
5.2. Amostragem de Água Subterrânea	22
5.3. Análises Isotópicas – Métodos Analíticos	23
5.4. Análises Hidroquímicas – Métodos Analíticos	25
5.5. Tratamento dos dados obtidos	26
6. RESULTADOS OBTIDOS	26
6.1. Carta de Submissão do Artigo	27
6.2. Artigo	28
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	60

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e especialmente à dedicação e orientação da Prof. Dra. Ana Maria Pimentel Mizusaki.

Agradeço também a todos os colegas do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) que participam direta ou indiretamente do projeto de recuperação ambiental e do monitoramento dos recursos hídricos da Bacia Carbonífera de Santa Catarina, e que auxiliaram na obtenção dos dados para a elaboração deste estudo.

RESUMO

A mineração do carvão no sul de Santa Catarina se desenvolve há mais de um século e a falta de gerenciamento ambiental nos empreendimentos mineiros causou significativas alterações de qualidade nos recursos hídricos superficiais e subterrâneos da Bacia Hidrográfica do Araranguá. Além da alteração na qualidade das águas, fenômenos de abatimento de minas subterrâneas ocasionaram o fraturamento das camadas sobrejacentes, e permitiram a ampliação dos processos de circulação dos sistemas aquíferos com corpos hídricos superficiais. Como objetivo de melhorar o entendimento sobre os impactos na qualidade das águas e nas condições de fluxo subterrâneo, foram analisadas amostras das águas de 9 poços do Sistema Aquífero Rio Bonito, 4 poços do Sistema Aquífero de Leques Aluviais e 6 amostras de águas superficiais das mesmas microbacias onde estão instalados os poços. As análises hidroquímicas indicam uma predominância de águas bicarbonatadas cálcicas e sódicas, que quando em contato com a drenagem ácida de mina são transformadas em águas sulfatadas. Os valores isotópicos de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ das amostras evidencia semelhança com a composição isotópica das águas meteóricas, contribuindo com a hipótese da forte interação da água subterrânea com as águas freáticas e superficiais, que ocorre devido à tectônica rúptil que afeta as litologias gonduânicas, e é intensificada pela presença das minas de subsolo.

PALAVRAS CHAVES: hidroquímica, isótopos estáveis, água subterrânea, drenagem ácida de mina.

ABSTRACT

Coal mining in southern Santa Catarina has been developed over a century and the absence of environmental management in mining projects caused significant quality changes in the surface and underground waters of the Araranguá Basin. In addition to the change in water quality, collapses have occurred in underground mines which caused the fracturing of overlying layers and allowed the expansion of aquifer systems and its integration with surface waters circulation processes. In order to better understand the impacts on water quality and groundwater flow conditions, samples of 9 wells from Rio Bonito Aquifer System, 4 wells from Alluvial Fan Aquifer System and 6 from surface waters of the same catchments were analyzed. Hydrochemical analysis indicates a predominance of calcium and sodium bicarbonate waters which when in contact with acid mine drainage are transformed into sulfated waters. The isotopic values $\delta^{2}\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ shows similarity to isotopic composition of meteoric waters, contributing to the hypothesis of the strong interaction between groundwater, waters from water table and surface waters, which occurs due to the ruptured tectonics affecting gondwana lithologies and it is intensified by the presence of underground mines.

KEYWORDS: hydrochemistry, stable isotopes, groundwater, acid mine drainage.

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação consta de um capítulo introdutório, complementado por manuscrito submetido a periódico científico, que apresenta dados físico-químicos e isotópicos das águas da Bacia Carbonífera de Santa Catarina, que buscam auxiliar no entendimento dos processos de circulação e interação entre os diferentes níveis aquíferos com as águas de escoamento superficial.

1. INTRODUÇÃO

O carvão de origem fóssil foi uma das primeiras fontes de energia utilizada em escala industrial pelo homem, e foi responsável pela primeira Revolução Industrial iniciada no século XVIII. Com o passar dos anos, o carvão perdeu espaço na matriz energética mundial, porém as crises do petróleo da década de 70 reacenderam o interesse pelo carvão. Segundo informações da *International Energy Agency* – IEA, o carvão era responsável por 41% da produção mundial de energia elétrica em 2005, e em 2016 sofreu uma pequena redução para 38,4%, mas permaneceu bem acima dos 24,2% da energia hidroelétrica e 23,2% do gás natural (ANEEL, 2008).

No Brasil, o carvão possui participação de 1,97% na matriz de geração elétrica, e a produção e venda de carvão energético em 2016 foi de 6.347.681 toneladas (ABCM, 2018).

Segundo Belolli *et al.*, (2002), o carvão é parte fundamental da história da região sul do Estado de Santa Catarina e para alguns municípios constitui-se na essência da sua própria história. A Região Carbonífera de Santa Catarina possui grande importância econômica no setor energético e siderúrgico do país, e representa 63% do faturamento do setor. Suas reservas de carvão são de aproximadamente 3,2 bilhões de toneladas, e vem sendo exploradas desde o final do século XIX, e segundo estimativas do Governo Federal são suficientes para atender mais 500 anos de produção (ANEEL, 2008).

Na mesma proporção que o carvão trouxe desenvolvimento para as cidades do Sul Catarinense, ele também provocou diversos impactos ambientais, principalmente nos recursos hídricos (Amaral e Krebs, 2010). Um dos mais graves impactos ambientais originados pela mineração do carvão é a geração de drenagem ácida de mina, que se constitui de efluentes ácidos, com elevadas concentrações de sulfato e de metais pesados, que são gerados a partir da oxidação de minerais metálicos presentes no carvão, e causa a rápida degradação dos ambientes aquáticos e consequente diminuição da disponibilidade hídrica (Mello *et al.*, 2004).

São notáveis os avanços no conhecimento nas áreas de hidrogeologia e hidrologia devido à crescente importância dos recursos hídricos no Brasil e em todo o mundo. No entanto, falta uma maior integração entre as duas áreas, para que hidrogeólogos e hidrólogos possam desenvolver seus trabalhos técnicos de maneira otimizada e atingir resultados mais racionais e consistentes (Virgili e Vianna, 2000).

Na região de estudo, os impactos ambientais de mais de um século de mineração causaram intensa degradação dos recursos hídricos, que atingem três bacias hidrográficas (Bacia Hidrográfica do Urussanga, do Tubarão e do Araranguá), onde aproximadamente 1.200 km de rios e córregos estão impactados pela drenagem ácida de mina, e cerca de 6.000 hectares de áreas estão degradadas pela mineração a céu aberto ou com depósitos de rejeitos com altos teores de sulfetos metálicos (GTA, 2018).

1.1. Objetivos

Neste contexto de complexidade hidrogeológica e de degradação ambiental, o objetivo desta pesquisa é utilizar técnicas analíticas de isótopos estáveis de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$, conjuntamente com informações hidrogeoquímicas e hidrogeológicas para contribuir no entendimento dos fenômenos de circulação dos sistemas aquíferos e suas relações com as águas superficiais que drenam as áreas afetadas pela mineração do carvão.

1.2. Localização da Área de Estudo

A área objeto deste estudo está inserida na Região Carbonífera de Santa Catarina, localizada na região sul do Brasil, e abrange parcialmente as bacias hidrográficas dos rios Araranguá, do Tubarão, e integralmente a Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga.

Os dados analisados por este trabalho se restringem às áreas impactadas pela mineração do carvão que estão inseridas na Bacia Hidrográfica do Araranguá, as quais se limitam às sub-bacias dos rios dos Porcos, Sangão e Mãe Luzia, conforme figura 1.

A bacia Hidrográfica do Araranguá abrange total ou parcialmente, além do município de Criciúma, os municípios de Siderópolis, Treviso, Cocal do Sul, Içara, Nova Veneza, Forquilha, Maracajá, Araranguá, Arroio do Silva, Meleiro, Turvo, Ermo, Jacinto Machado, Morro Grande e Timbé do Sul, totalizando uma área de drenagem de 3.020 km² e comprimento dos rios e córregos chegam a 5.916 km (Krebs, 2004; Dantas *et. al.*, 2005), e os cursos d'água principais que compõem o seu sistema hídrico são os rios Amola Faca, Itoupava, Jundiá, Turvo, das Pedras, São Bento, dos Porcos, Sangão e Mãe Luzia.

Esta bacia hidrográfica faz parte do sistema da vertente atlântica, que drena parte da escarpa da Serra Geral e da planície costeira convergindo para o Oceano Atlântico (Dantas *et al.*,2005).

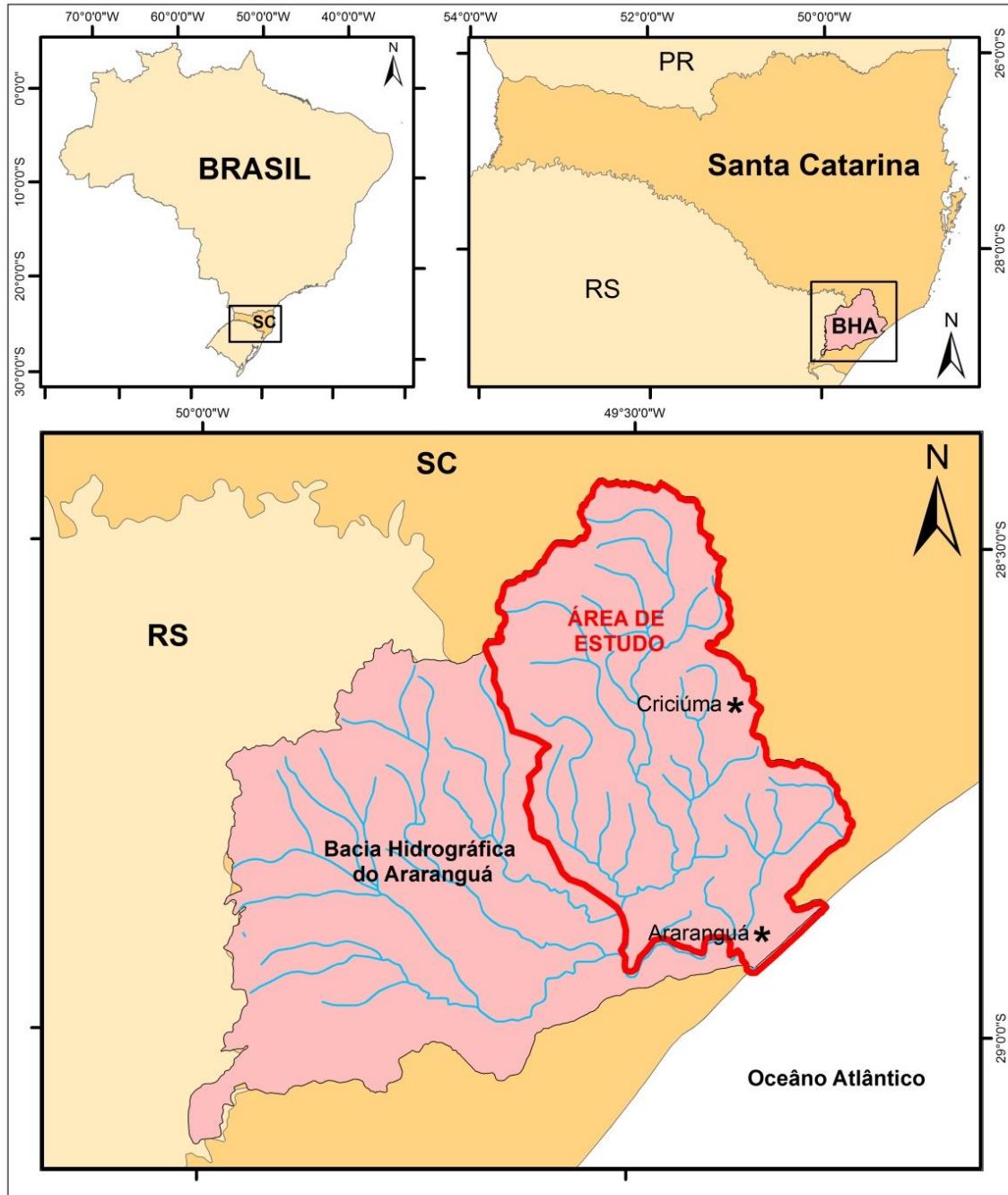


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Araranguá, na região sul do Estado de Santa Catarina, destacando-se a área de estudo formada pelas Sub-bacias dos rios Mãe Luzia, Sangão e dos Porcos (modificado de IBGE, 2016 –SIRGAS, 2000).

1.3. Contexto da Mineração do Carvão

As atividades carboníferas no sul de Santa Catarina tiveram início no final do século XIX, através de uma companhia britânica que explorava as minas e transportava o carvão até o porto de Laguna, pela ferrovia Teresa Cristina, inaugurada em 1885. Durante o aumento da demanda do carvão durante a 1ª Guerra Mundial, surgem novas empresas mineradoras, entre elas a Companhia Brasileira Carbonífera Araranguá (CBCA) que iniciou suas atividades em 1917. Durante as décadas de 30 e 40, o governo de Getúlio Vargas determinou a obrigatoriedade de uso do carvão nacional, e em 1946 criou a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Após a crise da década de 90, causada pela desregulamentação do setor, o carvão catarinense vem sendo utilizado na geração de energia termoelétrica, e 6 empresas carboníferas desenvolvem suas atividades na região (ABCM, 2018).

Ao longo destas décadas de mineração do carvão, os impactos ambientais afetaram grande parte dos recursos hídricos da região. Diversos fenômenos de colapso e abatimento de minas subterrâneas foram ocasionados pela presença de falhas geológicas e pelo rompimento de pilares de sustentação das minas em subsolo, gerando intenso fraturamento nas camadas subjacentes, permitindo assim a ampliação da interconexão dos sistemas aquíferos com corpos hídricos superficiais, causando significativa alteração no balanço hídrico e na qualidade das águas.

Esta degradação ambiental motivou o Ministério Público Federal a mover uma Ação Civil Pública (sentença nº 20.097, de 05.01.2000) que condenou solidariamente as empresas mineradoras e a União Federal a promoverem a recuperação ambiental dos seus passivos e dos recursos hídricos. Em 2008, a Ação de Cumprimento de Sentença, n. 2008.72.04.003517-1 imputou à União Federal o dever de recuperar as áreas degradadas de duas empresas falidas e insolventes, a Companhia Brasileira Carbonífera Araranguá – CBCA e Carbonífera Treviso S/A, que juntas possuem mais de 1.100 hectares de áreas degradadas pela mineração. Desde 2010, a recuperação ambiental vem sendo implementada nas áreas degradadas, e o principal objetivo é reestabelecer a função ecológica e social dos ambientes terrestres e promover a recuperação dos recursos hídricos da região (GTA, 2018).

Impactos Ambientais Decorrentes da Mineração do Carvão

Os impactos ambientais associados à mineração de carvão se relacionam a:

- (i) intensa alteração topográfica com disposição de pilhas de rejeitos resultante da utilização de *draglines* em lavras de superfície (Fig. 2A, B);
- (ii) intensa geração de drenagem ácida de mina causada pela oxidação de sulfetos presentes nas camadas adjacentes ao carvão (Fig. 2C);
- (iii) alteração do balanço hídrico de aquíferos causado pela interconectividade de águas superficiais com águas subterrâneas, resultante do abandono de aberturas de minas e colapso de pilares em minas subterrâneas (Fig. 2D).

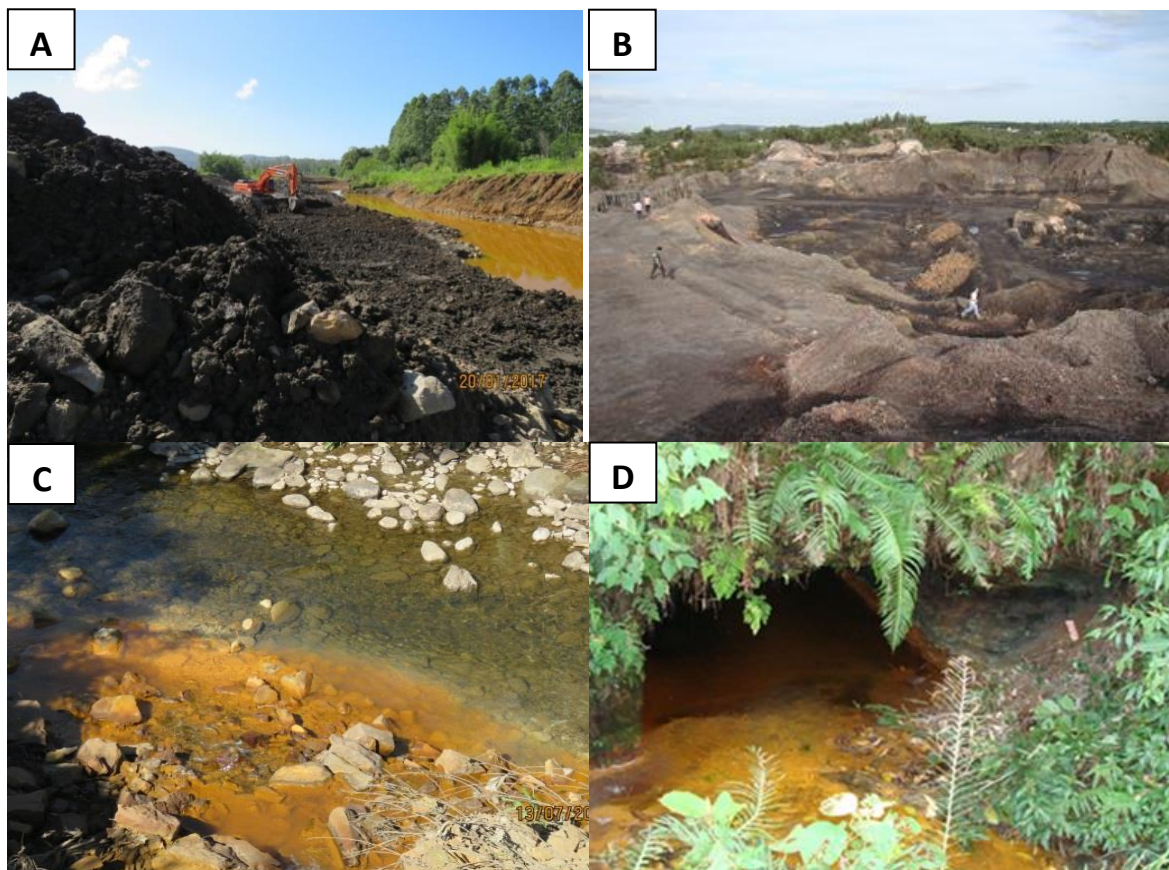


Figura 2 – A). Observar as pilhas de rejeito com intensa geração de drenagem ácida (município de Treviso; 22J 650057/6843237; CPRM/2017); B) depósito de rejeitos da mineração do carvão destacando-se a abundante presença de sulfetos (município de Criciúma ; 22J 653809/6823121; CPRM/2011); C) drenagem superficial impactada pela drenagem ácida de mina, com intensa precipitação de hidróxido de ferro (município de Treviso; 22J 649685/6843915; CPRM/2017); D) boca de mina abandonada com surgência permanente de drenagem ácida de mina (município de Siderópolis; 22J 655190/6833655; CPRM/2010).

A recuperação ambiental que vem sendo realizada nas áreas mineradas em superfície inclui:

- (i) a reconstituição da topografia natural ou nova conformação estável e remoção total dos rejeitos em áreas de preservação permanente (Fig. 3A);
- (ii) implantação de sistema de drenagem construído de modo a garantir a estabilidade e minimizar os processos erosivos;
- (iii) construção de uma camada de solo argiloso (Fig. 3B) para sustentar espécies vegetais da mata atlântica e isolar os rejeitos do ponto de vista hídrico, garantindo que as águas pluviais não entrem em contato com os sulfetos presentes no rejeito.

Uma área de preservação permanente em estágio de recuperação ambiental situada no município de Siderópolis (SC), pode ser vista nas figuras 3C e 3D.

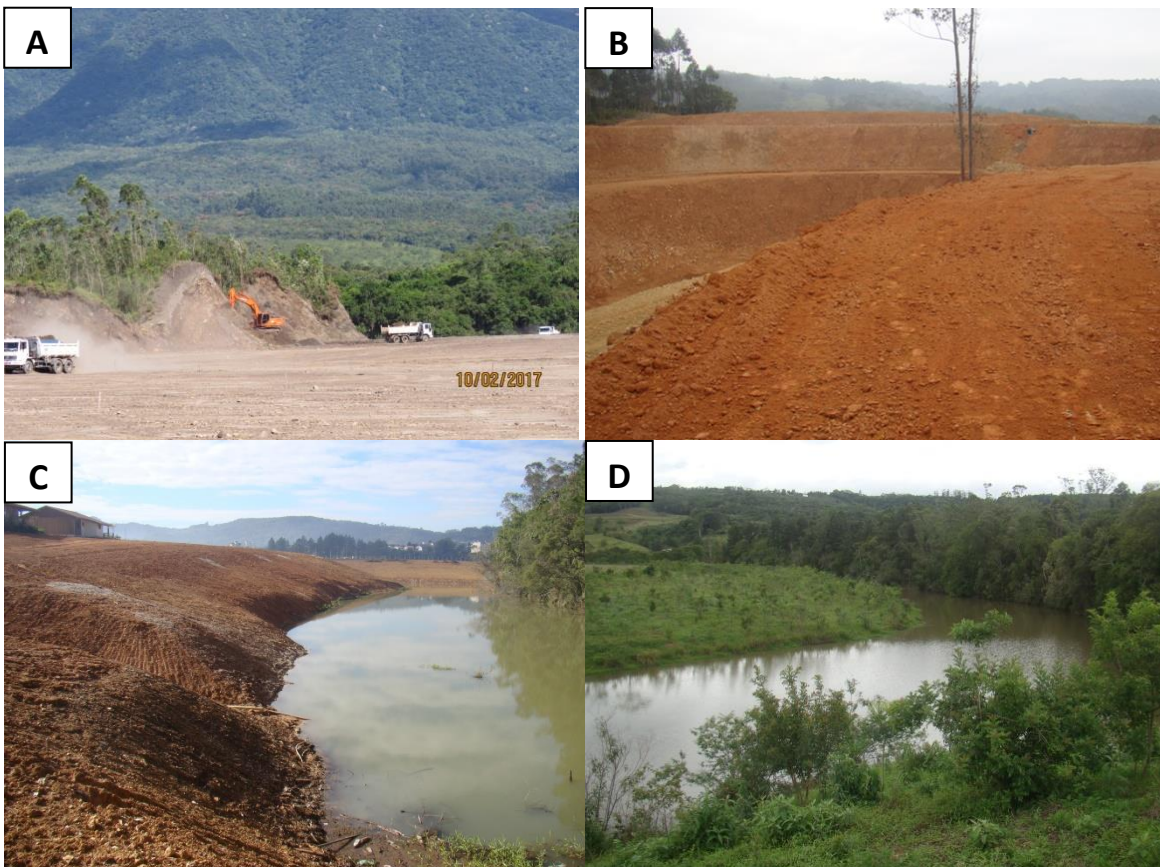


Figura 3 – A) Obra de recuperação ambiental na fase de reconstituição topográfica das pilhas de estéril da mineração a céu aberto (município de Treviso; 22J 650130/6844129; CPRM/2017); B) obra de recuperação ambiental na fase de cobertura de material argiloso sobre os rejeitos da mineração, com objetivo de isolar os minerais sulfetados e inibir a geração de drenagem ácida de mina (município de Siderópolis; 22J 654869/6833439; CPRM/2015); C) Área em processo de recuperação com cobertura argilosa dos eséreis da mineração a céu aberto (município de Siderópolis; 22J 652931/6835553; CPRM/2016). D) Área em processo de recuperação ambiental após a fase de revegetação (município de Siderópolis; 22J 652931/6835553; CPRM/2016).

A recuperação de áreas mineradas em subsolo se restringe a:

- (i) redução da vazão da drenagem ácida, através do tamponamento das bocas de mina abandonadas;
- (ii) preservação das drenagens naturais não contaminadas, através do desvio das drenagens das minas;
- (iii) redução da entrada de ar para o interior das minas.

As atividades do monitoramento ambiental que visam acompanhar a qualidade dos recursos hídricos frente aos processos de recuperação possuem periodicidade semestral e contemplam:

- (i) o monitoramento das águas superficiais, através de coleta e análise de amostras de água, acompanhado de medição de vazão para determinação da carga de poluição (Fig. 4A, B);
- (ii) o monitoramento das bocas de mina abandonadas com geração de drenagem ácida;
- (iii) o monitoramento das águas subterrâneas (Figs. 5A, B,C,D) em dois sistemas aquíferos presentes na região: Rio Bonito e Leques Aluviais.

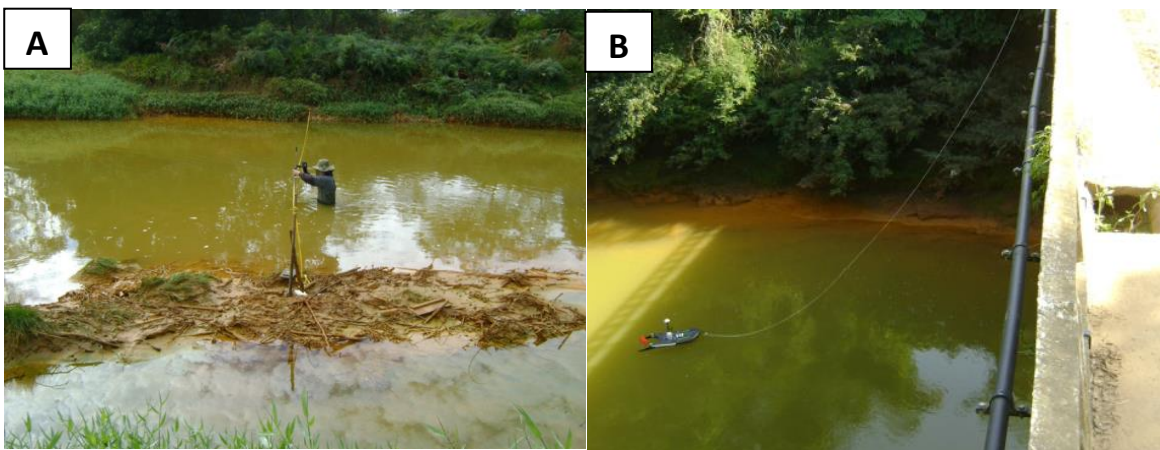


Figura 4 – A) Medição de vazão com equipamento Flow Tracker no ponto AR76 – Rio Sangão (município de Forquilha; 22J 653603/6818053; CPRM, 2016); B) medição de vazão com equipamento M9 do Sistema ADCP – Acoustic Doppler Current Profile no Ponto AR85 – Rio Mãe Luzia (município de Maracajá; 22J 652250/6810336; CPRM, 2016).

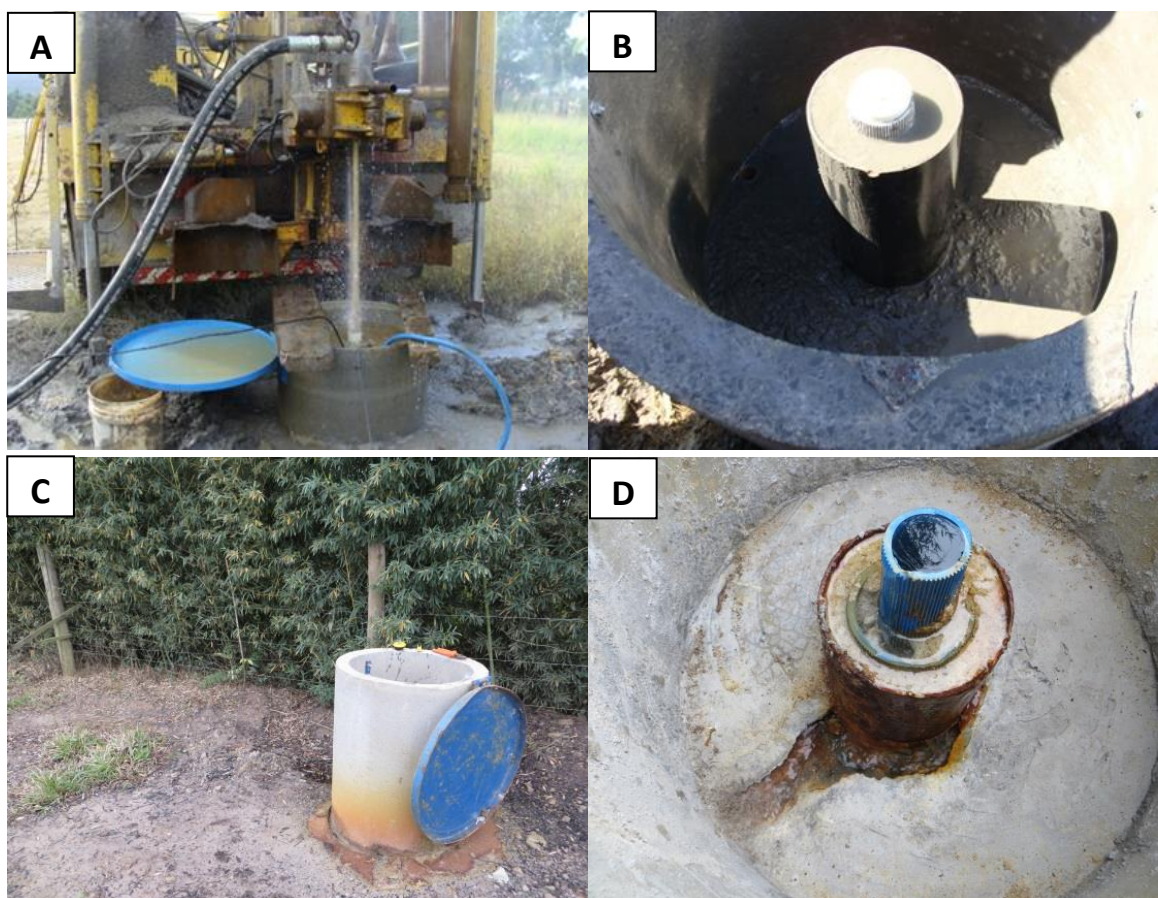


Figura 5 – A) perfuração do poço de monitoramento PMAP05 (município de Siderópolis; 22J 654930/6833159; CPRM, 2015) B) detalhe do poço de monitoramento PMAP05 (município de Siderópolis; 22J 654930/6833159; CPRM, 2015); C) poço de monitoramento PMAP11 (município de Içara; 22J 666378/6814017; CPRM, 2016) D) detalhe da surgência de água subterrânea do poço de monitoramento PMAP11 (município de Içara; 22J 666378/6814017; CPRM, 2016).

Nas atividades do monitoramento dos recursos hídricos são analisados os parâmetros: pH, Eh, condutividade, OD (Oxigênio disponível), temperatura, vazão, carga de acidez, alcalinidade, sulfato (SO_4), sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca), ferro (Fe), alumínio (Al), manganês (Mn), cromo (Cr), chumbo (Pb), arsênio (As), magnésio (Mg), cobre (Cu), cádmio (Cd) e mercúrio (Hg).

Em águas que drenam as áreas degradadas com rejeitos expostos é comum serem encontrados valores de pH entre 2,5 e 3,0, associados a valores altos de sulfato, Fe, Al e Mn.

2. GEOLOGIA DA ÁREA

Na área da Bacia Hidrográfica do Araranguá, são reconhecidas rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná, por vezes recobertas por sedimentos inconsolidados pertencentes aos depósitos de Leques Aluviais e da Planície Costeira. A Bacia do Paraná é uma bacia intraplaca paleozoica composta por um pacote vulcano-sedimentar com cerca de 7.000 metros de espessura, subdividido em supersequências de segunda ordem, com intervalo deposicional entre o Ordoviciano e o Cretáceo, definindo um registro estratigráfico de aproximadamente 400 Ma. As supersequências são delimitadas por superfícies de discordâncias inter-regionais e foram definidas por Milani *et al.* (1997) como: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo) (Fig. 6). As três primeiras sucessões sedimentares estão relacionadas a ciclos de variações do nível do mar e as demais sucessões correspondem a rochas sedimentares continentais com rochas ígneas associadas (Milani *et al.*, 2007).

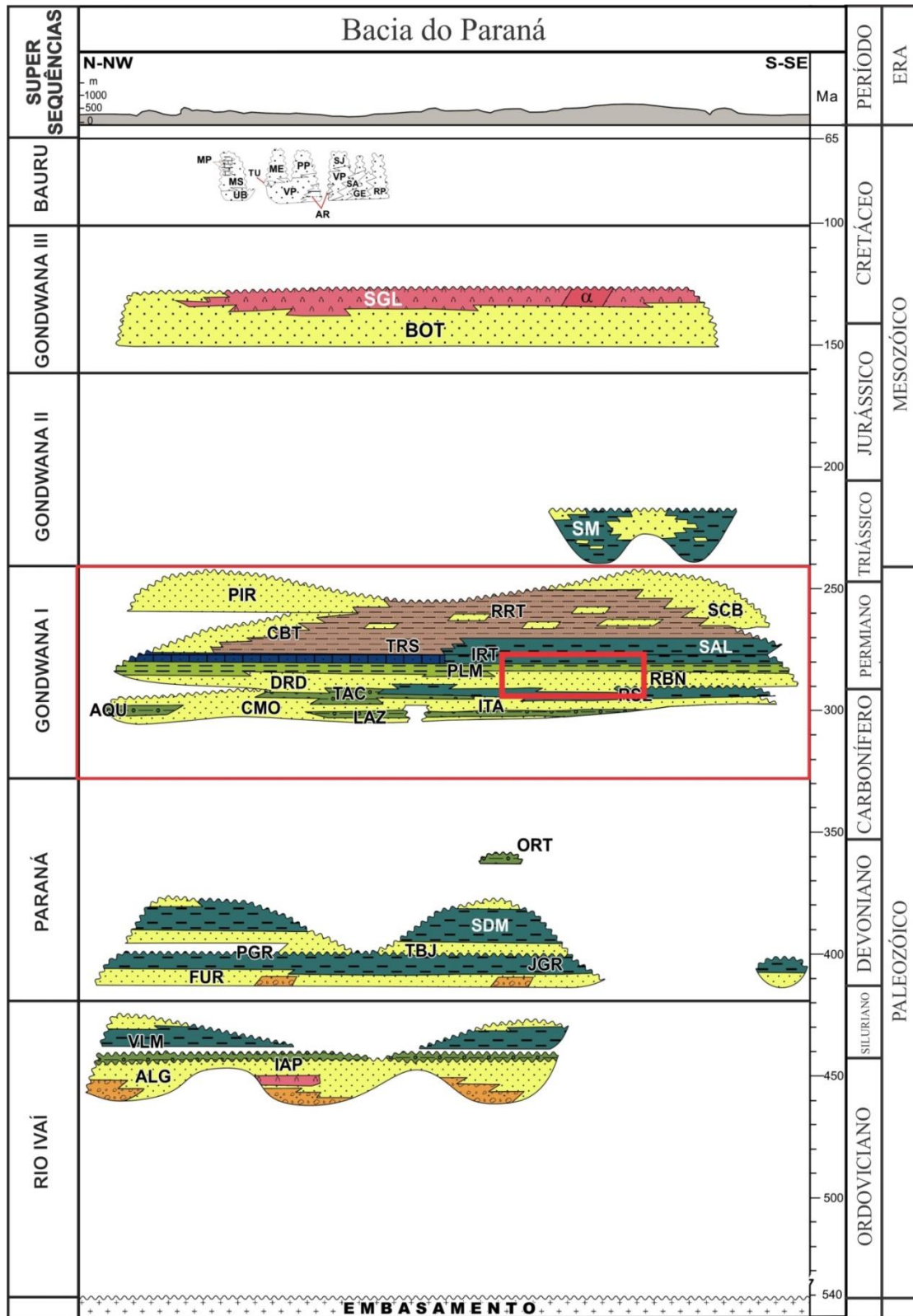


Figura 06 - Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná (Milani *et al.*, 2007) com indicação do intervalo estratigráfico de interesse, representado pelas formações Rio Bonito e Palermo.

As unidades litoestratigráficas associadas com a Bacia do Paraná presentes na área de estudo estão dispostas conforme mapa geológico da figura 7, e foram descritas por Krebs, (2004) como:

- Formação Rio do Sul - não aflora na área de estudo, mas é identificada em furos de sondagem. São rochas que pertencem à porção superior do Grupo Itararé e a espessura varia de 38 a 115 m, assim como uma grande variação faciológica, incluindo conglomerados, arenitos conglomeráticos, diamictitos, arenitos, ritmitos, varvitos, com presença de seixos-pingados, relacionados ao paleorelevo onde os sedimentos foram depositados, em ambiente glacial e periglacial.
- Formação Rio Bonito: esta formação possui extensa área aflorante na área de estudo e é subdividida em três membros, conforme proposto por Mühlmann *et al.* (1974). O Membro Triunfo corresponde a porção basal, sendo formado por arenitos e conglomerados cinza-claros e esbranquiçados, com intercalação de siltitos e folhelhos de cor cinza escuro, com espessuras que variam de 24 a 80 m. O Membro Paraguaçu corresponde a parte média da Formação Rio Bonito, e é formado por pacotes de folhelhos e siltitos cinza, intercalados com arenitos muito finos, com espessuras entre 22 a 46 m. O Membro Siderópolis corresponde ao topo da sequência da Formação Rio Bonito, e caracteriza-se por um espesso pacote de arenitos, com intercalações de siltitos, folhelhos carbonosos e carvão, e a espessura média é de 80 m, tendo sido medido até 168 m em furo de sonda. Ainda segundo Krebs (2004), esta inter-relação de fácies sugere a deposição em um sistema lagunar/deltaico, influenciados por canais fluviais e planícies de maré, com presença de cordões litorâneos.
- Formação Palermo: Esta unidade possui grande área de afloramento na área de estudo, e caracteriza-se por ritmitos com intercalação de camadas de siltitos e argilitos, com laminação plano-paralela, ondulada ou lenticular, com bioturbação e estruturas de fluidização. Apresenta espessuras da ordem de 92 m, e segundo o autor, foram depositados em ambiente marinho raso, com ação de ondas e microorganismos, que marca o início da transgressão marinha que afogou o ambiente deltaico/lagunar da Formação Rio Bonito.
- Formação Irati: caracteriza-se por folhelhos e siltitos de cor escura, intercalados com folhelhos pirobetuminosos e lentes de margas dolomíticas. Na região do estudo, a espessura deste pacote é de 40 m, e em diversos locais encontram-se

intrudidas por soleiras de rochas ígneas subvulcânicas. O ambiente de deposição é interpretado como marinho raso abaixo da ação das ondas.

- Formação Estrada Nova: são englobadas as formações Serra Alta e Teresina, conforme a “Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná” (Mühlmann, *et al.*, 1974). Estas unidades são constituídas por pelitos maciços ou com laminação plano-paralela incipiente, depositadas em ambiente marinho, e afloram em cotas entre 450 a 600 m.

- Formação Rio do Rastro: caracteriza-se por arenitos finos, intercalados por siltitos e argilitos, com geometria tabular ou sigmoidal, com espessuras da ordem de 200 m. Aflora em cotas a partir de 580 m, e sua gênese ocorreu em ambiente marinho raso com transição para depósitos de planície costeira e sedimentação fluvio-deltaica.

- Formação Botucatu: constituída por arenitos finos a médios, bem selecionados, com camadas de geometria tabular ou lenticular, com estratificação cruzada acanalada de grande porte, sugerindo ambiente de deposição por ação eólica, de dunas e interdunas. Afloram ao longo de toda a escarpa do planalto, e são capeadas pelas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral.

- Formação Serra Geral: caracteriza-se por uma sucessão de derrames de lava que acumulam uma espessura aproximada de 690 m, de composição predominantemente basáltica, com textura afanítica, e estrutura maciça e amigdalal. Também ocorrem em forma de soleiras e diques.

- Depósitos Cenozoicos – são as unidades quaternárias compostas pelos Depósitos Coluvionares, Depósitos Aluvionares, e Depósitos Flúvio-lagunares.

Importante também comentar que as rochas do embasamento cristalino não afloram na área de estudo, mas são identificadas em diversos furos de sondagem executados para a prospecção de carvão, e englobam granitóides tardi a pós-tectônicos (Krebs, 2004).

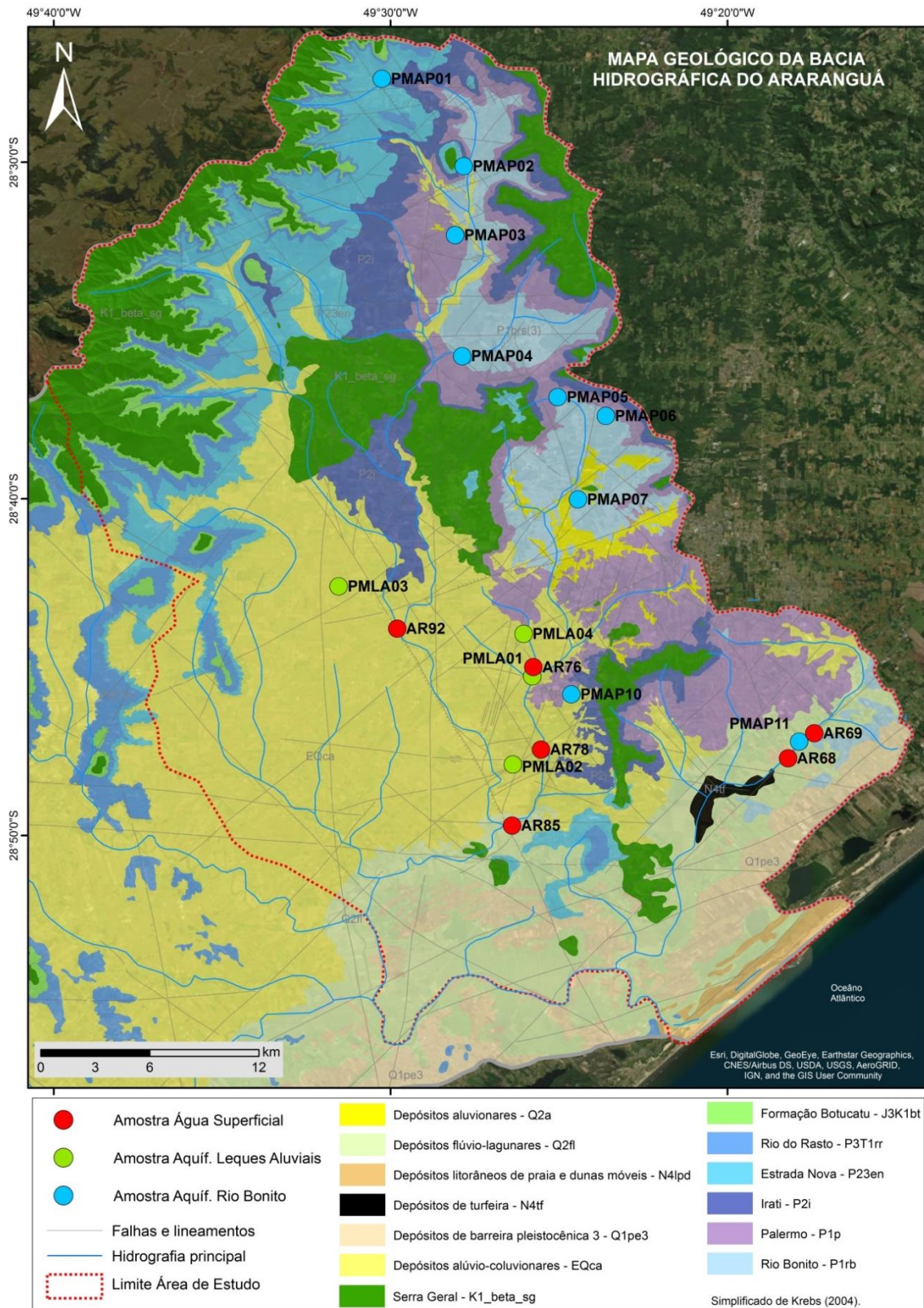


Figura 7 - Mapa geológico e tectônico com localização dos pontos de amostragem de água superficial e água subterrânea da área de estudo (modificado de Krebs, 2004).

3. COMPARTIMENTAÇÃO HÍDRICA DA ÁREA

Na área de estudo (Fig.1), os recursos hídricos afetados pela atividade carbonífera podem ser subdivididos em três compartimentos principais, que são as Águas Superficiais e as águas subterrâneas do Sistema Aquífero de Leques Aluviais, Sistema Aquífero Rio Bonito (Krebs, 2004), conforme descritos a seguir:

a. Águas superficiais

As águas superficiais presentes na área de estudo estão inseridas nas sub bacias dos rios Mãe Luzia, Sangão e dos Porcos, que se constituem afluentes da porção leste da Bacia Hidrográfica do Araranguá. A morfologia destes canais fluviais, durante o baixo curso, possui padrão meandrante e se desenvolve sobre a planície aluvial e flúvio lagunar. Em seu curso médio apresenta um padrão dendrítico com expressiva sedimentação aluvial. Já no seu alto curso a drenagem exibe um padrão retilíneo, com aumento do gradiente, mas ainda com importante sedimentação aluvial. Nestas sub bacias, a qualidade das águas superficiais está modificada pela mineração desde as suas nascentes, e possuem valores de pH ácidos podendo chegar a 2,5, com altas concentrações de ferro, alumínio, manganês e sulfato (Krebs, 2004).

b. Sistema Aquífero de Leques Aluviais

O Sistema Aquífero de Leques Aluviais possui sua gênese desde o Mioceno e se estende até os dias de hoje, e são materiais sedimentares inconsolidados com espessura, extensão e granulometria variada, formados por blocos, cascalhos, areias até lamas, transportados pela ação da gravidade e retrabalhados pela ação da água (Machado, 2013). Estes depósitos, segundo Krebs (2004) ocorrem de maneira contínua a partir da encosta inferior do planalto gonduânico ao longo de toda a parte norte, centro e oeste da bacia. A leste, sua ocorrência é limitada pelo curso do Rio Sangão, e ao sul encontram-se recobertos pelos depósitos da planície costeira. As espessuras variam de 5 m no limite leste, chegando até 40 m na planície aluvionar do Rio Mãe Luzia. O escoamento do fluxo das águas subterrâneas indica um sentido geral de N-NW para S-SW. Esta unidade se constitui de um sistema aquífero intergranular extenso, com regime de fluxo livre ou semi-

confinado, com nível estático próximo a superfície. Sua recarga se processa de maneira direta a partir da infiltração das águas de chuva incidentes sobre os sedimentos, e também durante os eventos de cheia dos rios da bacia. Os tipos hidroquímicos predominantes são águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, podendo ocorrer águas sulfatadas ou cloretadas sódicas, e ainda, em menor quantidade, bicarbonatadas sódicas. Naturalmente, possuem o pH levemente ácido, em torno de 5,5 e os valores de salinidade estão abaixo de 100 mg/L. Apresentam valores constantes de ferro acima de 0,3 mg/L, e podem conter gás sulfídrico nos horizontes com matéria orgânica. (Krebs, 2004).

c. Sistema Aquífero Rio Bonito

Esta unidade constitui-se de um aquífero com porosidade intergranular, com diferentes graus de potencialidade, devido às variações litológicas e deposicionais. Apresenta qualidade heterogênea devido à presença das camadas de carvão, e ocorre um incremento significativo de sólidos dissolvidos em áreas confinadas, devido ao grande tempo de residência. Em profundidades superiores a 500 m as águas podem apresentar salinidades superiores a 10.000 mg/L, podendo atingir até 60.000 mg/L. Na região carbonífera esta unidade possui extensa área de afloramento, e também ocorre confinada pelos siltitos da Formação Palermo. Na região de estudo, as águas deste sistema aquífero, quando não são afetadas pela mineração, são bicarbonatadas cálcicas, com pH levemente alcalino, e os sais dissolvidos variam entre 60 a 500 mg/L, com teores de ferro variando entre 0,05 até 1,4 mg/L. Já nas áreas afetadas pela mineração, a oxidação da pirita causa um incremento na quantidade do íon sulfato, transformando os tipos químicos bicarbonatados cálcicos em sulfatados cálcicos, com pH ácido que pode chegar até 3,1, permitindo que a salinidade chegue próximo a 6.000 mg/L, com valores de ferro que podem chegar até 700 mg/L (Machado, 2013).

4. TRABALHOS ANTERIORES

A drenagem ácida de minas é um tema de grande complexidade, visto que as suas características são influenciadas diretamente pela composição mineralógica dos rejeitos e das propriedades químicas da água (Souza, 2015). O processo de formação da drenagem ácida de mina envolve múltiplos fatores químicos e biológicos, que podem variar significativamente dependendo das condições ambientais, geológicas e climáticas (GARD Guide, 2004).

No Brasil, o tema tem sido amplamente estudado, especialmente nas áreas de ocorrência dos depósitos de carvão, situados na região sul do Brasil. Registra-se o trabalho de Campaner *et. al.* (2014), no norte do estado do Paraná, município de Figueira, que apresenta informações geoquímicas da influência da drenagem ácida de mina gerada pela presença de pirita nos rejeito das minas de carvão, sobre a qualidade das águas superficiais e subterrâneas da região. Neste trabalho foram analisadas amostras da drenagem ácida de mina com concentrações de sulfato entre 2.592 e 9.100 mg/L, valores de pH entre 3,2 e 4,6, além de altas concentrações de metais. As mesmas condições foram encontradas em amostras de águas subterrâneas com piezômetros instalados na área de influência das minas. Entretanto, o estudo indica que o impacto da drenagem ácida de mina não se propagou para toda a bacia hidrográfica, devido a presença de rochas carbonáticas na estratigrafia local, que desempenharam papel fundamental na neutralização daqueles efluentes ácidos. Devido a esta neutralização natural, o pH das águas superficiais foi elevado para a faixa de 7,2 e 7,5, e permitiu a atenuação dos contaminantes da drenagem ácida, exceto o sulfato.

Entre os trabalhos de maior relevância sobre a área de estudo, destaca-se Krebs (2004), que apresenta um estudo completo, com informações geológicas, hidrogeológicas, estruturais e hidroquímicas da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá (SC). O mapeamento geológico em escala 1:100.000 realizado pelo autor tem como base critérios litofaciológicos e permitiu a individualização do Membro Siderópolis da Formação Rio Bonito em três sequências estratigráficas, denominadas Sequência Superior (Areias transgressivas), Sequência Média (Barro Branco) e Sequência Inferior (Bonito). O mapeamento destaca também as extensas áreas de coberturas quaternárias formada pelos Depósitos de Leques Aluviais. Do ponto de vista hidrogeológico, são apresentadas 9 unidades aquíferas interpretadas juntamente com as informações geológico-estruturais.

Esta interpretação permitiu a identificação de áreas com maior possibilidade de circulação, interação e disponibilidade de água subterrânea.

Em trabalho sobre a caracterização hidroquímicas das águas do Aquífero Rio Bonito na Região da Bacia Carbonífera de Santa Catarina, Krebs & Gomes (2005) afirmam que as águas superficiais estão intimamente relacionadas às águas subterrâneas, de forma que qualquer interferência que se fizer sobre os recursos hídricos superficiais incidirá, mais cedo ou mais tarde, também nos recursos hídricos subterrâneos. As amostras de águas do Sistema Aquífero Rio Bonito foram classificadas como águas sulfatadas ou cloretadas sódicas; e em menor grau como águas sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas, e ainda algumas poucas ocorrências como águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e águas bicarbonatadas sódicas. Esta análise, segundo os autores, foi realizada em área, onde o fluxo das águas subterrâneas ocorre em um meio de grande complexidade estrutural, caracterizado pela presença de galerias de mina em subsolo e de falhas geológicas. Ainda segundo os autores, a recarga deste sistema aquífero é realizada em diversas áreas onde já existem atividades de lavra ou que estão cobertas por pilhas de rejeito piritoso. Em minas de subsolo, o estudo verificou a conexão vertical do aquífero freático com os intervalos aquíferos profundos (Rio Bonito), e a mistura destas águas resulta em tipos intermediários de composição cloretada-bicarbonatada-cálcico-sódica, enriquecidos com cloreto, sulfato, sódio, cálcio e magnésio. Os dados apresentados sugerem também que áreas não mineradas possuem grande similaridade geoquímica entre as águas subterrâneas e as águas superficiais.

Leão *at al.*, (2017) conduziu estudo na Região Carbonífera de Santa Catarina no qual utilizou traçadores para comprovar a conexão entre o sistema aquífero Rio Bonito e o sistema de drenagem superficial do complexo denominado Vila Funil. Por razão de o balanço hídrico (chuva x descarga pluvial) apontar um excedente de aproximadamente 20% de água no exutório do sistema, os autores injetaram um traçador em um poço tubular que atingiu a galeria da mina subterrânea, e após 5 dias este traçador foi identificado no monitoramento realizado em superfície. A conclusão aponta a existência de falhas geológicas de direção geral NS que proporcionaram a conexão do Sistema Aquífero Rio Bonito que se encontra confinado pelos siltitos da Formação Palermo, com uma condutividade hidráulica de 4,65 m/hora.

Aplicações de isótopos estáveis são trabalhos relativamente escassos na área de estudo. Goffermann (2013) utilizou estas técnicas na análise de qualidade e

disponibilidade de água no Sistema Aquífero Rio Bonito na região de São Gabriel, oeste do Estado do Rio Grande do Sul. A Formação Rio Bonito é a mesma unidade estratigráfica registrada na Bacia Carbonífera de Santa Catarina e assim pode ser utilizada de forma comparativa. O autor apresenta análises hidroquímicas que demonstram altas concentrações de sais em águas confinadas por aquíferos permianos, e as datações por isótopos de ^{14}C em duas amostras resultaram idades de recarga entre 5.400 A 11.300 anos, com valores de $\delta^2\text{H}$: -44,6 (‰) e $\delta^{18}\text{O}$: -8,59 (‰) e $\delta^2\text{H}$: -43,1 (‰) e de $\delta^{18}\text{O}$: -8,87 (‰), respectivamente.

Outro trabalho com utilização de isótopos estáveis de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ em conjunto com caracterização hidroquímica foi realizado por Antunes (2016) porém na Bacia Hidrográfica do Rio Almonda, no Distrito de Santarém, em Portugal. Foram analisadas 23 amostras de água subterrânea, que devido a presença sedimentos terciários carbonatados denominados Calcários de Santarém, apresentam tipos hidroquímicos predominantemente bicarbonatados. Os valores de $\delta^2\text{H}$ variaram de -18,7 a -30,1 ‰ e os valores de $\delta^{18}\text{O}$ variaram de -3,5 a -5,3 ‰, com valores médios em $\delta^2\text{H}$ igual a -25,4 ‰ e em $\delta^{18}\text{O}$ igual a -4,6 ‰, indicando que a recarga do aquífero seja, pelo menos em grande parte, realizada através das águas de precipitação, visto que os valores são coincidentes com a reta meteórica das águas superficiais Portugal.

5. METODOLOGIA

Uma etapa fundamental em qualquer investigação de águas subterrâneas é a definição e mapeamento das unidades aquíferas e confinantes (unidades hidroestratigráficas) na área a ser estudada. Com o delineamento destas unidades, fragmenta-se o arcabouço geológico em função de sua permeabilidade, procurando-se definir o sistema de fluxo (Machado, 2005).

Para a realização deste estudo foram utilizados dados de análises físico-químicas do monitoramento sistemático dos recursos hídricos da Bacia Carbonífera de Santa Catarina, executado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), segundo o plano elaborado pelo Grupo Técnico de Assessoramento à Execução da Sentença (GTA) conduzido pelo Ministério Público Federal. O objetivo do monitoramento é o acompanhamento da evolução da qualidade dos recursos hídricos frente às atividades de

recuperação ambiental. As informações estão disponíveis no 11º Relatório de Monitoramento de Indicadores Ambientais do GTA (2018) e possui resguardo da propriedade intelectual do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e do Sindicato da Indústria de Extração do Carvão do Estado de Santa Catarina (SIECESC).

Como complemento aos dados físico-químicos, foi realizado uma campanha de amostragem das águas para análises isotópicas de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e hidrogênio ($\delta^2\text{H}$), simultaneamente à coleta da campanha de monitoramento executada pelo Serviço Geológico do Brasil (Figs. 8 A, B).

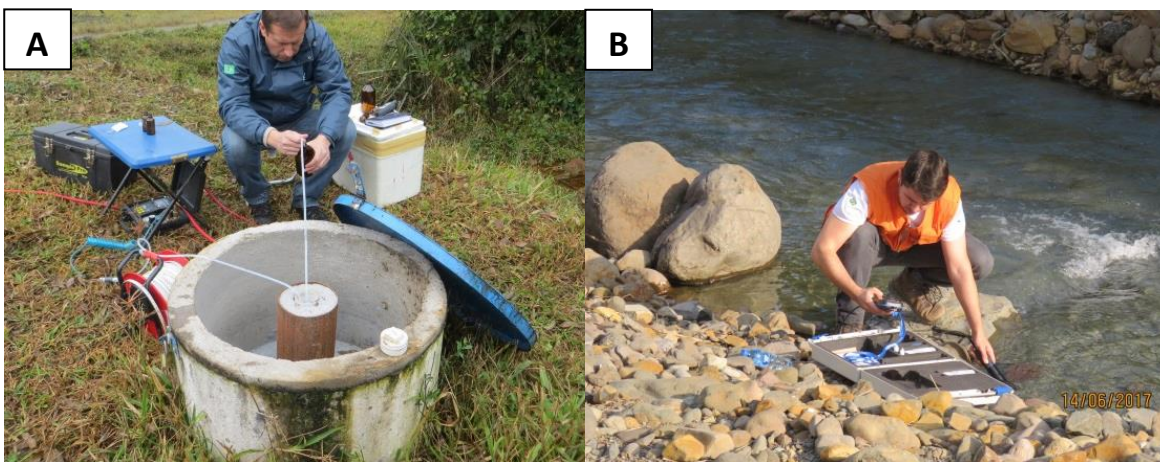


Figura 8 – A) Detalhe da amostragem de água subterrânea em poço de monitoramento pelo método de baixa vazão (município de Siderópolis; 22J 654930/6833159; CPRM, 2017); B) medição dos parâmetros de qualidade e amostragem de água superficial no Rio Mãe Luzia (município de Treviso; 22J 650496/6843484; CPRM, 2017).

Inicialmente esta pesquisa reuniu os dados de mapas geológico/estruturais, mapa hidrogeológico e informações hidroquímicas da região de estudo. A partir dos dados disponíveis, procedeu-se a seleção dos pontos de amostragem para análise isotópica das águas. A seleção teve por base a proximidade entre os pontos de amostragem de água superficial com os poços de monitoramento de água subterrânea, limitados à Bacia Hidrográfica do Araranguá.

Após a seleção dos pontos de amostragem e de posse das informações coletadas sobre a geologia, hidrogeologia, arcabouço estrutural, pontos de amostragem, hidrografia, áreas degradadas pela mineração a céu aberto e delimitação de galerias de minas subterrâneas, foi elaborado um banco de dados em ambiente SIG, com utilização do Software ARCGIS 10.1.

Paralelamente também foi realizado o levantamento bibliográfico sobre a utilização de isótopos estáveis como traçadores em água subterrânea e os aspectos geológicos e hidrogeológicos da área de estudo.

A amostragem da água superficial e subterrânea foi realizada durante o mês de junho de 2017 e foram selecionados 19 pontos de monitoramento, onde 9 amostras foram coletadas em poços de monitoramento instalados no Sistema Aquífero Rio Bonito, 4 amostras em poços instalados no Sistema Aquífero de Leques Aluviais e 6 amostras de águas superficiais provenientes dos rios e córregos da Bacia Hidrográfica do Araranguá, localizados nas mesmas microbacias onde se encontram os poços do Sistema Aquífero de Leques Aluviais.

A amostragem para análises isotópicas foi executada simultaneamente à coleta de amostras para análise físico-química, em frasco de 50 mL de polipropileno que foi totalmente preenchido, de forma a não permitir que o ar residual possa alterar as razões isotópicas da amostra, seguindo protocolo do laboratório onde as análises foram realizadas.

5.1. Amostragem de Água Superficial

Os pontos de monitoramento para a água superficial foram determinados a partir da localização dos poços perfurados no Sistema Aquífero de Leques Aluviais e estão descritos no quadro 1 e figura 6:

Estação Coleta	UTM E-N	Microbacia (Rio)	Descrição	Cota (m)	Vazão (L/s)
AR068*	22J 666048/6814482	dos Porcos	Drenagem secundária margem direita do Rio dos Porcos	9	13,5
AR069	22J 666189/6814170	dos Porcos	Rio dos Porcos à jusante do ponto AR068	9	100
AR076*	22J 653602/6818062	Sangão	Rio Sangão próximo da ponte rodoviária, na localidade de São Roque	19	614
AR078*	22J 653735/6813795	Sangão	Drenagem secundária da margem direita do Rio Sangão	14	9,5
AR085*	22J 652309/6810343	Sangão	Rio Sangão à montante do Rio Mãe Luzia	12	631
AR092	22J 647006/6820556	Mãe Luzia	Rio Guarapari à montante do Rio Mãe Luzia	27	708

Quadro 1 – Relação de amostras de água superficial analisadas na Bacia Hidrográfica do Araranguá (ver figura 1). (*) processo de destilação em sistema fechado antes da análise.

As medições de vazão foram realizadas pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM com os equipamentos FlowTracker (Sontek®) e M9 (Sontek®). São aparelhos desenvolvidos para medir a velocidade das partículas em suspensão e, por consequência, a corrente de água através do princípio físico do efeito *Doppler*. Para esses equipamentos, o efeito *Doppler* é a mudança na frequência de uma onda sonora causada por um movimento relativo entre o aparelho transmissor do som (transdutor) e o material em suspensão na água. O material ao ser atingido por um feixe de ondas sonoras muda a frequência de retransmissão e, como esse material se desloca na mesma velocidade da corrente, a magnitude do efeito *Dopple* é, diretamente, proporcional à velocidade. A amostragem de água superficial é realizada após o procedimento de medição de vazão. Uma amostra de 1 L é coletada e preservada com 20 mL de HCl, para a análise dos parâmetros Fe Total, Mn e Al Totais, Mg, Ca, K, Na, Cu, Cd, Pb, Zn e As. A outra amostra de 1 L é coletada para a determinação dos parâmetros pH, acidez, alcalinidade, condutividade, sulfato e cloreto. Concomitante à coleta da amostra é realizada a medição em campo dos parâmetros pH, Eh, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e temperatura, utilizando um medidor portátil AQUAREAD®.

5.2. Amostragem de Água Subterrânea

Os poços de monitoramento utilizados para a amostragem foram instalados entre os anos de 2009 a 2016 pelo Projeto de Monitoramento dos Recursos Hídricos da Bacia Carbonífera de Santa Catarina, executado pelo convênio entre o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Sindicato da Indústria de Extração do Carvão do Estado de Santa Catarina (SIECESC) e Ministério de Meio Ambiente (MMA). O quadro 2 apresenta as informações destes poços de monitoramento:

Poço	UTM E-N	Sistema Aquífero	Litologias perfuradas	Cota da Boca (m)	Profundidade Final (m)
PMAP01	22J 646700/6850778	Rio Bonito	Irati, Palermo, Rio Bonito	294	138
PMAP02	22J 650605/6845935	Rio Bonito	Palermo, Rio Bonito	157	64
PMAP03	22J 650141/6842158	Rio Bonito	Palermo, Rio Bonito	131	80
PMAP04	22J 650390/6835515	Rio Bonito	Rio Bonito	85	60
PMAP05	22J 654982/6833202	Rio Bonito	Rio Bonito	73	50
PMAP06	22J 657295/6832144	Rio Bonito	Rio Bonito	47	15
PMAP07	22J 655888/6827576	Rio Bonito	Rio Bonito	43	15
PMAP10	22J 655426/6816887	Rio Bonito	Palermo, Rio Bonito	22	8
PMAP11*	22J 666427/6814058	Rio Bonito	Palermo, Rio Bonito	9	62
PMLA01	22J 653550/6817903	Leques Aluviais	Depósitos aluvionares	19	8
PMLA02	22J 652548/6813079	Leques Aluviais	Depósitos aluvionares	20	1
PMLA03	22J 644256/6822962	Leques Aluviais	Depósitos aluvionares	40	11
PMLA04	22J 653159/6820235	Leques Aluviais	Depósitos aluvionares	22	7

Quadro 02 - Relação de amostras de água subterrânea analisadas nos poços de monitoramento da Bacia Hidrográfica do Araranguá (ver Fig. 1). (*) processo de destilação em sistema fechado.

A amostragem de água subterrânea foi executada segundo a norma NBR 15.847 (ABNT, 2010) com métodos de purga a baixa vazão (*low flow*) realizada com equipamento Solinst 410 com bombeamento peristáltico. O desenvolvimento do poço é realizado de forma controlado sob o regime de fluxo e vazões de bombeamento de forma a promover o mínimo rebaixamento do nível dinâmico. Durante o bombeamento, os parâmetros pH, Eh, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e temperatura são monitorados com medidor portátil AQUAREAD® até atingir os níveis de estabilidade, quando então é realizada a

coleta da amostra, garantindo a representatividade da água circulante no aquífero de interesse. A amostragem é realizada em dois frascos com capacidade de 1 L. Uma das amostras é preservada com 20 mL de HCl para as análises dos metais Fe, Mn e Al totais, Mg, Ca, K, Na, Cu, Cd, Pb, Zn e As. A outra amostra é destinada à realização da análise físico-química de pH, condutividade, alcalinidade, acidez, sulfato e cloreto. Todas as amostras são armazenadas e conservadas a temperaturas entre 4°C e 10°C e enviadas em caixas térmicas para o laboratório do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) instalado na Superintendência Regional de São Paulo (SP).

Os equipamentos utilizados na amostragem de água subterrânea foram:

- Medidor elétrico de nível d'água;
- Cilindro de gás nitrogênio com manômetro até 1000 *psi*;
- Controlador operacional da bomba ou controlador eletrônico;
- Carrinho para o transporte do cilindro de gás;
- Mangueira descartável de nylon ¼" (6,35 x 4,35 mm);
- Bomba de válvula dupla (*double valve pump*);
- Unidade de controle da bomba (Solinst, modelo 466);
- Frascos de polietileno de 1 L.

5.3. Análises Isotópicas – Métodos Analíticos

As amostras para determinação de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ foram analisadas no Laboratório de Hidroquímica do Centro de Estudo de Bacias (LEBAC), do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da Universidade Estadual Paulista (UNESP, Rio Claro).

Em 5 amostras consideradas pelo laboratório LEBAC como hipersalinas (ver quadros 1 e 2), para a execução das análises isotópicas foi necessário a realização de um processo de destilação em sistema fechado, que foi feito no laboratório do Centro Tecnológico de Carvão Limpo (CTCL/SATC) em Criciúma (SC). As amostras que necessitaram deste procedimento foram: PMAPAR11, AR68, AR76, AR78 e AR85 (quadros 1 e 2). Este processo de destilação visou a redução da salinidade das amostras e o sistema fechado impede eventual fracionamento garantindo a preservação das razões isotópicas. A redução da salinidade é necessária por fatores de fracionamento entre CO_2

e H₂O, dependentes da salinidade e que irão normalmente acarretar na perda de exatidão da análise isotópica (Christophe, 2009).

As determinações dos valores das razões foram efetuadas pela Técnica de Espectroscopia a Laser empregando analisadores de isótopos, modelos LWIA-24-EP e TLWIA-45-EP da Los Gatos Research; sendo os erros associados: $\delta^2\text{H} (\text{‰}) = 1.2$ e $\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = 0.40$.

Para análise dos isótopos estáveis de oxigênio (¹⁸O e ¹⁶O) e hidrogênio (¹H e ²H), as alíquotas de água foram analisadas por espectroscopia isotópica de absorção laser em cavidade ressonante. Essa técnica, tipo *ring-down* (CRDS, *cavity ring-down spectroscopy*), se baseia na absorção de radiação laser na faixa do infravermelho próximo (0,7 μ a 2,5 μ) por substâncias no estado gasoso, como água, gás carbônico e metano. O instrumento utilizado para análise isotópica foi Liquid Water Isotope Analyzer da Los Gatos Research Inc (LWIA-24d).

A interação da radiação monocromática laser com as substâncias gasosas no interior da câmara permite a determinação das frações molares dos isótopos mais abundantes presentes nas moléculas. No caso particular da molécula de água, as razões isotópicas do ¹⁸O e do ²H são medidas diretamente na amostra vaporizada. Um pulso de radiação laser é injetado para o interior da câmara inicialmente vazia, refletindo-se parcialmente sobre as superfícies de uma série de espelhos. À medida que o pulso colide e reflete sobre as superfícies dos espelhos, uma fração desta luz é absorvida e a sua intensidade diminui.

Quando a amostra no estado gasoso é injetada na cavidade ressonante, a intensidade da radiação laser diminui mais rapidamente devido a sua absorção pelas moléculas presentes. A intensidade da luz dentro da cavidade pode ser expressa por uma função exponencial ou lei de absorção de *Lambert-Beer*:

$$I_v/I_o = \exp(-SLXP\Phi_v)$$

I_v é a intensidade da luz laser transmitida na frequência v ;

I_o é a intensidade do laser (referência) antes de entrar na cavidade;

S é o coeficiente de absorção da radiação laser;

L é o comprimento do caminho óptico;

X é a fração molar da mistura gasosa;

P é a pressão do gás;

$\Phi\nu$ é a função da forma da linha espectral na frequência ν .

Nesse caso,

$$\int \Phi(\nu)d\nu = 1$$

A integração do espectro medido, juntamente com os valores de temperatura, pressão, caminho óptico e coeficiente de absorção da mistura gasosa, permite a determinação das frações molares a partir de:

$$X = (1/(SLP)) \int \ln(I_0/I_\nu)d\nu$$

A abundância de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$ é representada em partes per mil (‰) em relação ao padrão Vienna-SMOW (VSMOW).

5.4. Análises Físico-Químicas – Métodos Analíticos

As análises físico-químicas das amostras de água coletadas seguiram procedimentos do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005) e foram realizadas pelo laboratório do Centro de Controle de Poluição na Mineração (CECOPOMIN) da Unidade Regional da CPRM em São Paulo, e foram utilizados os seguintes métodos analíticos (Quadro 3):

Parâmetro	Método Analítico
pH, Condutividade, Alcalinidade e Acidez	Titulação potenciométrica por eletrodos
SO ₄	Análise Gravimétrica
Cl ⁻	Análise Colorimétrica
Fe, Al e Mn Totais, Mg, Ca, K, Cu, Cd, Pb, Na, Zn	Análise por espectrometria de emissão óptica com plasma (ICP-OES)
As	Análise por geração de hidreto via espectrometria de emissão óptica com plasma (HVG-ICP-OES)

Quadro 3 – Parâmetros utilizados e métodos analíticos.

5.5. Tratamento dos Dados Obtidos

A caracterização hidroquímica avaliou os dados referentes a análises físico-químicas disponíveis para cada poço. Os dados foram processados no programa *Qualigraf* (Mobus, 2002), com o objetivo de efetuar a classificação do tipo de água associada a cada aquífero. O programa *Qualigraf* gera o diagrama de Piper e classifica as amostras segundo os íons dominantes. A representação gráfica pode evidenciar possíveis relações entre íons de uma mesma amostra, ou ressaltar variações temporais ou espaciais existentes. Dentre as opções gráficas, tem-se a de se desenhar as linhas de grade, manter visível as classificações e mostrar, em tabela anexa, a distribuição percentual das amostras nos diversos campos. Outra ferramenta é a seleção de uma ou de um grupo de amostras, que permite por em destaque um determinado alvo de estudo.

6. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados deste trabalho são apresentados e discutidos no artigo intitulado “Interconectividade de aquíferos e os efeitos da drenagem ácida de mina na qualidade das águas da Bacia Carbonífera de Santa Catarina (SC)”, submetido à Revista Geociências da UNESP.

6.1. Carta de Submissão do Artigo

Zimbra

marlon.hoelzel@cprm.gov.br

[Geociencias] Agradecimento pelaSubmissão

De : Prof. Dr. Norberto Morales
<revigeoc@rc.unesp.br>

Ter, 16 de out de 2018 19:46

Assunto : [Geociencias] Agradecimento pelaSubmissão

Para : Marlon Hoelzel <marlon.hoelzel@cprm.gov.br>

Marlon Hoelzel,

Agradecemos a submissão do seu manuscrito "INTERCONNECTIVIDADE DE AQUÍFEROS E OS EFEITOS DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINA NA QUALIDADE DAS ÁGUAS DA BACIA CARBONÍFERA DE SANTA CATARINA (SC)" para Geosciences = Geociências. Através da interface de administração do sistema, utilizado para a submissão, será possível acompanhar o progresso do documento dentro do processo editorial, bastando logar no sistema localizado em:

URL do Manuscrito:

<http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/author/submission/13651>

Login: marlon_hoelzel

Em caso de dúvidas, envie suas questões para este email. Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de transmitir ao público seu trabalho.

Prof. Dr. Norberto Morales
Geosciences = Geociências

Geosciences = Geociências

<http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias>

6.2. Artigo:

INTERCONNECTIVIDADE DE AQUÍFEROS E OS EFEITOS DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINA NA QUALIDADE DAS ÁGUAS DA BACIA CARBONÍFERA DE SANTA CATARINA (SC)

INTERCONNECTIVIDADE DE AQUÍFEROS E OS EFEITOS DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINA NA QUALIDADE DAS ÁGUAS DA BACIA CARBONÍFERA DE SANTA CATARINA (SC)

Marlon HOELZEL^{1,2}, Ana Maria Pimentel MIZUSAKI¹

(1) UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Av. Bento Gonçalves, nº 9500, Campus do Vale, 91509-900 – Porto Alegre (RS). Endereço eletrônico: ana.mizusaki@ufrgs.br.

(2) CPRM, Serviço Geológico do Brasil, Rua Jorge da Cunha Carneiro, nº 490, Bairro Michel, 88803-010 – Criciúma (SC). Endereço eletrônico: marlon.hoelzel@cprm.gov.br *

* autor para correspondência

Introdução

Área de Estudo

Metodologia

Resultados

Discussões

Conclusões

Agradecimentos

Referências

RESUMO: A atividade carbonífera no sul de Santa Catarina se desenvolve há mais de um século e a falta de gerenciamento ambiental nos empreendimentos mineiros causou significativas alterações de qualidade nos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Araranguá. Além da alteração na qualidade das águas, ocorreram fenômenos de colapso e abatimento de minas subterrâneas que ocasionaram fraturamento das camadas sobrejacentes, e permitiram a ampliação dos processos de circulação dos sistemas aquíferos com corpos hídricos superficiais. Com objetivo de melhorar o entendimento destes processos, foram analisadas amostras das águas de 9 poços do Sistema Aquífero Rio Bonito, 4 poços do Sistema Aquífero de Leques Aluviais e 6 amostras de águas

superficiais das mesmas microbacias onde estão instalados os poços. As análises hidroquímicas indicam uma predominância de águas bicarbonatadas cálcicas e sódicas, que quando em contato com a drenagem ácida de mina são transformadas em águas sulfatadas. A composição isotópica em termos de isótopos de oxigênio e de hidrogênio das amostras evidencia semelhança com a composição isotópica das águas meteóricas. Este fato contribui com a hipótese da forte interação da água subterrânea com as águas freáticas e superficiais, que ocorre devido à tectônica rúptil que afeta as litologias gonduânicas, e é intensificada pela presença das minas de subsolo.

PALAVRAS CHAVES: hidroquímica, isótopos estáveis, água subterrânea, drenagem ácida de mina.

ABSTRACT: Carboniferous activity in southern Santa Catarina State has been developed over a century and the lack of environmental management in mining projects caused significant changes in the water resources of the Hydrographic Araranguá Basin. In addition to changes in water quality, occurred collapses in underground mines which caused the fracturing of overlying layers allowing the expansion of aquifer systems and surface waters circulation processes. In order to better understand these processes, samples of 9 wells from Rio Bonito Aquifer System, 4 wells from Alluvial Fan Aquifer System and 6 from surface waters of the same catchments were analyzed. Hydrochemical analysis indicates a predominance of calcium and sodium bicarbonate waters which in contact with acid mine drainage are transformed into sulfated waters. The isotopic composition of the samples shows similarity to the isotopic composition of meteoric waters, contributing to the hypothesis of the strong interaction between groundwater, waters from water table and surface waters, which occurs due to the ruptured tectonics affecting gondwana lithologies, and it is intensified by the presence of underground mines.

KEYWORDS: hydrochemistry, stable isotopes, groundwater, acid mine drainage.

INTRODUÇÃO

A mineração do carvão é parte fundamental da evolução da região sul do Estado de Santa Catarina e para alguns municípios constitui-se na essência da sua própria história (Belolli et al., 2002). Nesta região, situa-se a bacia carbonífera de Santa Catarina (Fig. 1), que possui grande importância econômica no setor energético e siderúrgico do país, pois representa 63% do faturamento do setor, e que vem sendo explorada desde o final do século XIX. Segundo estimativas do governo federal, as suas reservas ainda são suficientes para suprir mais 500 anos de produção (ANEEL, 2017).

Inserir figura 1

Na mesma proporção que o carvão trouxe desenvolvimento para as cidades do sul catarinense, também provocou diversos impactos ambientais, principalmente nos recursos hídricos (Amaral & Krebs, 2010). Um dos mais graves impactos ambientais originados pela mineração do carvão são os efeitos da Drenagem Ácida de Mina (DAM), gerada a partir da oxidação de sulfetos metálicos presentes no minério. Esta oxidação ocorre quando os sulfetos são expostos aos processos atmosféricos, que em contato com a água geram efluentes ácidos, com elevadas concentrações de sulfato e de metais pesados, que são responsáveis pela rápida degradação de ambientes aquáticos, e pela redução da disponibilidade hídrica para o abastecimento público (Mello et al., 2014).

Os impactos ambientais gerados por esta atividade mineira afetam os recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Araranguá, que concentra aproximadamente 80% das atividades carboníferas desenvolvidas na região, o que tem provocado intensa degradação dos recursos hídricos. Ao longo das décadas de mineração do carvão, diversos fenômenos de colapso e abatimento de minas subterrâneas foram ocasionados pela presença de falhas geológicas ou pela recuperação de pilares de sustentação, gerando intenso faturamento nas camadas subjacentes, permitindo ou ampliando a interconexão dos sistemas aquíferos com corpos hídricos superficiais.

Esta degradação ambiental presente na região motivou o Ministério Público Federal a mover uma ação civil pública, que condenou solidariamente a União Federal e as empresas mineradoras a promoverem a recuperação ambiental dos seus passivos, e desde então, a recuperação ambiental vem sendo implementada nas áreas degradadas pela mineração do carvão, e o principal objetivo é restabelecer a função ecológica e social dos ambientes terrestres e promover a recuperação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos da região (GTA, 2018).

Neste contexto, o presente trabalho possui objetivo de melhorar o entendimento dos processos de circulação entre os diferentes níveis aquíferos e das relações entre as águas subterrâneas e as águas superficiais, através da combinação dos resultados de análises de isótopos estáveis ($\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$), com informações hidroquímicas e hidrogeológicas.

ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Araranguá ocupa uma área de aproximadamente 3.020 km² localizada na região sul do Estado de Santa Catarina e está inserida no contexto geológico regional da Bacia do Paraná. A sedimentação vulcano-sedimentar da Bacia do Paraná pode ser subdividida em seis supersequências, com idades que variam desde o Ordoviciano até o Cretáceo (Milani et al., 2007) (Fig. 2).

Na área de estudo há o domínio da Supersequência Gondwana I sendo marcada pelo declínio das condições glaciais do Permiano, onde se depositaram as rochas sedimentares platformais da Formação Rio Bonito, sobrepostas pelos siltitos de ambiente marinho raso da Formação Palermo (Milani et al., 2007). Ocorrem também extensas coberturas quaternárias denominadas de depósitos de leques aluviais (Krebs, 2004), que ocupam uma área de 1.088 km² correspondendo a 36% da superfície da bacia hidrográfica. Como embasamento cristalino são reconhecidas rochas graníticas e gnáissicas da Suíte Pedras Grandes e do Batólito de Florianópolis (Bitencourt et al., 2008).

As litologias da Formação Rio Bonito (Fig. 2) que afloram na porção leste da Bacia Hidrográfica do Araranguá, foram individualizadas em três membros, denominados Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis (Mühlmann et al., 1974). Constituem um espesso pacote de arenitos de granulometria fina a média, com estratificações plano-paralelas, cruzadas tabulares e cruzadas acanaladas, intercalados com siltitos e folhelhos carbonosos, com laminação plano paralela, eventualmente ondulada. Observa-se um aumento do predomínio dos siltitos e folhelhos em direção ao topo da sequência, evidenciando o trato marinho transgressivo. A porção mais arenosa da Formação Rio Bonito é a porção basal, correspondente ao Membro Siderópolis, que concentra as camadas de carvão denominadas Camada Bonito, Barro Branco e Irapuá, que possuem teores variados de sulfetos de ferro (FeS_2) disseminados nas camadas de carvão e nas encaixantes (Krebs, 2004).

As litologias arenosas da Formação Rio Bonito constituem o Sistema Aquífero Rio Bonito, que possui elevada capacidade de armazenamento e transmissão de água, caracterizando-se como um importante aquífero para a região. Na porção leste da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá onde as litologias da Formação Rio Bonito são aflorantes, o aquífero ocorre de forma livre com comportamento de aquífero poroso.

Na área de estudo, as litologias da Formação Rio Bonito estão afetadas por conjuntos de falhas rúpteis associadas a diversos eventos tectônicos, sendo que os principais sistemas de falhas possuem direção principal NW-SE, e foram formados entre 133 a 135 Ma por ocasião da abertura do Gondwana, e posteriormente reativados entre 90 e 66 Ma, com o soergimento regional do arco de Lages (Petry et al. 2017).

Krebs (2004) mostra que nesta porção é registrada a maior densidade de lineamentos estruturais e considera que as falhas $\text{N}30^\circ\text{W}$ são do ponto de vista hidrogeológico, as estruturas mais importantes para a armazenagem, circulação, recarga e descarga de água.

A Formação Palermo se caracteriza como um espesso pacote de ritmitos, compostos por intercalações de siltitos e argilitos, que na área de estudo se constituem de aquitardos e confinam as águas subterrâneas do Sistema Aquífero Rio Bonito (Krebs, 2004).

As coberturas cenozoicas que ocorrem na área de estudo são denominadas de Leques Aluviais, e são compostos por sedimentos inconsolidados, com predomínio de cascalhos e seixos na base e areias e lamias no topo. São depósitos de geometria lenticular, gerados a partir de fluxos torrenciais, desde o Plioceno ao Recente. As espessuras são da ordem de 5 m no limite leste da Bacia, aumentando gradativamente para oeste, onde podem chegar a 40 m (Krebs, 2004). Estas coberturas possuem regime hidrogeológico de aquífero granular livre ou semi confinados por lentes argilosas, denominado de Sistema Aquífero de Leques Aluviais. O nível freático deste sistema aquífero possui relação direta com os níveis de pluviosidade, visto que são recarregados pelos rios em grandes momentos de deflúvio, e também podem alimentar os rios em época de estiagem, devido ao fluxo de base. Trata-se de um aquífero com nível d'água muito próximo da superfície, em geral, inferior a 1 m, porosidade eficaz de $4,6 \times 10^{-2}$ e condutividade hidráulica (K) de 6,66 m/dia (Machado, 2013).

Inserir Figura 2

Ao longo das décadas de mineração do carvão, observam-se diversos tipos de impactos ambientais que atuam diretamente na qualidade dos recursos hídricos. Os principais impactos se referem à geração de drenagem ácida de mina, que é um fenômeno que se inicia quando rochas contendo minerais sulfetados são retiradas do subsolo pelas atividades de mineração e dispostos na superfície em contato com água e oxigênio atmosféricos (Fig. 4B). As condições dos recursos hídricos na sub-bacia do Rio Sangão, podem ser subdivididos em trechos com influência da drenagem ácida de mina e trechos sem influência (Farfan et al., 2004) (Quadro 1). Observa-se que os trechos influenciados pela mineração do carvão possuem uma redução de pH para a faixa de 2,0 a 4,0, e aumento das concentrações de ferro, alumínio, manganês, zinco e sulfato.

Inserir Quadro 1

Outra importante alteração das condições ambientais se refere à presença de áreas mineradas em subsolo (Fig. 3), que pela presença de descontinuidades e falhas geológicas ocasionou diversos fenômenos de colapso e abatimento de minas subterrâneas, ampliando o fraturamento das camadas sobrejacentes, e intensificando os processos de interconexão dos sistemas aquíferos com corpos hídricos superficiais. Esta interconexão é demonstrada no trabalho realizado por Leão & Krebs. (2017) indicando que falhas geológicas permitiram o colapso de minas subterrâneas e a conexão do Sistema Aquífero Rio Bonito, com as águas superficiais com condutividade hidráulica de 4,65 m/hora.

Inserir Figura 3

METODOLOGIA

Uma etapa fundamental em qualquer investigação de águas subterrâneas é a definição e mapeamento das unidades aquíferas e confinantes (unidades hidroestratigráficas), e com o delineamento dessas unidades, fragmenta-se o arcabouço geológico em função de sua permeabilidade, procurando-se definir o sistema de fluxo (Machado & Freitas, 2005).

Para a realização deste estudo, foram utilizados dados de análises físico-químicas do monitoramento sistemático dos recursos hídricos da Bacia Carbonífera de Santa Catarina, executado pelo Serviço Geológico do Brasil e disponibilizado no 11º Relatório de Indicadores Ambientais (GTA, 2018). Em complemento aos dados físico-químicos, foi realizada uma campanha de amostragem das águas para análises isotópicas de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e hidrogênio ($\delta^2\text{H}$). Esta amostragem foi simultânea à coleta da campanha de monitoramento executada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2017). Inicialmente a pesquisa reuniu os dados de mapas geológico/estrutural, mapa hidrogeológico e informações hidroquímicas da região de estudo. A partir dos dados disponíveis, procedeu-se a seleção dos pontos de amostragem para análise isotópica das águas, levando em consideração a proximidade entre os pontos de amostragem de água

superficial com os poços de monitoramento de água subterrânea, limitados à Bacia Hidrográfica do Araranguá (SC).

Inserir Figura 4

Após a seleção dos pontos de amostragem e com as informações sobre a geologia, hidrogeologia, arcabouço estrutural, pontos de amostragem, hidrografia, áreas degradadas pela mineração a céu aberto (Figs. 4A, B) e delimitação de galerias de minas subterrâneas, foi elaborado um banco de dados em ambiente SIG, com utilização de *software* de geoprocessamento.

A amostragem da água superficial e subterrânea (Figs. 4C, D) ocorreu durante o mês de junho de 2017 e foi realizada em 19 pontos de monitoramento, das quais 9 amostras foram coletadas em poços de monitoramento instalados no Sistema Aquífero Rio Bonito, 4 amostras em poços instalados no Sistema Aquífero de Leques Aluviais e 6 amostras de águas superficiais provenientes dos córregos da Bacia Hidrográfica do Araranguá. As águas superficiais foram coletadas diretamente dos recursos hídricos, em dois frascos de polipropileno de 1 L para cada ponto de coleta, com a adição de 20 mL de HCl para preservação da análise dos cátions. As amostras de água subterrânea também seguiram o mesmo protocolo de preservação, e foram coletadas conforme a NBR 15.847 (ABNT, 2010) por meio da técnica de purga de baixa vazão, com gás nitrogênio, após a estabilização dos parâmetros pH, condutividade, OD e Eh. A amostragem para análise isotópica foi realizada em frascos de polietileno de 100 mL com preenchimento total, evitando a presença de bolhas de ar no interior dos frascos.

Os poços de monitoramento utilizados neste estudo foram instalados entre os anos de 2009 e 2016 pelo Projeto de Monitoramento dos Recursos Hídricos da Bacia Carbonífera de Santa Catarina, executado pelo convênio entre o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Sindicato da Indústria de Extração do Carvão do Estado de Santa Catarina (SIECESC) e Ministério de Meio Ambiente (MMA). Estes poços foram construídos conforme NBR 15.495-1 (ABNT, 2007), e captam água somente do intervalo aquífero de interesse, uma vez que as entradas de água de níveis

mais rasos são completamente isoladas por calda de concreto e bentonita. O quadro 2 apresenta as informações das amostras obtidas nestes poços de monitoramento:

Inserir Quadro 2

Os pontos de amostragem para a água superficial foram determinados a partir da localização dos poços perfurados no Sistema Aquífero de Leques Aluviais e estão descritos no quadro 3:

Inserir Quadro 3

As análises isotópicas foram realizadas durante o mês de julho de 2017 no Laboratório de Hidroquímica do Centro de Estudo de Bacias (LEBAC), do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da Universidade Estadual Paulista (UNESP, Rio Claro). As amostras PMAP11, AR68, AR76, AR78 e AR85 (Quadros 2 e 3), segundo protocolos do Laboratório de Hidroquímica do Centro de Estudos de Bacias (LEBAC), foram consideradas como hipersalinas, sendo necessário serem submetidas a um processo de destilação em sistema fechado. Este processo de destilação visou reduzir a salinidade das amostras e o sistema fechado impede eventual fracionamento garantindo a preservação das razões isotópicas. A redução da salinidade é necessária por fatores de fracionamento entre CO₂ e H₂O, dependentes da salinidade e que irão normalmente acarretar na perda de exatidão (Christophe et al., 2009).

As determinações dos valores das razões foram efetuadas pela Técnica de Espectroscopia a Laser empregando analisadores de isótopos, modelos LWIA-24-EP e TLWIA-45-EP da *Los Gatos Research*, com erros associados de $\delta^2\text{H} (\text{‰}) = 1.2$ e $\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = 0.40$.

As análises físico-químicas foram realizadas durante o mês de agosto de 2017 seguindo procedimentos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1998) e realizadas no Centro de Controle de Poluição na Mineração (CECOPOMIN) do Serviço Geológico do Brasil em São Paulo.

A caracterização hidroquímica avaliou os dados referentes a análises físico-químicas de cada poço. Os dados foram processados no programa *Qualigraf* (Mobus, 2002), com o objetivo de efetuar a classificação dos tipos de águas associadas a cada compartimento hídrico. O programa

Qualigraf gera o Diagrama de Piper e classifica as amostras segundo os íons dominantes. A representação gráfica pode evidenciar possíveis relações entre íons de uma mesma amostra, ou ressaltar variações temporais ou de um conjunto de amostras.

RESULTADOS

Aquífero é uma formação geológica, constituída por rochas ou sedimentos, que armazena e transmite água por seus poros ou fraturas (Feitosa et al., 2008). Na natureza, as transferências de água entre os diversos sistemas aquíferos e a rede de escoamento superficial dependem das relações definidas pela distribuição espacial dos potenciais hidráulicos, e pelos tipos litológicos que afloram ao longo dos rios e córregos (Monteiro et. al., 2007). Os resultados obtidos apresentam informações físico-químicas e isotópicas de 19 amostras de água, coletadas em três diferentes compartimentos hídricos da área de estudo, referentes ao sistema de escoamento superficial, Sistema Aquífero de Leques Aluviais, e Sistema Aquífero Rio Bonito (Fig. 5).

Inserir Figura 5

As amostras de água subterrânea foram obtidas em poços de monitoramento instalados nos sistemas aquíferos de Leques Aluviais e Rio Bonito conforme observado na figura 6. Destaca-se que a posição do filtro instalado encontra-se sempre na base dos poços. A presença de artesianismo, que é a elevação do nível potenciométrico acima do nível saturado do aquífero, evidencia o confinamento do sistema aquífero Rio Bonito nos locais perfurados. Observa-se que a entrada de água dos poços ocorre somente junto ao filtro, sendo que o restante do espaço anelar foi devidamente cimentado (Fig. 6).

Inserir Figura 6

Os resultados físico-químicos e isotópicos foram agrupados conforme os compartimentos hídricos (águas superficiais, Sistema Aquífero de Leques Aluviais e Sistema Aquífero Rio Bonito) e são apresentados na Tabela 1. Também são relacionados, com objetivo de comparação, resultados de duas amostras das águas do aquífero Rio Bonito de uma região semelhante, situada no Rio

Grande do Sul, porém sem atividades de mineração (Goffmann, 2013). Os valores das amostras de Goffmann (2013) para o aquífero Rio Bonito no Rio Grande do Sul, tem pH de 6,90 e 8,02, condutividade elétrica de 428,00 e 2.020,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sulfato de 14,80 mg/L, ferro de 0,08 a 0,16 mg/L, alumínio de 0,01 a 0,03 mg/L, manganês de 0,04 a 0,06 mg/L. Por estarem em área de ocorrência do aquífero Rio Bonito, livre de atividades de mineração, estas amostras foram utilizadas de forma comparativa com as águas do Rio Bonito da área de estudo.

Inserir Tabela 1

Em relação ao pH, as amostras analisadas no compartimento de água superficial variam de 2,75 a 7,28, sendo que as amostras AR68, AR76, AR78 e AR85, coletadas nos rios dos Porcos e Sangão, possuem o pH de 2 a 4, caracterizando influência da drenagem ácida de mina (Fig. 7), conforme critérios de Farfan et al. (2004). As amostras dos compartimentos de água subterrânea, em relação ao pH variaram de 4,65 a 8,19 e se encontram acima do valor característico de drenagem ácida.

Inserir Figura 7

Em relação à concentração de sulfato (SO_4), as amostras do compartimento superficial apresentaram altas concentrações que variam de 41,98 a 3.840,23 mg/L, estando acima do limite considerado para trechos de rios sem influência da mineração, conforme figura 8. Duas das quatro amostras de água subterrânea do Aquífero dos Leques Aluviais (PMLA02 e PMLA04) apresentaram concentrações acima do limite considerado de influência, com valor chegando a 1.255,79 mg/L. Nas 9 amostras do compartimento do Sistema Aquífero Rio Bonito, somente duas apresentaram valores muito acima do limite (PMAP04 e PMAP05), chegando a 714,13 mg/L (Fig. 8).

Inserir Figura 8

Em relação à concentração de metais, observa-se que os maiores valores ocorrem nas amostras do compartimento de água superficial. Neste compartimento, todas as concentrações estão acima ou muito próximas dos limites considerados para águas sem influência da drenagem ácida

comparando com Farfan et al. (2004). No aquífero de leques aluviais, ocorrem concentrações de ferro acima do limite nas amostras PMLA03 e PMLA04 (Figs. 1 e 2). As amostras do sistema aquífero Rio Bonito apresentam as menores concentrações de metais, com grande parte das amostras com ausência de alumínio. A concentração de ferro encontra-se acima do limite nas amostras PMAP05, PMAP06 e PMAP07. Em todos os compartimentos hídricos, observa-se a presença constante de manganês, sempre acima do limite considerado para influência da mineração, com valores entre 0,03 a 35,10 mg/L (Fig 9).

Inserir Figura 9

Razões isotópicas do oxigênio e do hidrogênio da água são muito utilizadas como traçadores para o entendimento de processos hidrogeológicos como precipitação, recargas subterrâneas, águas superficiais, interações entre águas de diversos compartimentos e hidrologia nas bacias hidrográficas. Comparações entre as composições isotópicas das precipitações e das águas subterrâneas são uma excelente ferramenta para avaliar mecanismos de recarga e de contaminação (Yeh et al., 2014).

As razões isotópicas das amostras analisadas indicam que os valores de $\delta^2\text{H}$ situam-se entre -19,1 a -31,3 ‰ enquanto as de $\delta^{18}\text{O}$ variaram entre -3,94 a -7,02 ‰, conforme Quadro 4. As amostras analisadas tem composição isotópica próxima à reta GMLV (Craig, 1961) e demonstram grande similaridade no fracionamento isotópico (Fig 10). A tendência central das razões isotópicas para $\delta^2\text{H}$ é de -23,38 e $\delta^{18}\text{O}$ é -4,97. Verifica-se que o ponto PMAP11 é o único ponto analisado que se afasta dos valores médios, possuindo valores levemente mais negativos, com $\delta^2\text{H}$ de -31,3 e $\delta^{18}\text{O}$ é -7,02. Em termos comparativos, as amostras de Goffermann (2013) no aquífero Rio Bonito possuem razões ainda mais negativos, com valores de $\delta^2\text{H}$ de -44,6 e $\delta^{18}\text{O}$ -8,59.

Inserir Figura 10

DISCUSSÃO

Na região de estudo há três distintos compartimentos hídricos representados por dois sistemas aquíferos (Rio Bonito e Leques Aluviais), e outro compartimento representado pelo escoamento superficial. As análises obtidas das águas destes compartimentos foram plotadas no Diagrama de Piper (Mobus, 2002) para fins de classificação hidroquímica (Fig. 11 e Quadro 4).

Inserir Figura 11

De acordo com a classificação hidroquímica do Diagrama de Piper (Fig. 11) verifica-se que as águas superficiais analisadas estão no campo das águas sulfatadas cálcicas. Este quimismo está associado à presença constante de rejeitos da mineração do carvão nas bacias de contribuição dos pontos amostrados.

A classificação hidroquímica das águas do Sistema Aquífero de Leques Aluviais indica que as amostras PMLA01, PMLA03 e PMLA04 são águas sulfatadas, e a amostra PMLA02 é do tipo bicarbonatada magnésiana (Fig. 11). As águas deste sistema circulam pelo manto de alteração e pelos depósitos cenozoicos que cobrem as litologias da Bacia do Paraná presentes na área. São aquíferos livres, ou semi confinados, com condutividade hidráulica elevada, espessuras que variam entre 5 e 40 m, extensão variável, e alta vulnerabilidade à contaminação. Devido ao pouco tempo de residência suas águas apresentam tendência naturalmente à baixa condutividade elétrica (inferior a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$), porém quando influenciadas pela drenagem ácida de mina, são encontrados valores de condutividade elétrica da ordem de 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Isto pode ser verificado na amostra PMLA04 dos leques aluviais (ver Fig. 3).

A classificação hidroquímica das águas do Sistema Aquífero Rio Bonito indica que as amostras PMAP01, PMAP02, PMAP06 e PMAP07 foram classificadas como Águas Bicarbonatadas Cálcicas, as amostras PMAP04 e PMAP10 foram classificadas como Águas Bicarbonatadas Sódicas, as amostras PMAP03 e PMAP05 como Águas Sulfatadas ou Cloretadas Cálcicas, e a amostra PMAP11 como Água Sulfatada ou Cloretada Sódica. A qualidade das águas deste aquífero originalmente está associada a ambientes confinados, com baixa velocidade de fluxo

e longos tempos de residência (5.400 a 11.310 anos), como nos dados apresentados por Goffermann (2013), em área análoga.

Na área de estudo, a condição estrutural está relacionada a eventos tectônicos de natureza rúptil, que tiveram início na abertura gonduânica, e se encerraram com o soerguimento regional do Arco de Lages (Petry et al., 2017). Esta tectônica resultou no soerguimento das litologias gonduânicas, permitindo que a Formação Rio Bonito aflorasse em uma faixa norte-sul, com presença constante de descontinuidades e falhamentos, como pode ser visualizado nos perfis esquemáticos da Fig. 6. O resultado desta condição estrutural permite que o Aquífero Rio Bonito na área de estudo apresente uma condição de fluxo mais dinâmico em relação às áreas confinadas das demais porções da Bacia do Paraná, diminuindo os tempos de residência, e por consequência os valores de salinidade.

Observa-se, no entanto, que a presença da drenagem ácida de mina, modifica localmente as condições físico-químicas naturais deste sistema aquífero. Esta modificação se traduz na elevação da salinidade, e na transformação das águas dos tipos bicarbonatados em tipos sulfatados, devido ao incremento do sulfato resultante da oxidação dos sulfetos metálicos. A figura 12 demonstra a relação entre o aumento da condutividade elétrica e a presença de sulfato nas amostras obtidas na área de estudo.

Inserir Figura 12

Para fins de comparação, as amostras dos poços do Sistema Aquífero Rio Bonito da Bacia Carbonífera, são referidas às amostras do aquífero Rio Bonito porém na região de São Gabriel (Rio Grande do Sul) onde não há atividades de mineração de carvão (Goffermann, 2013). Estas amostras foram classificadas como Bicarbonatada Cálcica ou Magnésiana e Sulfetada ou Cloretada Sódica (Fig. 11). Conclui-se que de um modo geral, as águas deste sistema aquífero podem conter quantidades de sulfato natural, mesmo sem a presença de atividades de mineração. A presença de 27,58 mg/L de sulfato na água do poço PMAP01, que situa-se a montante da região mineira e

corresponde ao ponto “branco” (Fig. 03), também colabora com esta indicação, e dificulta o estabelecimento de um *background* para as águas subterrâneas da região carbonífera.

Em particular, constata-se que existe uma maior contaminação por drenagem ácida de mina no poço PMAP06 do aquífero Rio Bonito, devido à elevação da concentração de ferro e manganês (Figs 13A). A identificação da origem das elevadas concentrações de sódio, cloreto e sulfato na amostra do PMAP11 (Fig. 13B) necessitará de estudo específico. Neste poço, a proximidade da linha de costa e presença de sedimentos praias, pode levar à interpretação de contribuição marinha, mas por outro lado, o artesianismo surgente presente neste poço evidencia um grau mais elevado de confinamento, o que sugere que a contaminação tenha origem em galerias de minas subterrâneas.

Inserir Figura 13

Os resultados isotópicos de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ demonstram grande similaridade entre as águas dos diversos compartimentos hídricos estudados, e não foram observadas diferenças de fracionamento entre as águas subterrâneas e as águas superficiais. Sabe-se que a recarga de um aquífero é obtida através da água de precipitação e a sua composição isotópica é semelhante à composição isotópica das águas meteóricas. Podem, no entanto, ocorrer desvios relativos à composição das águas meteóricas que são associados com processos de evaporação e com outros mecanismos de recarga (Clark & Fritz, 1997). Na figura 10 estão representados os valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ das amostras de água recolhidas na área de estudo, tendo como termo de comparação a Linha Mundial das Águas Meteóricas (GMWL de Craig, 1961). Pode-se verificar que os valores isotópicos obtidos para as águas da bacia carbonífera tem uma aproximação razoável com a GMWL (Fig. 10) podendo então serem representativos das águas meteóricas. Isto leva a supor que a recarga dos aquífero seja, pelo menos em grande parte, obtida através das águas de precipitação. As amostras que mais se distanciam da reta GMWL podem estar relacionadas a diferença de intensidade dos processos de evaporação (águas mais negativas são produzidas por maiores processos de evaporação). Importante salientar que o número de pontos analisados não são suficientes para traçar a reta meteórica da região de estudo, o que permitiria uma comparação mais real.

Como destaque, observam-se os valores mais negativos para as razões $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ no poço PMAPAR11, que representa o aquífero Rio Bonito com fenômeno de surgência, levando a crer que neste ponto ocorram as águas com maior tempo de residência deste sistema aquífero para a área de estudo. Em complemento, observa-se que os valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mais negativos para as amostras do aquífero Rio Bonito são da região de São Gabriel (Goffermann,2013), que sugere um maior grau de confinamento e maior tempo de residência, quando comparadas às águas da bacia carbonífera (Fig.10).

Com relação à interação entre os compartimentos de água superficial e do Aquífero Rio Bonito, Krebs & Gomes (2005) identificaram assinaturas hidroquímicas semelhantes em poços deste aquífero e em águas do Rio Mãe Luzia. Para os autores isto sugere que em períodos de estiagem, o Sistema Aquífero Rio Bonito poderia alimentar as drenagens superficiais por meio do fluxo de base. Leão & Krebs (2017) também demonstram, por meio de uso de traçadores, a conexão entre poços instalados no aquífero Rio Bonito e as águas superficiais, com condutividade hidráulica (K) da ordem de 6,66 m/dia. Estas sugestões confirmam os dados hidroquímicos e isotópicos obtidos neste estudo, que demonstram grande semelhança entre as águas subterrâneas e águas meteóricas, sugerindo intensa circulação entre os distintos compartimentos hídricos.

As águas do aquífero de leques aluviais são influenciadas pela mistura entre as águas de recarga provenientes dos rios e córregos afetados pela mineração, e pela recarga direta da água da chuva. Isto pode ser comprovado pelos resultados isotópicos que acompanham a linha das águas meteóricas (Fig.10). Embora não se tenha evidências da recarga do Aquífero de Leques através do Aquífero Rio Bonito, este movimento ascendente não pode ser descartado, visto que a potenciométrica dos poços perfurados no Sistema Aquífero Rio Bonito, sempre possuem artesianismo.

Inserir Figura 14

CONCLUSÕES

A qualidade das águas dos compartimentos de água superficial e do aquífero de Leques Aluviais estão fortemente sob a influencia da drenagem ácida de mina, que modifica os parâmetros de pH, condutividade elétrica e aumenta as concentrações de sulfato, Fe, Al e Mn. De um modo geral, observa-se que o incremento de SO_4^- originado pela oxidação de sulfetos presentes no rejeito de carvão é responsável pela modificação de águas bicarbonatados em águas sulfatadas.

Já os processos de subsidência causados pelas minas subterrâneas são responsáveis por intensificar localmente a circulação e a mistura entre os diversos compartimentos de água superficial e subterrânea, embora grande parte das águas do aquífero Rio Bonito não está afetada pela drenagem ácida de mina.

As análises isotópicas demonstram que as águas dos diferentes compartimentos tem grau de fracionamento isotópico (O e H) semelhante às águas meteóricas, indicando uma intensa circulação entre os ambientes superficiais e subterrâneos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGGEO) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20 ed. Washington: APHA, 937p, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2007). NBR 15.495-1. **Poços de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Aquíferos Granulares – Parte 1: Projeto e Construção**. Rio de Janeiro. 25 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010). NBR 15.847. **Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento - Métodos de purga**. Rio de Janeiro, 20p

AMARAL, J.E., KREBS, A.S.J. Drenagem Ácida da Mineração de Carvão e sua Interrelação com Metais Pesados e Recargas de Aquíferos na Bacia Carbonífera do Estado de Santa Catarina. **Anais** do XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII e Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. São Luís, Brasil, 2010.

ANEEL (2017) **Atlas de Energia Elétrica do Brasil – Parte III – Fontes Não Renováveis** - Agência Nacional de Energia Elétrica – disponível em www.aneel.gov.br, Acesso em agosto de 2018.

BELOLLI, M., QUADROS, J., GUIDI, A. **História do Carvão de Santa Catarina**. Criciúma: Imprensa Oficial do Estado de Santa Catarina. 2002.

BITENCOURT, M.F., BONGIOLO, E.M., PHILIPP, R.P., MORALES, L., GRAFULHA, L.F.M., RUBERT, R.R., MELO, C.L. LUFT Jr, L.J. Estratigrafia do Batólito Florianópolis, Cinturão Dom Feliciano, na Região de Garopaba-Paulo Lopes, SC. **Pesquisas em Geociências**. 35. 109, 2008.

CHRISTOPHE, L. GARDIEN, V., RIGAUDIER, T., FOUREL, F., MARTINEAU, F., CROS, A. Oxygen isotope fractionation and equilibration kinetics between CO₂ and H₂O as a function of salinity of aqueous solutions. **Chemical Geology**, Volume 264, Issues 1–4, Pages 122-126. June 2009.

CLARK, I., FRITZ, P. **Environmental Isotopes in Hydrogeology**, ed. Lewis Publishers, U.S.A., 328 p, 1997,

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Relatório Técnico de Perfuração de Poços de Monitoramento. Convênio nº 003/2014-SMCQ/MMA - Criciúma, SC. **Documento Interno**, 2017.

CRAIG, H. Isotopic variation in meteoric water. *Science*. 133: 1702-1708, 1961.

DNPM - Departamento de Produção Mineral. Mapa das áreas mineradas em subsolo da região carbonífera de Santa Catarina. DNPM/SC – **Não publicado**, 2009.

FARFAN, J.R., FILHO, B.O., SOUZA, V.P. Avaliação do Potencial de Drenagem Ácida de rejeitos da Indústria Mineral. Rio de Janeiro: **CETEM**, 58p, 2004.

FEITOSA, F.A.C., MANOEL FILHO, J., FEITOSA, E.C., DEMÉTRIO, J.G. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3.ed. Rio de Janeiro: CPRM, LABHID-UFPE. 812 p, 2008.

GTA - Grupo Técnico de Assessoramento. 11º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais. Volume 1. **Ação Civil Pública (2018) nº 93.8000.533-4**. Processo de cumprimento de sentença nº 2000.72.04.002543-9. 2018.

GOFFERMANN, M. **Caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas da região de São Gabriel, RS** (Dissertação de Mestrado) IGEO/UFRGS, 2013.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Base cartográfica contínua do Brasil, ao milionésimo – **BCIM** – 5ª versão, 2016.

KREBS A.S.J. **Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Araranguá, SC**. Florianópolis, 2004. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.

KREBS, A.S.J., GOMES, C.B.J. Caracterização hidroquímica das águas do aquífero Rio Bonito na Região Carbonífera de Santa Catarina. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos: João Pessoa. **Anais**. João Pessoa, v. 16, 2005.

LEÃO, M.I., KREBS, A.S.J. Estudo da conexão entre águas subterrâneas e superficiais usando traçador na área do Campo Vila Funil, Siderópolis-SC, **V CBCM**, 2017.

MACHADO, J. L. F. e FREITAS, M.A. **Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul**. Relatório final. Porto Alegre: CPRM, 2005.

MACHADO, J. L. F. **Mapa Hidrogeológico do Estado de Santa Catarina**. Porto Alegre: CPRM, 2013.

MELLO, J.W.V.; DUARTE H.A., LADEIRA, A.C.Q. Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Mina. In: **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**. Nº 8, p. 24-29. 2014.

MILANI, E.J., MELO, J.H.G., SOUZA, P.A., ERNANDES, L.A., FRANÇA, A.B. Bacia do Paraná. In: **Cartas Estratigráficas. Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

- MOBUS, G. Qualigraf: programa para análise da qualidade da água. Fortaleza: **FUNCENE**, 2002.
- MONTEIRO, J.P., SILVA, J.M., GUERREIRO, P., MARTINS, J., REIS, E. Modelação de relações entre águas superficiais e subterrâneas nos aquíferos do Algarve Central. **Seminário sobre Águas Subterrâneas. Lisboa**, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 2007.
- MÜHLMANN, H., SCHNEIDER, R.L., TOMMASI, E., MEDEIROS, R.A., DAEMON, R.F., NOGUEIRA, A.A. **Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná**. Ponta Grossa: PETROBRÁS/DESUL. 186 p, 1974.
- PETRY, T. S. **Geologia estrutural aplicada à mineração subterrânea de carvão: Mina D, Araranguá, SC**. (Dissertação de Mestrado) IGEO/UFRGS, 2017.
- YEH, H., LIN, H., LEE, C., HSU, K., WU, C. **Identifying Seasonal Groundwater Recharge Using Environmental Stable Isotopes**. *Water*, 6: 2849-2861, 2014.

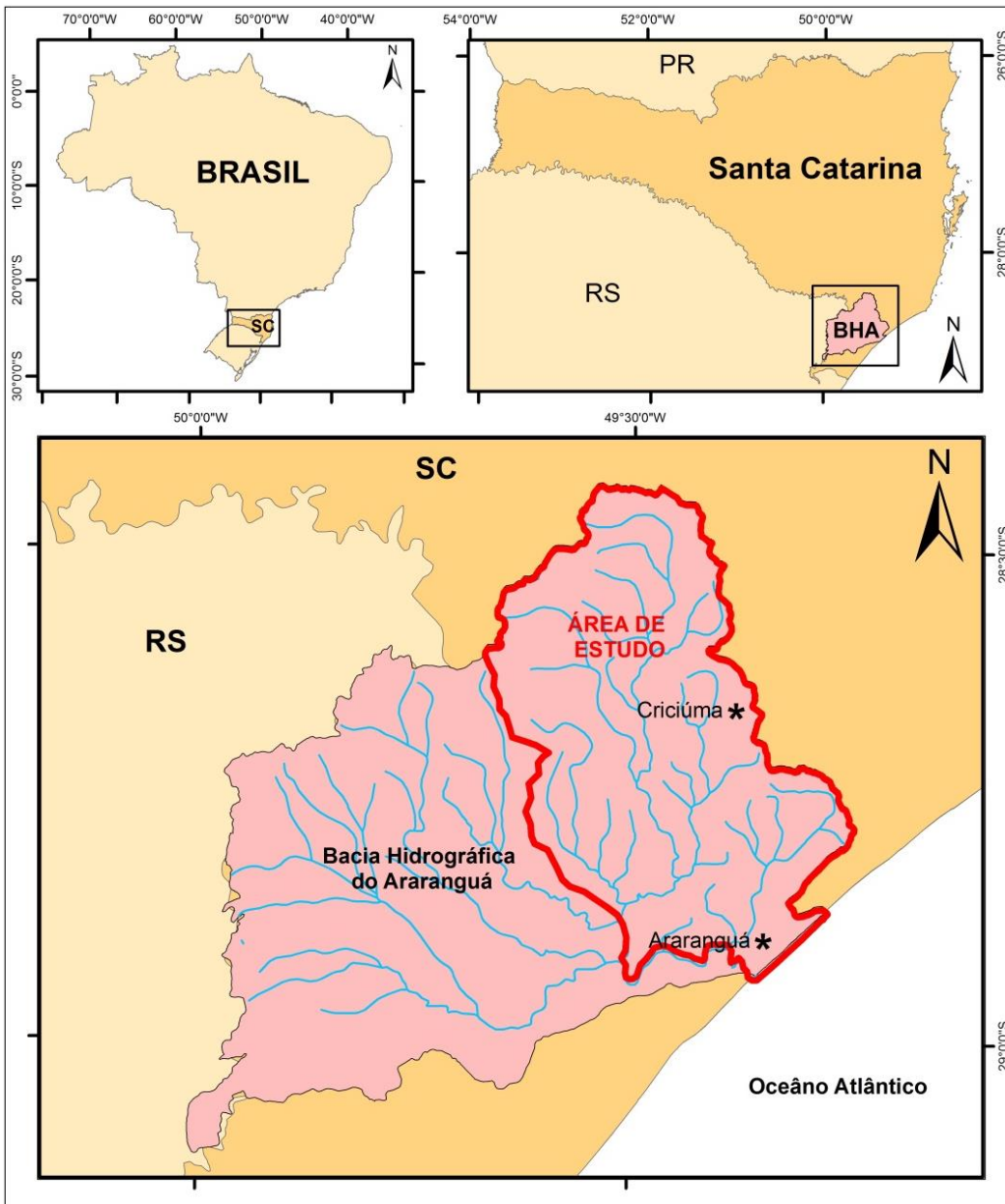


Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Araranguá, na região sul do Estado de Santa Catarina, destacando-se a área de estudo formada pelas Sub-bacias dos rios Mãe Luzia, Sangão e dos Porcos (modificado de IBGE, 2016 –SIRGAS, 2000).

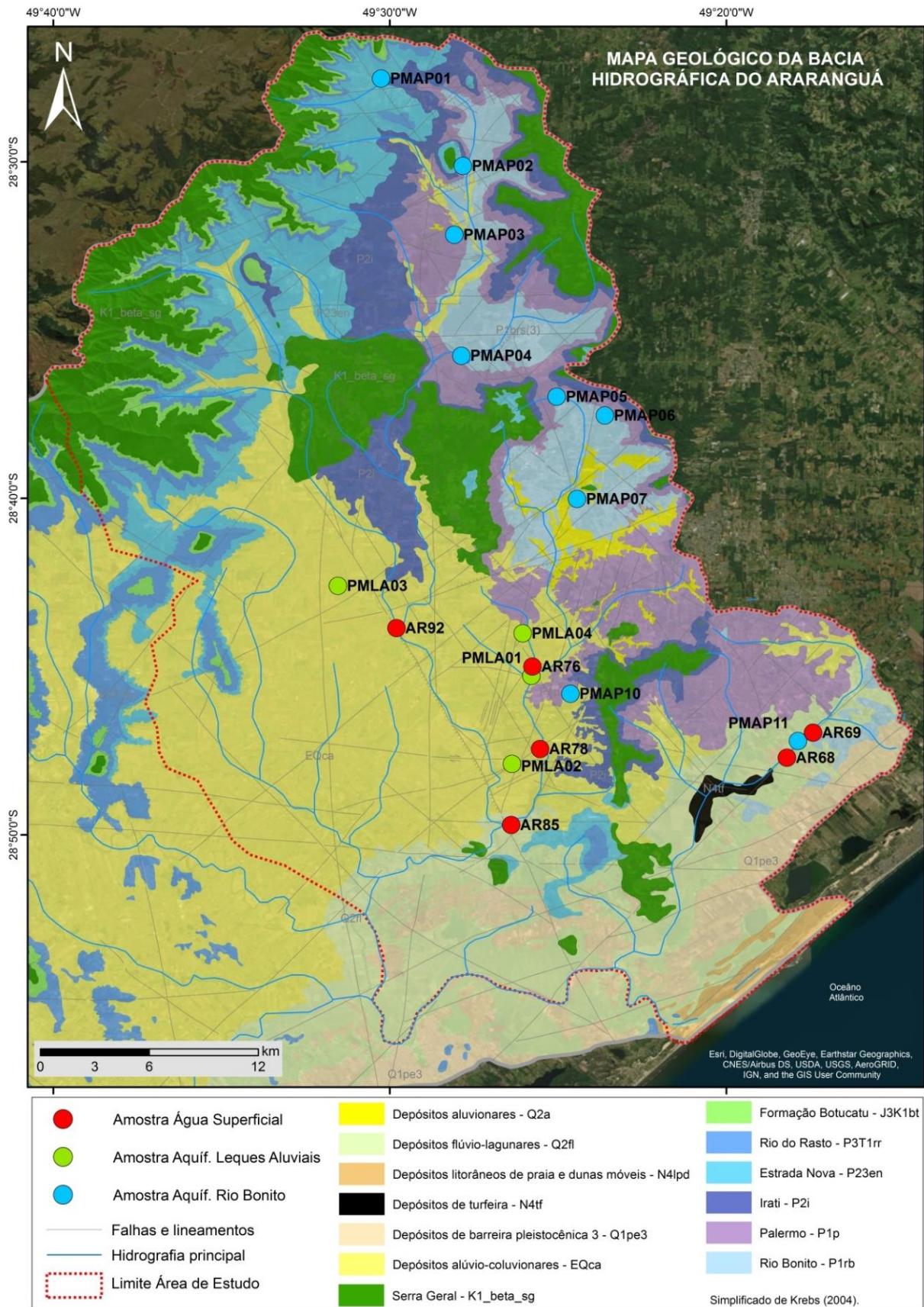


Figura 2 – Mapa geológico e estrutural com localização dos pontos de amostragem de água superficial e água subterrânea da área de estudo (modificado de Krebs, 2004).

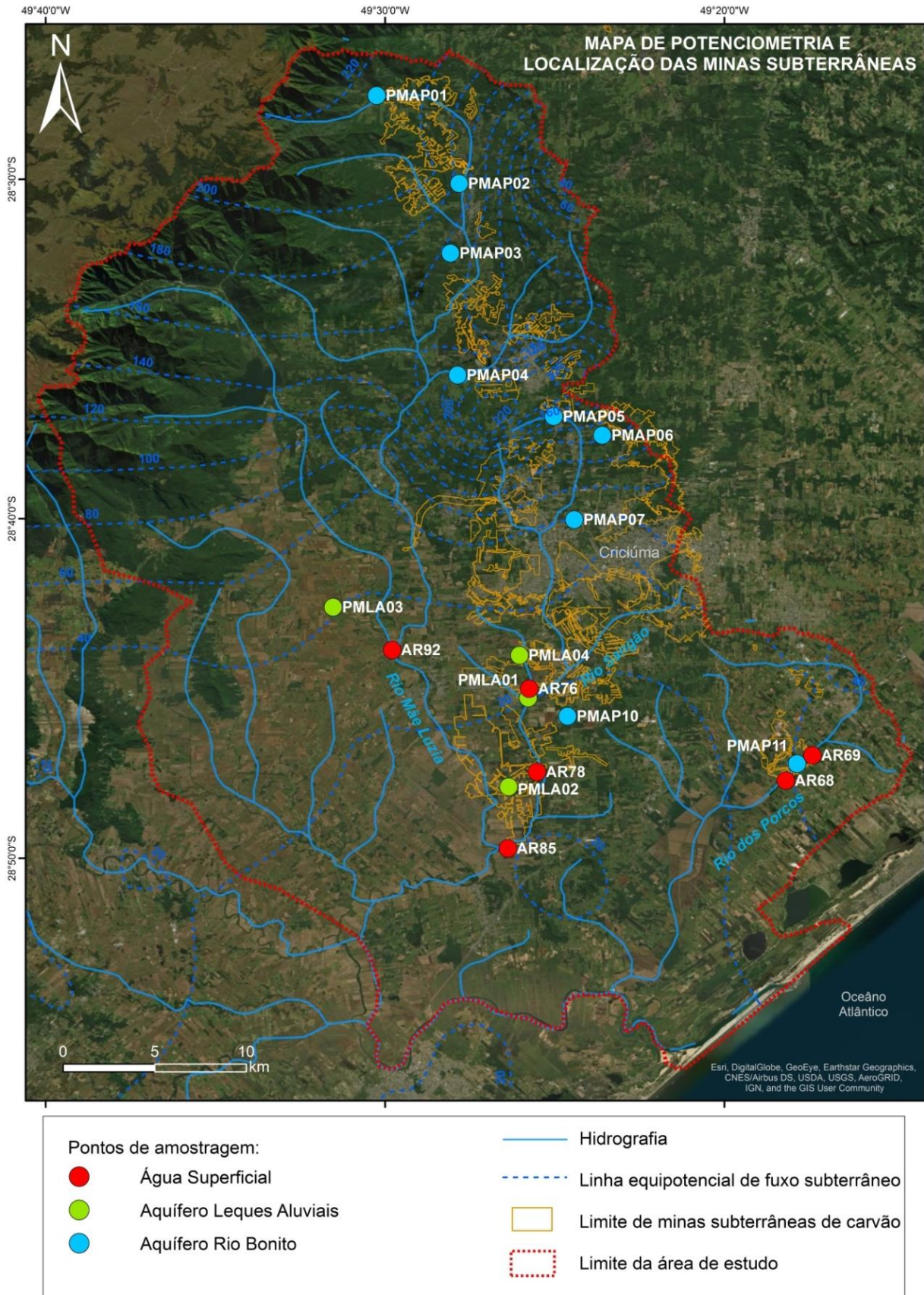


Figura 3 – Localização dos pontos de amostragem de água superficial e subterrânea (Aquíferos Rio Bonito e Leques Aluviais) e a localização das galerias de minas subterrânea. (modificado de DNPM, 2009). O mapa mostra as linhas equipotenciais do fluxo regional do aquífero Rio Bonito, com direção geral de NNW para SSE (modificado de Krebs, 2004).



Figura 4 – A) Afloramento das camadas arenosas da Formação Rio Bonito em área minerada a céu aberto (Município de Treviso; 22J 659299/6847967; CPRM, 2015); B) depósito de rejeitos da mineração do carvão sobre sedimentos cenozoicos na margem do Rio Maina (Município de Criciúma; 22J 653990/6827140; CPRM, 2009); C) amostragem de água subterrânea em poço de monitoramento pelo método de baixa vazão (Município de Siderópolis; 22J 654930/6833159; CPRM, 2017); D) medição dos parâmetros de qualidade e amostragem de água superficial no Rio Mãe Luzia (Município de Treviso; 22J 650496/6843484; CPRM, 2017).

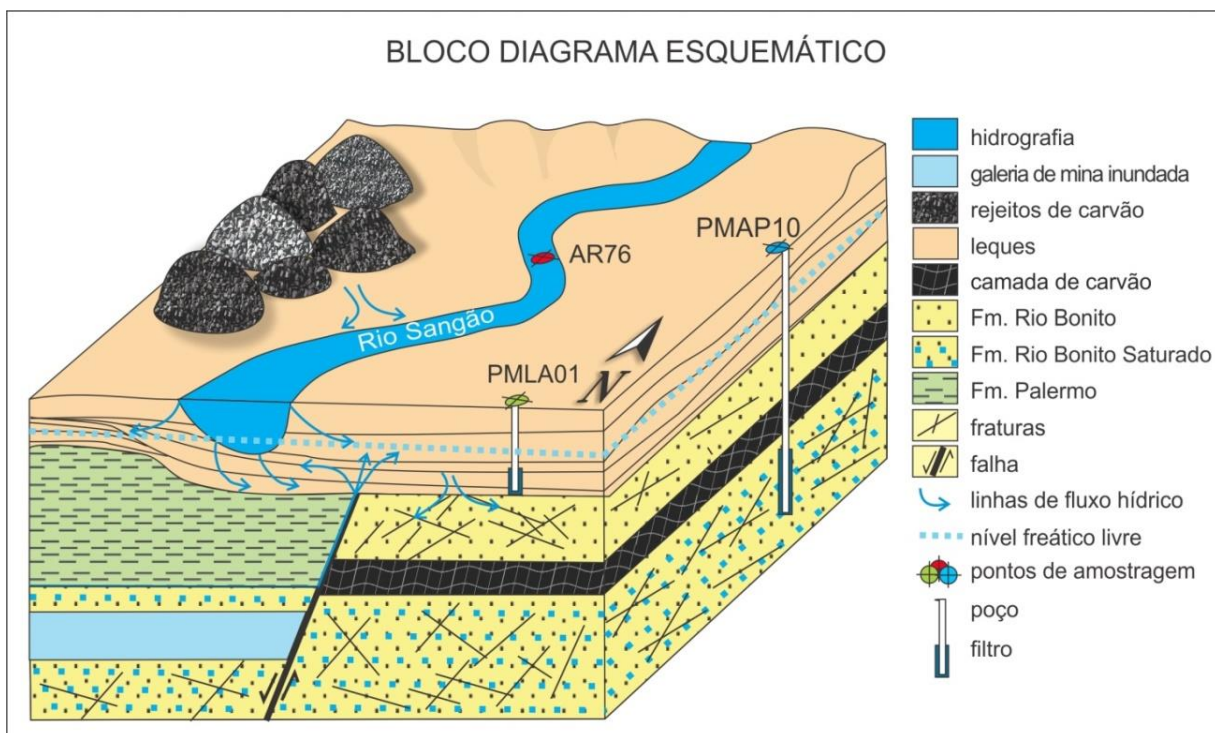


Figura 5 – Representação dos compartimentos hídricos (escoamento superficial e aquíferos de Leques Aluviais e Rio Bonito) presentes na área de estudo e sistemática de amostragem.

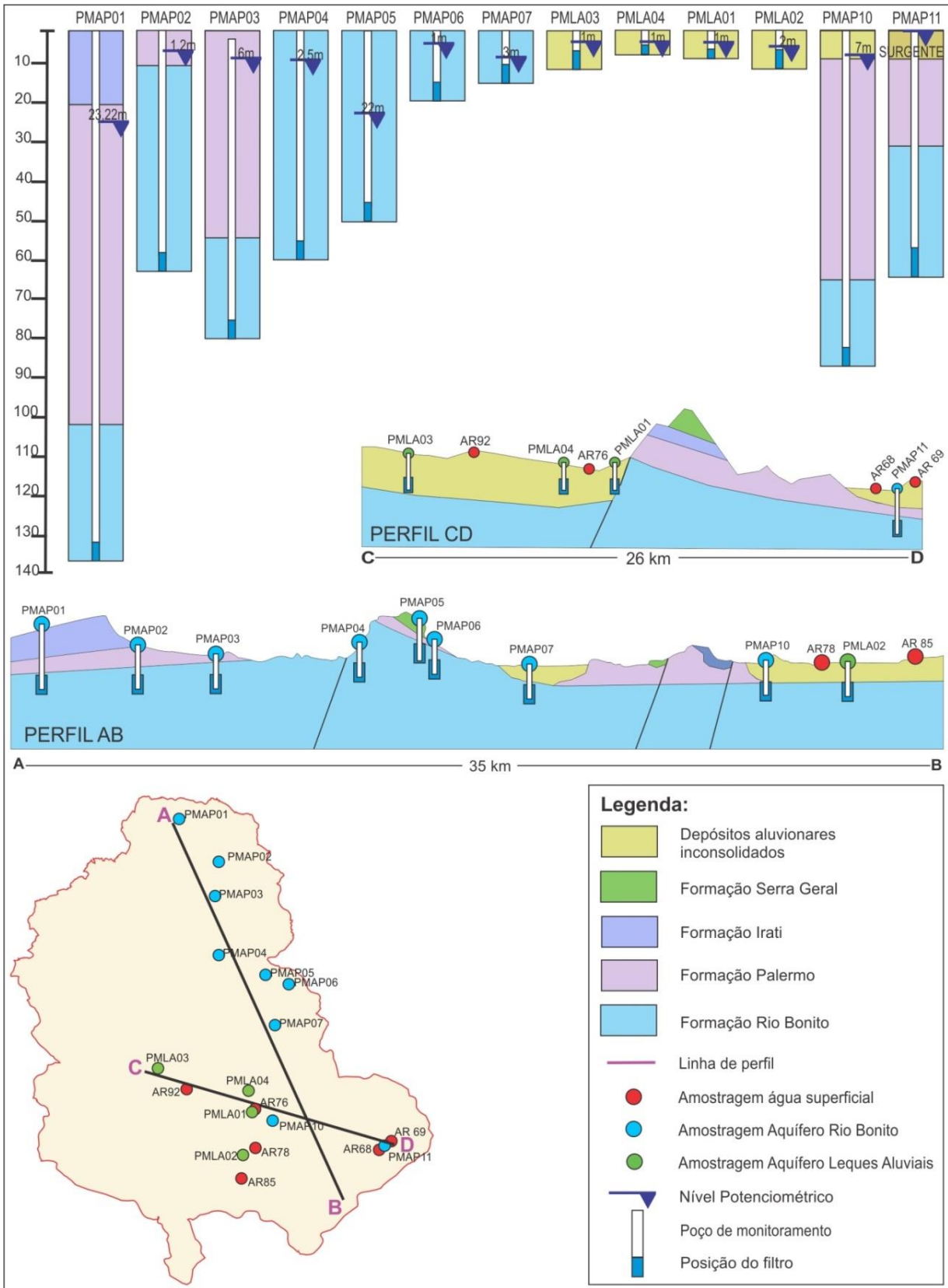


Figura 6 – Poços de monitoramento utilizados para amostragem de água dos Sistemas Aquíferos de Leque e do Sistema Aquífero Rio Bonito, com indicação do nível potenciométrico, profundidade do poço e litologias perfuradas. Representação esquemática da distribuição dos poços e dos pontos de amostragem superficial segundo os perfis AB e CD.

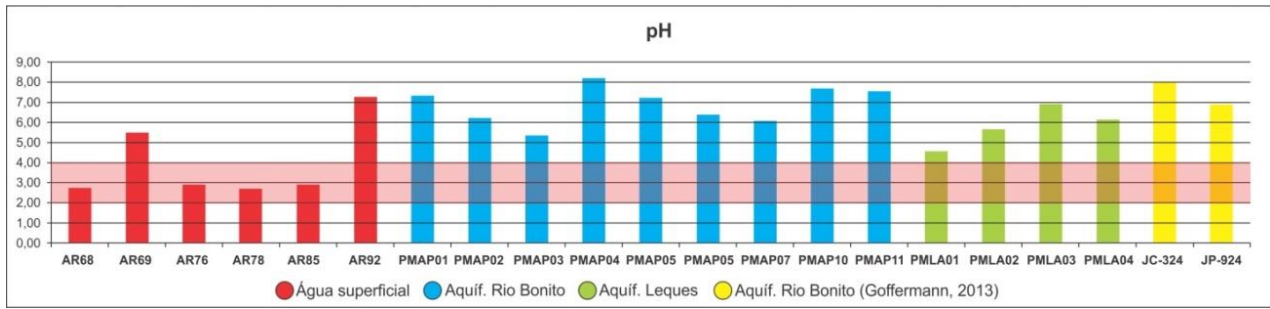


Figura 7 – Valores de pH para as amostras dos compartimentos hídricos da área de estudo. Área marcada pela coloração rosa representa a faixa de pH característico de drenagem ácida de mina para a região segundo (Farfan, 2004). Observa-se valores de pH característicos de drenagem ácida de mina nas amostras do compartimento superficial, com exceção do ponto AR69. As amostras de água subterrânea possuem valores de pH acima da faixa de influência.

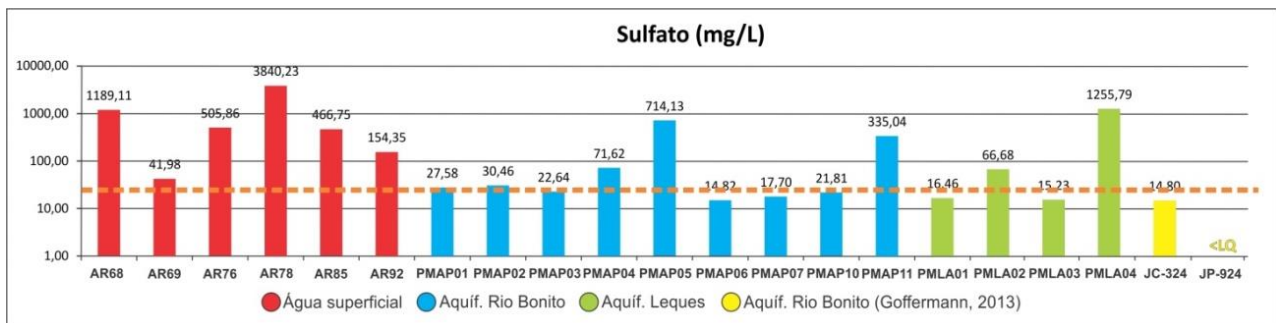


Figura 8 – Concentrações de sulfato das amostras analisadas. A linha pontilhada representa o limite máximo de concentração considerado para trechos de rio sem influência da mineração de carvão ($SO_4 < 25.0$ mg/L segundo Farfan et al., 2004). Observa-se que as amostras do compartimento superficial estão todas acima deste limite. As amostras dos leques possuem duas amostras acima do limite (PMLA02 e PMLA04). As amostras do sistema aquífero Rio Bonito possuem 3 amostras acima do limite (PMAP04, PMAP05 e PMAP11).

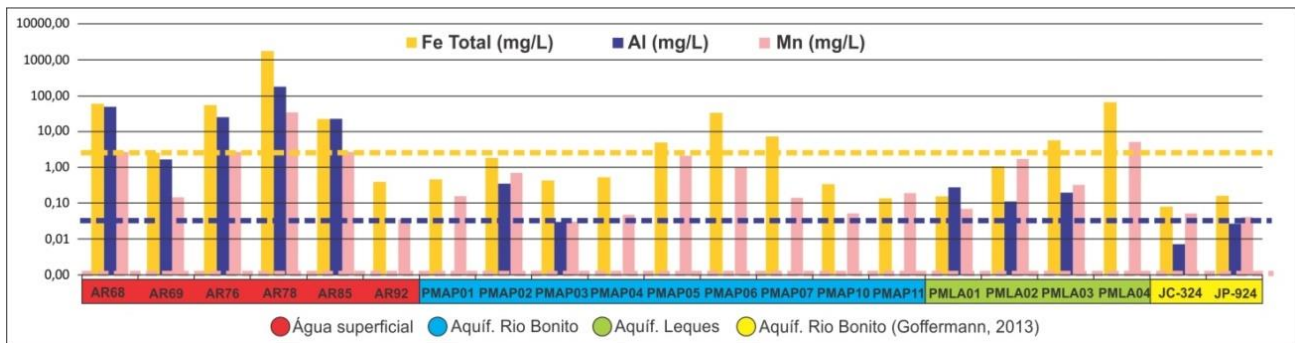


Figura 9 – Concentrações de Fe, Al e Mn totais das amostras analisadas. A linha pontilhada representa o limite máximo de concentração considerado para trechos de rio sem influência da mineração de carvão, ($Fe < 4.0$ mg/L, $Al < 0,5$ mg/L e Mn não detectado, conforme Farfan et al., 2004). De um modo geral, observa-se uma maior concentração destes metais nas amostras de água superficial, e menor concentração nas amostras do Aquífero Rio Bonito.

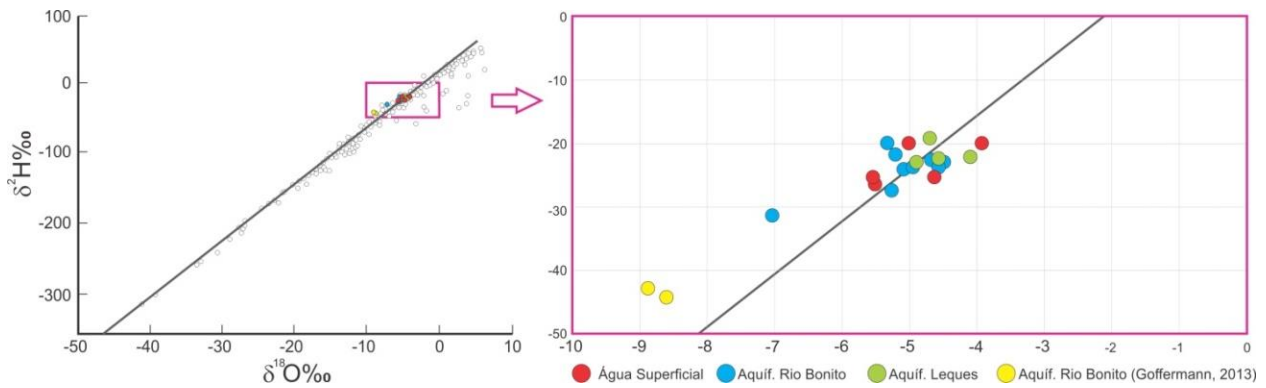


Figura 10 – Correlação entre as composições isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Rio Bonito, Sistema Aquífero de Leques Aluviais e águas superficiais. Observa-se que as amostras dos diversos compartimentos hídricos apresentam valores isotópicos relativamente próximos, definindo um campo único, e se ajustam a reta GMWL (Craig, 1961). Somente a amostra PMAP11 é diferenciada pois os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ são mais negativos ou isotopicamente mais leves em relação ao padrão SMOW.

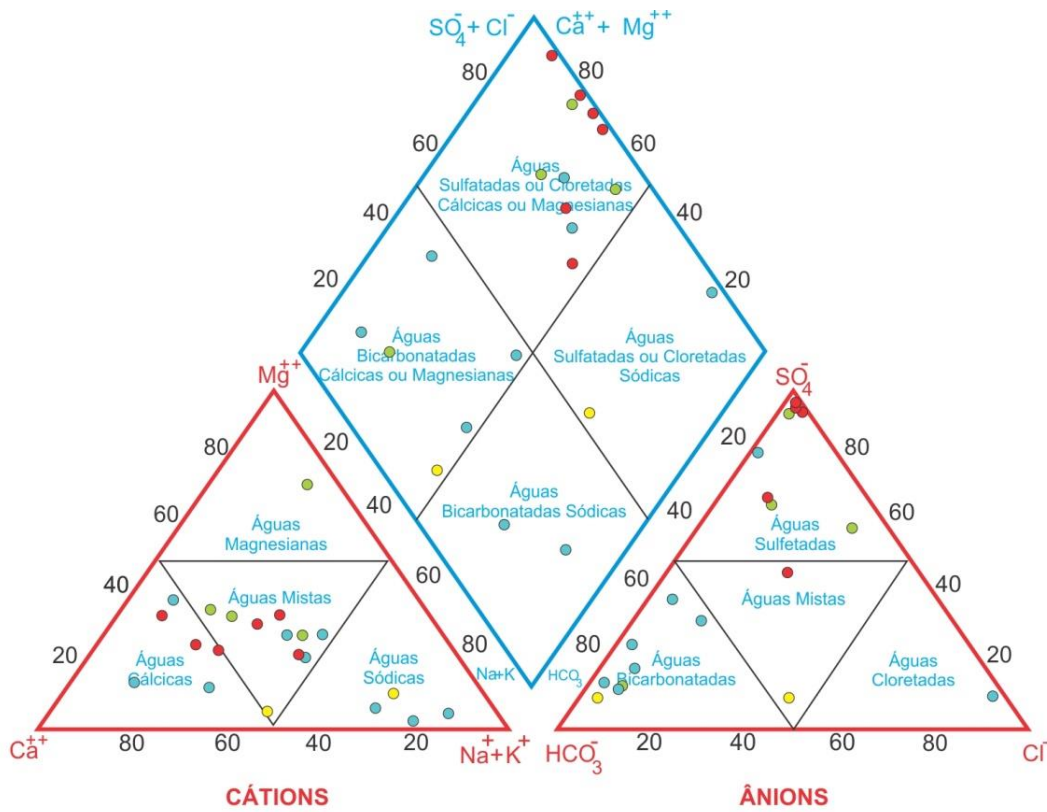


Figura 11 – Classificação hidroquímica das amostras analisadas segundo Diagrama de Piper (Mobus, 2002).

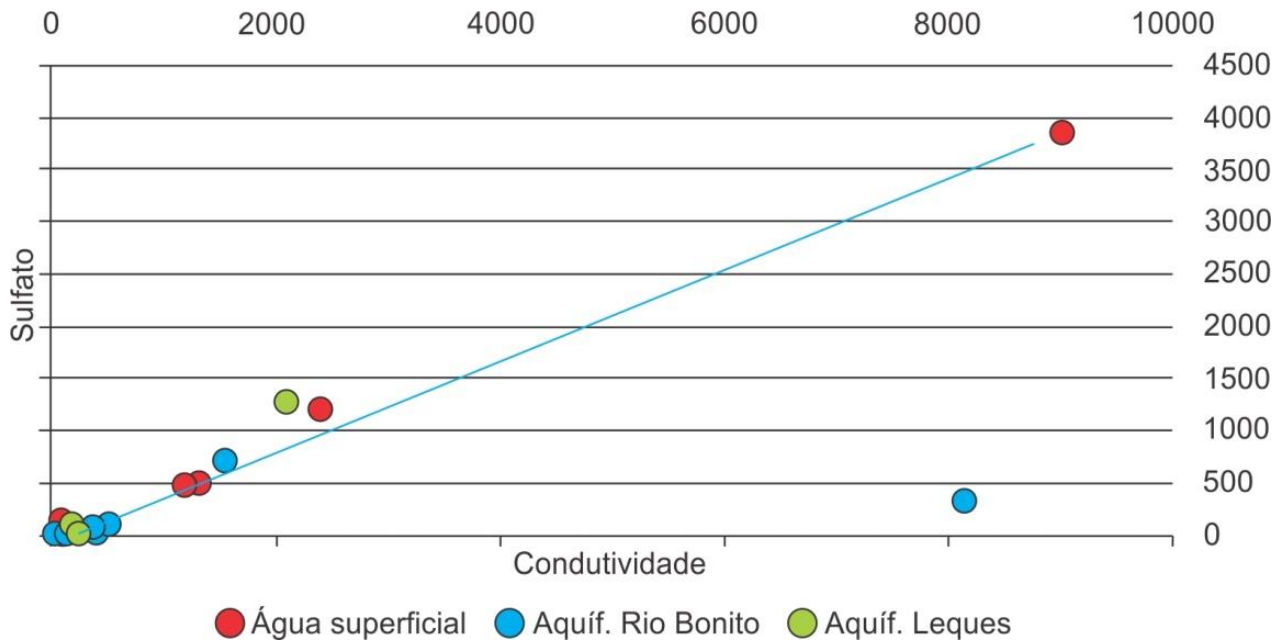


Figura 12 – Relação entre a condutividade elétrica e a presença de sulfato nas águas. Apenas na amostra PMAP11 a relação não é mantida, visto que este poço possui maior grau de confinamento, e a elevada condutividade está ligada a presença de sódio e cloreto, de origem discutível.

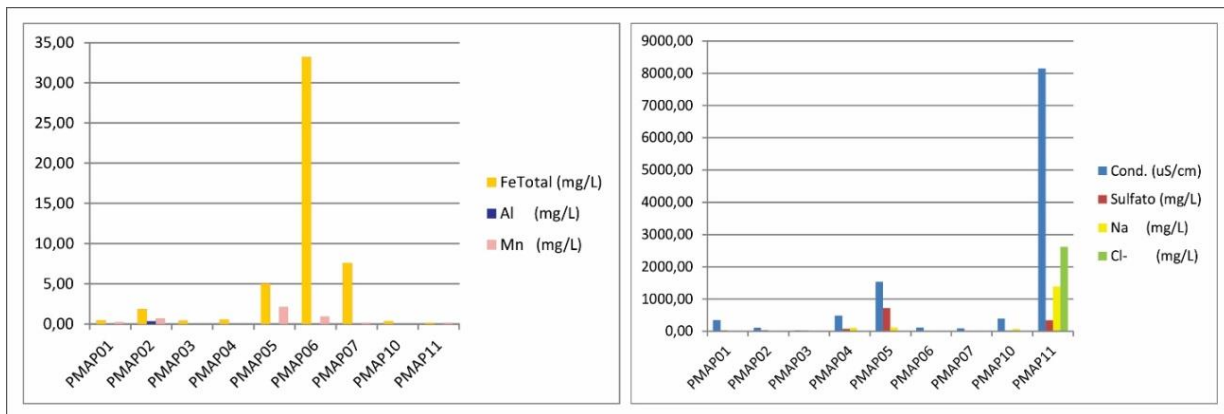


Figura 13 – A) Concentração de metais em águas superficiais; B) Condutividade elétrica, concentração de sulfato, cloreto e sódio nas amostras de água do Aquífero Rio Bonito.

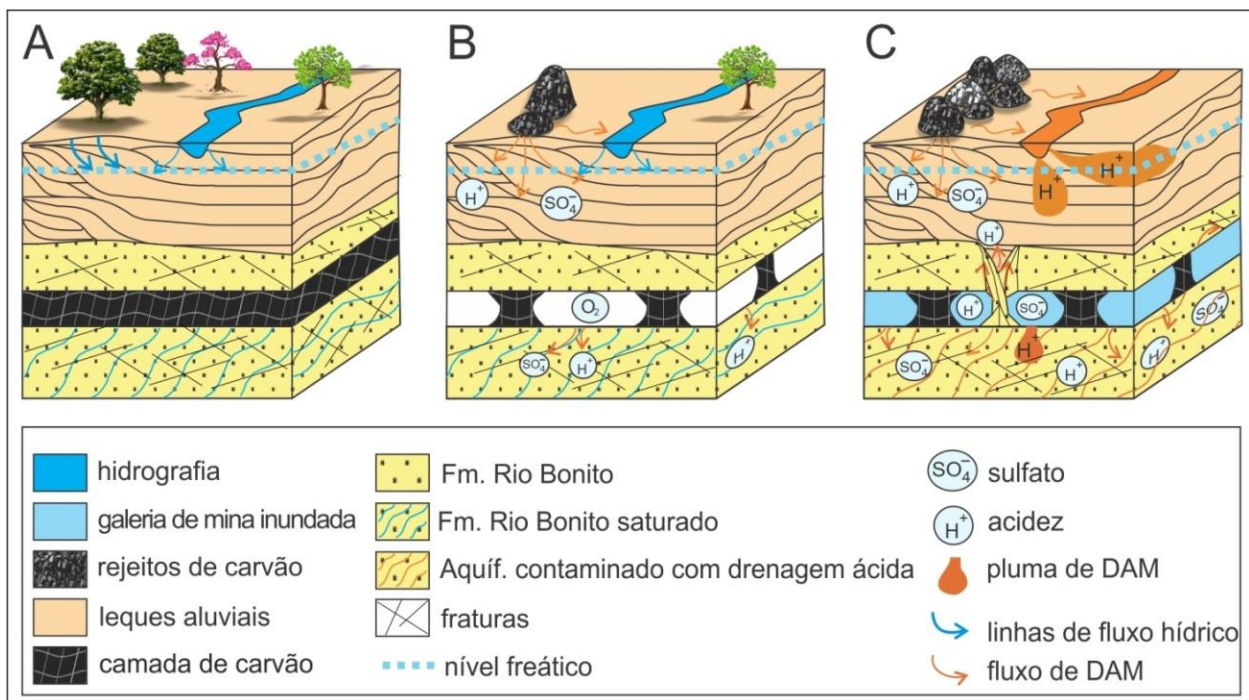


Figura 14 – Bloco diagrama esquemático da evolução da geração e migração da drenagem ácida de mina (DAM). A) Camada de carvão preservada, sem atividades de mineração; B) Instalação das galerias de mina para lavra subterrânea do carvão e exposição atmosférica dos rejeitos, com início dos processos de geração de drenagem ácida de mina (DAM). C) Fluxo e migração da drenagem ácida de mina (DAM) com processos interconexão dos sistemas aquíferos devido a abatimento das galerias, e degradação dos ambientes aquáticos.

Parâmetro	Rio sem influência da mineração de carvão	Rio com influência da mineração de carvão
pH	6,5 a 7,4	2,0 a 4,0
SO ₄ ⁻	8,0 a 25,0 (mg/L)	10 a 1000 (mg/L)
Fe total	<4,0 (mg/L)	10 a 100 (mg/L)
Al	0,2 a 0,5 mg/L	10 a 100 (mg/L)
Zn	ND	1,0 a 5,0 (mg/L)
Mn	ND	0,5 a 10 (mg/L)
Pb	ND	0,02 a 0,2 (mg/L)

Quadro 01 – Diferença dos parâmetros físico-químicos das águas do Rio Sangão em trechos com influência de drenagem ácida e sem influência da drenagem ácida (Farfan et al., 2004).

Poço	UTM E-N	Sistema Aquífero	Litologias perfuradas	Cota da Boca (m)	Profundidade Final (m)
PMAP01	22J 646700/6850778	Rio Bonito	Irati, Palermo, Rio Bonito	294	138
PMAP02	22J 650605/6845935	Rio Bonito	Palermo, Rio Bonito	157	64
PMAP03	22J 650141/6842158	Rio Bonito	Palermo, Rio Bonito	131	80
PMAP04	22J 650390/6835515	Rio Bonito	Rio Bonito	85	60
PMAP05	22J 654982/6833202	Rio Bonito	Rio Bonito	73	50
PMAP06	22J 657295/6832144	Rio Bonito	Rio Bonito	47	15
PMAP07	22J 655888/6827576	Rio Bonito	Rio Bonito	43	15
PMAP10	22J 655426/6816887	Rio Bonito	Palermo, Rio Bonito	22	8
PMAP11*	22J 666427/6814058	Rio Bonito	Palermo, Rio Bonito	9	62
PMLA01	22J 653550/6817903	Leques Aluviais	Depósitos aluvionares	19	8
PMLA02	22J 652548/6813079	Leques Aluviais	Depósitos aluvionares	20	1
PMLA03	22J 644256/6822962	Leques Aluviais	Depósitos aluvionares	40	11
PMLA04	22J 653159/6820235	Leques Aluviais	Depósitos aluvionares	22	7

Quadro 2 – Relação das amostras de água subterrânea analisadas nos poços de monitoramento da Bacia Hidrográfica do Araranguá (ver Figs. 1 e 2); (*) indica amostras de água posteriormente submetidas a processo de destilação em sistema fechado.

Estação Coleta	UTM E-N	Microbacia (Rio)	Descrição	Cota (m)	Vazão (L/s)
AR068*	22J 666048/6814482	dos Porcos	Drenagem secundária margem direita do Rio dos Porcos	9	13,5
AR069	22J 666189/6814170	dos Porcos	Rio dos Porcos à jusante do ponto AR068	9	100
AR076*	22J 653602/6818062	Sangão	Rio Sangão próximo da ponte rodoviária, na localidade de São Roque	19	614
AR078*	22J 653735/6813795	Sangão	Drenagem secundária da margem direita do Rio Sangão	14	9,5
AR085*	22J 652309/6810343	Sangão	Rio Sangão à montante do Rio Mãe Luzia	12	631
AR092	22J 647006/6820556	Mãe Luzia	Rio Guarapari à montante do Rio Mãe Luzia	27	708

Quadro 3 – Relação de amostras de água superficial analisadas na Bacia Hidrográfica do Araranguá (ver Figs. 1 e 2); (*) indica amostras de água posteriormente submetidas a processo de destilação em sistema fechado.

Ponto	AR068	AR069	AR076	AR078	AR085	AR092	PMAP01	PMAP02	PMAP03	PMAP04	PMAP05	PMAP06	PMAP07	PMAP10	PMAP11	PMLA01	PMLA02	PMLA03	PMLA04	JC-324	JP-924
Fuso	22J	22J	22J	22J	22J	22J	22J	22J	22J	22J	22J	22J	22J	22J	22J	22J	22J	22J	22J	21J	21J
UTM E	666048	666189	653602	653735	652309	647006	646700	650605	650141	650390	654982	657295	655888	655426	666427	653550	652548	644256	653159	755243	764888
UTM N	6814482	6814170	6818062	6813795	6810343	6820556	6850778	6845935	6842158	6835515	6833202	6832144	6827576	6816887	6814058	6817903	6813079	6822962	6820235	6640655	6638709
$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	-23,9	-20	-26,4	-25,4	-19,9	-25,4	-19,9	-21,7	-22,7	-27,3	-23,9	-23	-23,6	-24,2	-31,3	-19,1	-22,7	-22,2	-21,7	-44,6	-43,1
$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	-5,02	-3,94	-5,52	-5,54	-5,01	-4,63	-5,31	-5,2	-4,68	-5,26	-4,95	-4,48	-4,57	-5,08	-7,02	-4,71	-4,89	-4,57	-4,09	-8,59	-8,87
pH	2,75	5,49	2,91	2,72	2,94	7,28	7,33	6,21	5,35	8,19	7,24	6,39	6,07	7,69	7,56	4,56	5,66	6,92	6,14	8,02	6,90
Cond. (uS/cm)	2380,60	120,70	1314,40	9003,10	1183,80	87,40	350,60	108,50	25,50	481,90	1531,90	117,30	88,70	388,90	8140,80	74,60	159,80	218,80	2085,20	428,00	2020,00
Acidez (mg/L)	637,15	15,52	284,02	5655,76	272,06	3,94	13,89	41,09	58,22	0,00	11,24	62,64	55,91	5,57	6,53	76,36	104,77	20,47	181,44	N.A.	N.A.
Alcalin. (mg/L)	<LQ	32	<LQ	<LQ	<LQ	58,68	234,41	58,37	9,68	275,82	176,98	85,23	38,87	223,05	66,45	2,40	26,35	135,18	53,71	226,00	390,00
Sulfato (mg/L)	1189,11	41,98	505,86	3840,23	466,75	154,35	27,58	30,46	22,64	71,62	714,13	14,82	17,70	21,81	335,04	16,46	66,68	15,23	1255,79	14,80	<LQ
Cl ⁻ (mg/L)	27,58	17,16	16,83	49,91	14,74	16,37	3,63	2,71	3,00	5,19	6,91	4,41	5,97	10,28	2610,49	6,76	8,46	6,47	14,51	5,00	219,00
Ca (mg/L)	122,00	10,50	66,70	286,00	64,50	5,25	45,00	19,30	2,87	10,60	211,00	8,78	7,03	23,20	294,00	3,71	12,90	22,20	251,00	161,00	65,20
K (mg/L)	9,73	5,72	8,71	20,70	8,24	2,17	1,04	0,92	0,54	2,63	5,56	1,62	2,03	3,68	38,10	2,21	0,73	1,03	8,76	2,36	4,29
Na (mg/L)	15,13	12,45	24,01	253,28	33,49	5,35	8,07	3,34	3,56	106,00	122,00	17,40	10,30	71,50	1390,00	4,72	8,02	9,75	55,30	173,00	280,00
FeTotal (mg/L)	59,50	2,52	54,40	1770,00	23,10	0,41	0,46	1,83	0,43	0,54	5,04	33,20	7,58	0,33	0,14	0,16	1,06	5,81	66,10	0,08	0,16
Al (mg/L)	49,20	1,70	25,00	179,00	23,10	<LQ	<LQ	0,35	0,03	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,28	0,11	0,20	<LQ	0,01	0,03
Mn (mg/L)	2,69	0,14	2,78	35,10	2,65	0,04	0,16	0,71	0,03	0,05	2,12	0,94	0,15	0,05	0,20	0,07	1,74	0,32	5,28	0,06	0,04
Mg (mg/L)	42,20	3,94	17,50	138,00	17,30	3,26	19,60	1,94	1,40	1,80	24,20	5,65	2,69	2,60	3,45	2,01	6,12	10,10	114,00	6,82	19,00
Cu (mg/L)	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,03	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,01
Pb (mg/L)	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,08	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Zn (mg/L)	2,01	0,06	0,93	12,90	1,52	<LQ	0,05	0,03	0,09	0,04	0,09	0,03	0,05	0,03	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	N.A.	N.A.
Legenda:	Águas superficiais			Aquifero Rio Bonito			Aquifero Leques Aluviais			Aquifero Rio Bonito - Goffermann, 2013						<LQ: não detencato			N.A: não analisado		

Tabela 1 – Resultados das análises físico-químicas e valores de $\delta^2\text{H}$ e de $\delta^{18}\text{O}$ das amostras obtidas nos diferentes compartimentos hídricos; erros associados: $\delta^2\text{H}(\text{‰}) = 1.2$ e $\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.40$; mostras JC 324 e JP 924 são de Goffermann (2013) (ver Figs. 1 e 2). Análise dos metais Cd, As e Hg < Limite de detecção (LQ).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCM – Associação Brasileira de Carvão Mineral. (2016) Disponível em: http://www.carvaomineral.com.br/conteudo/gm_estatisticas/estatisticas_2016.pdf.

Acesso em: agosto. 2018.

ABNT. NBR 15.495-1 (2007) Poços de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Aquíferos Granulares – Parte 1: Projeto e Construção. Rio de Janeiro. 25 p.

Antunes, A.L.G. (2016) Caracterização Química e Isotópica das Águas Subterrâneas da Bacia Hidrográfica do Rio Almonda. Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa para obtenção de Mestrado no ramo da Geologia Aplicada, especialidade de Hidrogeologia, 78p.

ANEEL (2017) Atlas de Energia Elétrica do Brasil – Parte III – Fontes Não Renováveis - Agência Nacional de Energia Elétrica – disponível em www.aneel.gov.br, Acesso em agosto de 2018.

Belolli, M., Quadros, J., Guidi, A. (2002) História do Carvão de Santa Catarina/Criciúma: Imprensa Oficial do Estado de Santa Catarina

Campaner, V.P. e Luiz-Silva, W. (2009) Processos físico químicos em drenagem ácida de mina em mineração de carvão no sul do Brasil. Química Nova 32: 146-152.

Campaner, V.P., Luiz-Silva, W., Machado. Geochemistry of acid mine drainage from a coal mining area and processes controlling metal attenuation in stream waters, southern Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências (2014) 86(2):539-554.

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral (2005) Estudo Geológico – Hidrogeológico da lavra Subterrânea, Meta Física 1. Project CTENERG: ONG Terra Verde, CETEM, PROGERA. Agreement FINEP 01.02.0167.00

Christophe Lécuyer, Véronique Gardien, Thomas Rigaudier, François Fourel, François Martineau, Alexandre Cros, (2009) “Oxygen isotope fractionation and equilibration kinetics between CO₂ and H₂O as a function of salinity of aqueous

solutions”, *Chemical Geology*, Volume 264, Issues 1–4, 30 June 2009, Pages 122-126.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2017). Relatório Técnico de Perfuração de Poços de Monitoramento. Convênio nº 003/2014-SMCQ/MMA - Criciúma, SC. 2017. Documento Interno.

Dantas, M. E., Goulart, D. R., Jacques, P. D., Almeida, I. S., Krebs, A. S. J (2005) Geomorfologia aplicada à gestão integrada de bacias de drenagem: bacia do rio Araranguá (SC), zona carbonífera sul-catarinense. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 16. João Pessoa, PB., Anais. João Pessoa, PB: ABRH. 74p. CD Rom.

DNPM e SIECESC 2009. Mapa das áreas mineradas em subsolo da Região Carbonífera de Santa Catarina. DNPM/SC. – Não publicado.

François Martineau, François Fourel, Anne-Marie Bodergat, Christophe Lécuyer, “D/H equilibrium fractionation between H₂O and H₂ as a function of the salinity of aqueous solutions”, *Chemical Geology*, Volume 291, 6 January 2012, Pages 236-240.

GARD Guide, 2014. Global Acid Rock Drainage Guide.

Grupo Técnico de Assessoramento GTA (2018) 11º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais. Volume 1. Ação Civil Pública nº 93.8000.533-4. Processo de cumprimento de sentença nº 2000.72.04.002543-9

Kendall C., Caldwell, E. (1998) *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Elsevier Science B.V., Amsterdam. Pp 51-86.

Krebs A.S.J. (2004) Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Araranguá, SC. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina. <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/284>. Accessed 30 April 2018

Krebs, A.S.J., Scheibe, L.F., Gomes, C.J.B. (2004). Caracterização hidrogeológica do aquífero relacionado aos depósitos de leques aluviais na bacia do Rio Araranguá-SC, *In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. Cuiabá-MT.

Krebs, A.S.J., Gomes, C.B.J. (2005) Caracterização hidroquímica das águas do aquífero Rio Bonito na Região Carbonífera de Santa Catarina. *In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos: João Pessoa. Anais. João Pessoa, 2005, v. 16*

Krebs, A.S.J., Possa, M.V. (2008) O papel da hidrogeologia como instrumento de gestão ambiental na mineração de carvão. *In: Soares O.S., Santos MDC, Possa M.V. (eds) Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, pp 109-127*

Leão, M.I., Krebs, A.S.J. (2017) Estudo da conexão entre águas subterrâneas e superficiais usando traçador na área do Campo Vila Funil, Siderópolis-SC, V CBCM.

Lécuyer, Elsevier Science B.V. Véronique Gardien, Thomas Rigaudier, François Fourel, François Martineau, Alexandre Cros, "Oxygen isotope fractionation and equilibration kinetics between CO₂ and H₂O as a function of salinity of aqueous solutions", *Chemical Geology, Volume 264, Issues 1–4, 30 June 2009, Pages 122-126.*

Machado, J.L.F. (1997) Mapa hidrogeológico escala 1:250.000 da Folha de Criciúma. Porto Alegre CPRM.

Machado, J. L. F. e Freitas, M.A. (2005) Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul: relatório final. Porto Alegre: CPRM.

Mobus, G. (2002) Qualigraf: programa para análise da qualidade da água. Fortaleza: FUNCENE.

Milani, E.J. (1997) Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental. 2v. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Ernandes, L.A., França, A.B. (2007) Bacia do Paraná. *In: Cartas Estratigráficas. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287.*

Monteiro, J.P., Silva, J.M., Guerreiro, P., Martins, J., Reis, E. (2007) Modelação de Relações Entre Águas Superficiais e Subterrâneas nos Aquíferos do Algarve

Central. Artigo apresentado no Seminário sobre Águas Subterrâneas. Lisboa, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos.

Mühlmann, H., Schneider, R.L., Tommasi, E., Medeiros, R.A., Daemon, R.F., Nogueira, A.A. (1974) Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. Ponta Grossa: PETROBRÁS/DESUL. 186 p. (Relatório DESUL, 444).

Petry, T. S. (2017) Geologia estrutural aplicada à mineração subterrânea de carvão: Mina D, Araranguá, SC. IGEO/UFRGS

Ravazzolil, C (2013) A Problemática Ambiental do Carvão em Santa Catarina: Sua Evolução até os Termos de Ajustamento de Conduta Vigente entre os Anos de 2005 e 2010.

Souza, V. P. "Drenagem ácida, aspectos ambientais: uma revisão." CETEM (2015).

Virgili, J.C.; Vianna, A.P.P. (2000) Gestão integrada de águas superficiais e subterrâneas para empreendimentos minerários, 1st Joint World Congress on Groundwater, Fortaleza, Ceará.

White, I.C. (1908) Relatório final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil. Rio de Janeiro: DNPM, 1988. Parte I, p.1-300; Parte II, p. 301-617.