

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

**AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO PROVENIENTE DA MINERAÇÃO DE
CARVÃO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
ARARANGUÁ – SC**

ANGELA DA SILVA BELLETTINI

ORIENTADOR – Prof. Dr. Artur Bastos Neto

COORIENTADOR – Prof. Dr. Antonio Pedro Viero

Volume 1

Porto Alegre – 2019

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

**AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO PROVENIENTE DA MINERAÇÃO DE
CARVÃO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
ARARANGUÁ – SC**

ANGELA DA SILVA BELLETTINI

ORIENTADOR – Prof. Dr. Artur Bastos Neto

COORIENTADOR – Prof. Dr. Antonio Pedro Viero

BANCA EXAMINADORA

Dr. Marcos Alexandre de Freitas – Serviço Geológico do Brasil - CPRM

Prof. Dr. Ari Roisenberg – Universidade do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Clovis Gonzatti - Universidade do Rio Grande do Sul

Dissertação de Mestrado apresentada como
requisito parcial para a obtenção do Título de
Mestre em Ciências.

Porto Alegre – 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Bellettini, Angela da Silva

Avaliação da contaminação proveniente da mineração de carvão nas águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá - SC. / Angela da Silva Bellettini - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2019. [65 f.] il.

Dissertação (Mestrado).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2019.

Orientador: Artur Bastos Neto

Coorientador: Antonio Pedro Viero

1. Água subterrânea. 2. Contaminação. 3. Hidrogeoquímica. 4. Região carbonífera de SC. 5. Bacia do Paraná. I. Título.

CDU 556.3

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Miriam Alves

CRB 10/1947

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre - RS - Brasil

CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001.

Fone: +55 51 3308-6329 Fax: +55 51 3308-6337

E-mail: bibgeo@ufrgs.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Dr. Antonio Pedro Viero e Dr. Artur Bastos Neto, por terem me orientado e, assim, propiciado a realização desta dissertação.

À Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Serviço Geológico do Brasil - CPRM) por possibilitar a minha participação no mestrado em Geociências, mesmo em meio a demandas de trabalho.

Ao Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann pela orientação sobre a estrutura do artigo científico apresentado nesta dissertação, bem como pelos ensinamentos e dicas para a carreira científica.

Aos colegas do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, especialmente às Geólogas Andrea Sander, Carla Klein, Isadora Aumond Kuhn e ao Geólogo Marlon Hoelzel, pelas discussões, pela paciência e pelo apoio durante o período do mestrado.

À colega Ana Lúcia B. F. Coelho pelo apoio com as referências bibliográficas.

Ao colega de profissão, Geólogo Gustavo Simão, pelas trocas de ideias e pelo auxílio com as referências bibliográficas.

À minha professora de Inglês, Juliana Cunha Fontoura, que, mesmo à distância, auxiliou-me, durante todo o período, com dificuldades relacionadas à Língua Inglesa.

Ao meu irmão, Adilson da Silva Bellettini, e aos amigos, pela paciência e pelo incentivo.

Aos meus pais, Rosangela da S. Bellettini e Vilson P. Bellettini, pelo apoio, pelo incentivo e por me ensinarem o valor do aprendizado na vida profissional e na pessoal. E, acima de tudo, a Deus, que me propiciou saúde, colocou amigos no meu caminho e que permitiu aprendizados importantes durante a jornada.

RESUMO

A água subterrânea é uma reserva natural essencial de água doce no mundo. No entanto, o crescimento populacional e econômico, em vários países, vem causando a contaminação de muitos reservatórios, como aquíferos de importância mundial, alguns situados na Bacia do Paraná. Atualmente, o avanço dos recursos tecnológicos e a diminuição de água superficial potável de fácil acesso têm alavancado melhorias e suscitado o interesse pelo monitoramento ambiental de águas subterrâneas. Nesse contexto, o aquífero Rio Bonito da Bacia do Paraná, que ocorre também na Região Carbonífera do Estado de Santa Catarina (Brasil) e na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, tem sido muito utilizado para o abastecimento de água, por diversos setores da sociedade, apresentando riscos de contaminação. A região carbonífera é conhecida pela mineração de carvão e pelos cuidados mínimos com o meio ambiente que levaram a grandes passivos ambientais, como pilhas de rejeitos e/ou estéril, bocas de mina, entres outros, que impactam o solo e os recursos hídricos. Neste estudo, dados químicos de nove poços de monitoramento no aquífero Rio Bonito e quatro poços no aquífero formado por leques aluviais foram tratados e interpretados a partir de diagramas binários de variação, modelamento hidrogeoquímico, interpretação de imagens remotas e correlações com a geologia e a mineração do local. A geologia local também foi analisada pelo estudo de lâminas petrográficas de amostra de calha de poço de monitoramento e de testemunhos de sondagem armazenados no Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Isso resultou na identificação de quatro tipos de águas subterrâneas que circulam no aquífero de topo e na base da camada de carvão Barro Branco, sendo este de tipo fraturado, com diferentes características hidrogeoquímicas, devido a processos de interação água/rocha e à contaminação pelas minas de carvão. Os poços nos leques aluviais mostraram uma água com características bem distintas entre eles e as águas subterrâneas captadas no Rio Bonito. Os poços de monitoramento estão localizados perto das minas, sendo que o PMAPAR05, o PMLAAR02 (PMALAR02B) e o PMLAAR04 mostraram contaminação por sulfato de mineração de carvão. Os resultados indicam que os aquíferos Rio Bonito e Leques Aluviais, na região estudada, estão contaminados por mineração de carvão, com altos níveis, em áreas limitadas, e que não apresentam melhoras significativas ao longo do tempo. A qualidade da água subterrânea registrada no monitoramento ambiental, a grande quantidade de dados ao longo do

tempo e a diversidade de parâmetros analisados demonstram a importância de estudos de monitoramento da água subterrânea para a gestão de seu uso e para a mitigação da contaminação, bem como para a prevenção de novas áreas com passivos ambientais de mineração de carvão.

ABSTRACT

Groundwater is an essential natural reserve of fresh water in the world. Nevertheless, population and economic growth in many countries has caused the contamination of many reservoirs and aquifers of global importance, some of which located in the Paraná Basin, Brazil. Nowadays, technological advances and the decrease of surface accessible drinking water have promoted improvements and the interest environmental groundwater monitoring. In this context, the Rio Bonito Aquifer in the Paraná Basin, which extends to the Carboniferous Region in Santa Catarina state (Brazil) and to the Araranguá Hydrographic Basin, has been highly used as the water supply in several areas and presents risks of contamination by coal mining.

The carboniferous region is known for coal mining and lack of minimal environmental care for the environment has led to large environmental liabilities such as piles of rejects and mine openings, that have impacted the soil and water resources. In this study, hydrochemical data from nine monitoring wells from the Rio Bonito Aquifer and four monitoring wells from the phreativ aquifer formed by alluvial fans were treated and interpreted based on binary variation diagrams, hydrogeochemical modeling, remote image interpretation and comparison with local geology and mining.

The local geology was also analyzed studied through analysis in thin section of sandstone samples from monitored well and drill cores made available by the Brazilian Geological Survey - CPRM. The executed analysis resulted in the identification of four groundwater types circulating in the sandstones aquifer at the top and base of Barro Branco coal layer with different hydrogeochemical characteristics due to the processes of water/rock interaction and contamination by the coal mines. In addition, it has been characterized that the sandstones at the base and top of the coal layer have no intergranular porosity and so have fractured aquifer behaviour. The wells in the alluvial fans aquifer presented water with very distinct characteristics among themselves and the groundwater from Rio Bonito Aquifer. The monitoring wells are located near to the mines and only PMAPAR05, PMLAAR02 (PMALAR02B), and PMLAAR04 have sulfate contamination from coal mining. The results indicate that the Rio Bonito and alluvial aquifers in the studied region are contaminated by coal mining with high levels in restricted areas and did not show improvements over time.

The groundwater quality recorded in environmental monitoring, the large amount of data collected over time and the diversity of the analyzed parameters show the importance in studying groundwater monitoring for water usage and management and

mitigation of contamination, as well as the prevention of coal mining environmental liabilities in new areas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da Região Carbonífera de Santa Catarina.....	16
Figura 2 - Mapa Geológico da Região Carbonífera de Santa Catarina.....	20
Figura 3 - Mapa Geológico da Área de Estudo.....	22
Figura 4 - Mapa Hidrogeológico da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá.....	29
Figura 5 - Fotos dos testemunhos de sondagem ARASC09, ARASC10 e ARASC14 armazenados na CPRM.....	34
Figura 6 - Fotomicrografias das lâminas petrográficas dos testemunhos de sondagem.....	35
Figura 7 - Localização dos poços situados no aquífero dos leques aluviais e as áreas com minas de carvão.....	38
Figura 8 – Diagramas de variação binária dos parâmetros referente aos poços PMLAARs.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações dos poços de monitoramento.....	17
Tabela 2 - Coluna estratigráfica da região carbonífera de Santa Catarina.....	19
Tabela 3 - Valores médios dos metais pesados nas camadas de carvão da Região Carbonífera de Santa Catarina.....	27
Tabela 4 - Tabela de parâmetros analisados no monitoramento ambiental de águas subterrâneas da Bacia Carbonífera.....	30
Tabela 5 - Média, mínimo (min), máximo (max) e desvio padrão (dp) dos dados coletados nos poços do aquífero de leques aluviais na Região Carbonífera de Santa Catarina.....	39
Tabela 6 - Lista de Valores Máximos Permitidos (VMP) e limites de quantificação (LQ) da Resolução CONAMA 396-08 para os parâmetros de água subterrânea coletados no monitoramento da região Carbonífera de Santa Catarina.....	42

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
Sobre a estrutura da dissertação	12
1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.2 Justificativa	14
2. A ÁREA DE ESTUDO	16
2.1. Aspectos Gerais e Localização da Área de Estudo	16
2.2. Geologia	18
2.3. Geologia Estrutural	26
2.4. Aspectos Geoquímicos do Carvão Mineral de Santa Catarina	27
2.5. Hidrogeologia	28
2.6. Drenagem Ácida de Mina	33
3. Metodologia	34
4. Artigo	37
5. Resultados e Discussões complementares	34
5.1 Descrição das lâminas petrográficas dos testemunhos de sondagem	34
5.2 Poços de monitoramento nos Leques Aluviais	37
6. Considerações Finais	43
REFERÊNCIAS	45
ANEXOS	49

Sobre a estrutura da dissertação

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno de artigo submetido ou publicado em periódicos ou publicações equivalentes. Consequentemente, sua organização compreende as seguintes partes principais:

- a) Introdução sobre o tema e descrição do objetivo da pesquisa, em que estão sumarizados os objetivos e o estado da arte sobre o tema de pesquisa.
- b) Artigo submetido a periódico com corpo editorial permanente e revisores independentes. No caso em pauta o artigo foi submetido ao periódico Journal of Environmental Earth Sciences (Editora Springer).
- c) Resultados e Discussões complementares, dados e interpretações que não constam no artigo.
- d) Anexos, compreendendo tabelas de dados e figuras dos perfis dos poços de monitoramento e dos testemunhos analisados.

1. INTRODUÇÃO

Desde o início da história do planeta Terra é evidente a importância da água, com o aumento populacional, o desenvolvimento econômico e a mudança nos padrões de consumo à demanda global por água tem aumentado, principalmente água potável. Com isso, cresce no mundo a preocupação com a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, demonstrando o interesse crescente de pesquisadores, governantes e sociedade civil sobre a contaminação e poluição dos reservatórios naturais.

Dentro deste contexto, FOSTER *et al.* (1993) constatou que na América Latina e no Caribe a proteção dos aquíferos não era considerada relevante, provavelmente porque a migração dos poluentes da superfície para as águas subterrâneas é um processo lento e na época os recursos de monitoramento de aquíferos eram muito escassos. Entretanto apesar de na maioria dos casos o processo ser lento, atualmente o salto nos recursos tecnológicos e a diminuição de água superficial potável de fácil acesso tem alavancado melhorias e o interesse no monitoramento ambiental de águas subterrâneas.

No sul do Brasil, situa-se a Bacia do Paraná, a qual possui reservatórios de água subterrânea de grande extensão, como o aquífero Guarani, o Rio Bonito, entre outros (ARAUJO *et al.*, 1999; CAMPOS, 2000; WILDNER *et al.*, 2014). No Estado de Santa Catarina, afloram rochas da Formação Rio Bonito, como as camadas de carvão mineradas desde o século XIX.

A região é conhecida como Bacia Carbonífera do Sul de Santa Catarina e engloba as bacias hidrográficas do Rio Araranguá, do Rio Urussanga e do Rio Tubarão. Elas passaram por fases de alta exploração de carvão mineral por empresas estrangeiras, no início e durante a Primeira Guerra Mundial, crescendo a atuação de empresas nacionais, a partir da crise do Petróleo, em 1973. Entretanto, em outros momentos, houve a redução da produção de carvão, acarretando falência de algumas empresas. Os principais métodos de lavra adotados na bacia carbonífera foram lavra a céu aberto e subterrânea (KOPPE; COSTA, 2008).

Os métodos de exploração de carvão geraram, na região, um grande passivo ambiental, com diversas áreas contaminadas com pilhas de rejeitos e estéril expostos. Formaram-se também passivos de bocas de minas, caimentos e rios com drenagem ácida. Com isso, a região foi considerada pela SEDUMA (Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente), em 1997, como uma das mais críticas no

Estado de Santa Catarina em relação à disponibilidade hídrica, pois 2/3 dos seus rios encontravam-se poluídos (KREBS; POSSA, 2008).

Nesse contexto, a região foi submetida à sentença nº 20.097 (2000) em decorrência da ação civil pública nº 93.8000533-4 de Autoria do Ministério Público Federal. Essa ação condenou solidariamente as empresas carboníferas de Santa Catarina e a União como responsáveis pela recuperação da degradação ambiental provenientes do setor de carvão mineral no Sul de Santa Catarina.

Com o propósito de avaliar as áreas recuperadas pela mineração de carvão, foi criado junto ao Ministério Público um Grupo Técnico de Assessoramento à ação civil pública citada anteriormente. Participam desse grupo 19 instituições, como as empresas condenadas, os órgãos fiscalizadores e outras instituições da região. O Serviço Geológico do Brasil - CPRM faz parte deste grupo e tem como função principal monitorar ambientalmente os recursos hídricos da bacia carbonífera do sul do Estado de Santa Catarina.

No Monitoramento Ambiental da Bacia Carbonífera, a CPRM coleta dados de águas superficiais, incluindo drenagem ácida de bocas de mina; e águas subterrâneas, nas bacias hidrográficas do Rio Araranguá, do Rio Urussanga e do Rio Tubarão. O monitoramento foi iniciado em 2006, mas existem dados desde 2002 de outras instituições, totalizando, assim, um banco de dados, contendo 34 campanhas de águas superficiais, 15 campanhas de águas subterrâneas e 16 campanhas de drenagem ácida de bocas de mina. No monitoramento subterrâneo da bacia carbonífera, foram projetados 37 poços de monitoramento, sendo que apenas 28 encontram-se em operação.

1.1 Objetivos

Com o intuito de aprimorar este projeto, realizou-se uma avaliação e se aplicou uma metodologia de análise e interpretação dos dados de qualidade das águas subterrâneas de 13 poços de monitoramento coletados pela CPRM, para observar a extensão, a intensidade e os efeitos da contaminação, nas águas subterrâneas, na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá. Considerando os objetivos específicos, o trabalho visa avaliar se os poços de monitoramento instalados são suficientes para o dimensionamento adequado do problema e verificar a contaminação pela mineração de carvão, nos aquíferos monitorados na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá.

1.2 Justificativa

A análise e a interpretação de dados de monitoramento das águas subterrâneas são importantes e necessárias para avaliação, de forma tecnicamente consistente, do impacto ambiental causado pela mineração de carvão nos aquíferos da região em termos de extensão (área de abrangência) e intensidade (tipo e concentração de contaminantes), bem como a sua evolução ao longo do tempo.

Destaca-se que o trabalho utiliza os dados históricos, possibilitando o aprofundamento dos conhecimentos e dando visibilidade a esses dados. Além disso, o estudo atende demandas da sociedade civil, de usuários dos recursos hídricos subterrâneos. A caracterização da bacia hidrográfica do Rio Araranguá auxiliará na tomada de decisões sobre o monitoramento e sobre os projetos de recuperação ambiental.

2. A ÁREA DE ESTUDO

2.1. Aspectos Gerais e Localização da Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá (BHRA) faz parte da região hidrográfica nacional do Atlântico Sul com uma extensão territorial de 3089 km² (limite atualizado SDS/DRHI, 2013/2015), calculada com o software ArcMap versão 10.6.1. Os poços de monitoramento estudados estão situados na porção nordeste da BHRA, na porção englobada na Região Carbonífera de Santa Catarina (RCSC), localizadas no sul do Estado de Santa Catarina (Brasil), conforme a figura 1.

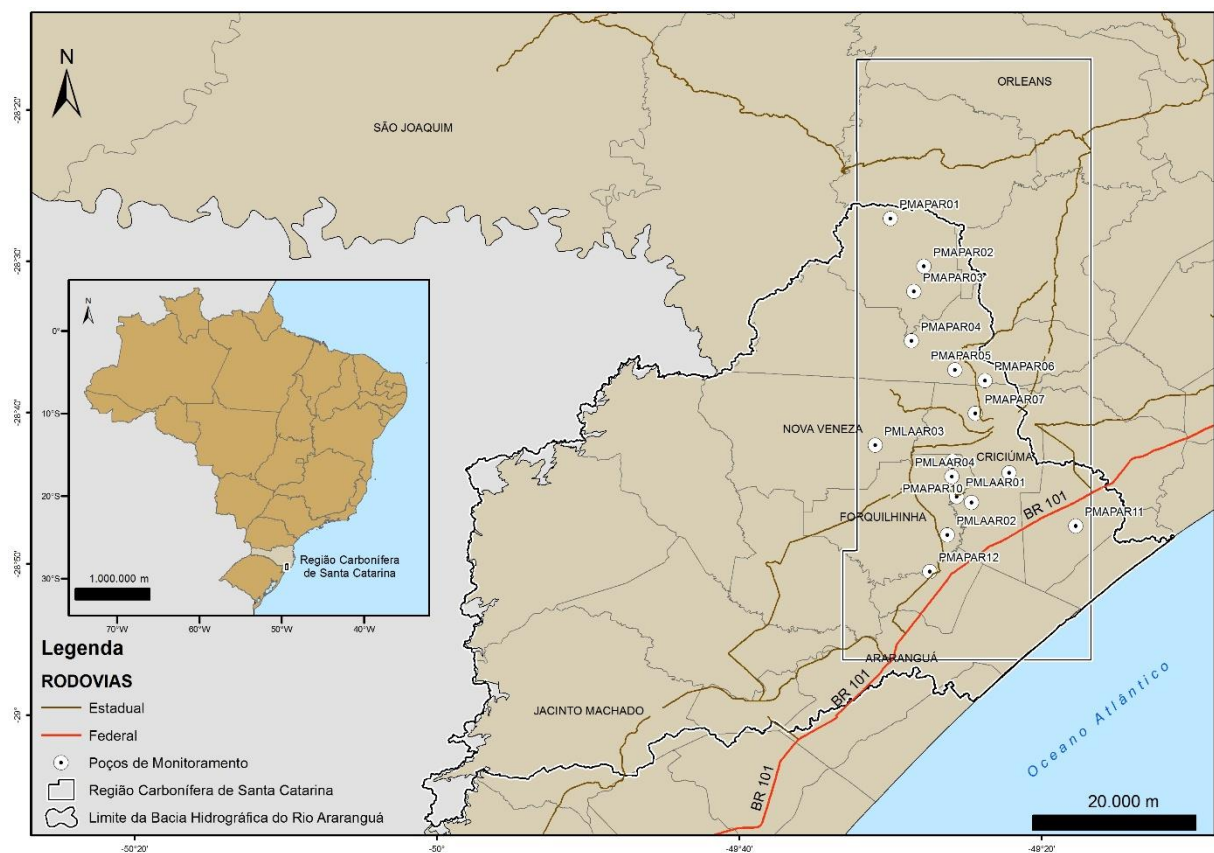


Figura 1. Figura de localização da Região Carbonífera de Santa Catarina.

Os poços de monitoramento encontram-se nos municípios de Forquilhinha, Criciúma, Içara, Nova Veneza, Siderópolis e Treviso, estando situados nas coordenadas UTM descritas na tabela 1. A principal via de acesso à área de estudo é pela BR-101, rodovia federal de direção N-S, a partir de Florianópolis (sentido norte para sul), capital do Estado de Santa Catarina ou de Porto Alegre (sentido sul para norte), capital do Estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 1 Informações dos poços de monitoramento, datum SIRGAS 2000 (SGB, 2018).

Poços de Monitoramento	Coord. E	Coord. N	Ano	Aquífero	Profundidade (m)	Perfil construtivo	Nível do filtro (m)
PMAPAR01	646908	6851787	2008	Rio Bonito	139	–	–
PMAPAR02	650470	6845886	2009	Rio Bonito	65	x	55 - 65
PMAPAR03	649324	6842825	2010	Rio Bonito	80	x	78 - 80
PMAPAR04	650498	6835661	2013	Rio Bonito	50	x	45 - 47
PMAPAR05	653628	6833222	2013	Rio Bonito	48	x	44 - 46
PMAPAR06	656877	6831875	2013	–	30	–	–
PMAPAR07	655773	6827853	2013	Rio Bonito	30	x	10 - 14
PMAPAR10	655372	6816840	2015	Rio Bonito	88	x	86 - 88
PMAPAR11	666374	68140121	2015	Rio Bonito	64	x	58 - 62
PMLAAR01	653627	6817745	2009	Leque Aluvial	8	x	7 - 8
PMLAAR02	652556	6813075	2013	Leque Aluvial	14	x	8 - 10
PMLAAR03	644924	6824124		Leque Aluvial	11	–	–
PMLAAR04	653118	6820198	2010	Leque Aluvial	7	x	6 - 7

Coord. = coordenadas; Ano = ano de perfuração dos poços; Profundidade = profundidade máxima do poço; x = possui perfil construtivo; Nível do filtro = intervalo de localização do filtro; (–) = não determinado. O poço PMAPAR06 também é conhecido como PRBC20.

A bacia hidrográfica do Rio Araranguá drena as nascentes (drenagens naturais) no sul da escarpa da Serra Geral que vertem para o Atlântico passando por regiões aplainadas resultantes de antigos leques aluviais e fundos de vales preenchidos por sedimentação moderna, e que desaguam passando por depósitos fluvio-lagunares e cordões arenosos no mar na região litorânea compreendida pelos municípios de Araranguá, Balneário Arroio do Silva e Balneário Rincão. Os principais rios são o Rio Araranguá, Mãe Luzia e Itoupava, sendo que o Rio Araranguá é formado após o encontro dos outros dois e é o responsável por drenar as águas desta bacia para o Oceano Atlântico (DANTAS *et al.*, 2005; KREBS, 2004).

Os relevos descritos são cobertos por floresta tropical pluvial (Floresta Ombrófila Densa), mais conhecida como Mata Atlântica na região litorânea, e a floresta de araucárias (Floresta Ombrófila Mista), na escarpa da Serra Geral (IBGE, 2004). Atualmente, na região, predominam vegetações secundárias e atividades agrícolas, principalmente, o cultivo de arroz irrigável.

Dentre as atividades econômicas, a produção de carvão, por muitos anos, foi a principal delas, gerando um passivo ambiental muito grande para a BHRA. Por isso, a BHRA é uma das bacias hidrográficas que compõe a Região Carbonífera do Estado de Santa Catarina. Segundo Krebs (2004), é uma das bacias hidrográficas que tem a maior extensão de áreas e rios impactados pela mineração e pelo beneficiamento de carvão.

2.2. Geologia

A região Carbonífera de Santa Catarina encontra-se no contexto geológico da borda leste da Bacia do Paraná, apresenta porções do Batólito Florianópolis (a sudeste) e coberturas sedimentares de idade Cenozoica. As principais unidades geológicas presentes na borda leste da Bacia do Paraná são os Supergrupos Tubarão e São Bento, e, no Batólito Florianópolis, os Granitoides Santa Rosa de Lima e os Granitos Imaruí-Capivari e Jaguaruna (WILDNER et al., 2014).

De acordo com a coluna estratigráfica da região carbonífera (Tabela 2) modificada de Krebs (2004), os sedimentos da Bacia do Paraná: Grupo Itararé, Grupo Guatá, Grupo Passa Dois e Grupo São Bento depositaram-se acima das rochas neoproterozóicas do Batólito Florianópolis. As litologias cenozoicas foram depositadas após as unidades geológicas da Bacia do Paraná. Na área de estudo, que engloba os poços de monitoramento da BHRA, ocorrem afloramentos das litologias sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná e os sedimentos cenozoicos (WILDNER et al., 2014).

Tabela 2 Coluna estratigráfica da região carbonífera de Santa Catarina; sequências de Milani (2007) incluem Gondwana III no Cretáceo e no Jurássico e Gondwana I no Triássico e Permiano (modificado de KREBS, 2004).

Era	Período	Grupo ¹	Formação ¹	Membro ¹
Cenozóica			Planície costeira	
Mesozóica	Cretáceo	São Bento	Serra Geral Botucatu	
	Jurássico Triássico	Passa Dois	Rio do Rasto	Morro Pelado
Paleozóica	Permiano			Serrinha
			Teresina Serra Alta Irati	Assistência Taquaral
		Guatá	Palermo Rio Bonito	Siderópolis Paraguaçu Triunfo
		Itararé	Taciba	Rio do Sul
Proterozóico	Neoproterozóico		Batólito Florianópolis	

¹Schneider (1974)

De acordo com a figura 2, as litologias mais antigas e frequentes que afloram na Bacia do Araranguá foram denominadas por Schneider *et al.* (1974) como formação Rio do Sul, para designar os sedimentos argilosos, como folhelhos e argilitos cinza escuros, que ocorrem na parte inferior do Grupo Itararé. Depois, a unidade definida por Schneider *et al.* (1974) foi considerada como membro do Rio do Sul pertencente à formação Taciba, porção superior do grupo Itararé que aflora na região sul da Bacia do Paraná (FRANÇA; POTTER, 1988; MILANI *et al.*, 1994). Wildner *et al.* (2014) classificam, como membro Rio do Sul, folhelhos e siltitos cinza-escuros a pretos, diamictitos e conglomerados com acamadamento gradacional, ritmitos, varvitos com seixos pingados e arenitos muito finos a médios, com laminações plano-paralelas e cruzadas, convolutas, climbing, flaser e hummocky.

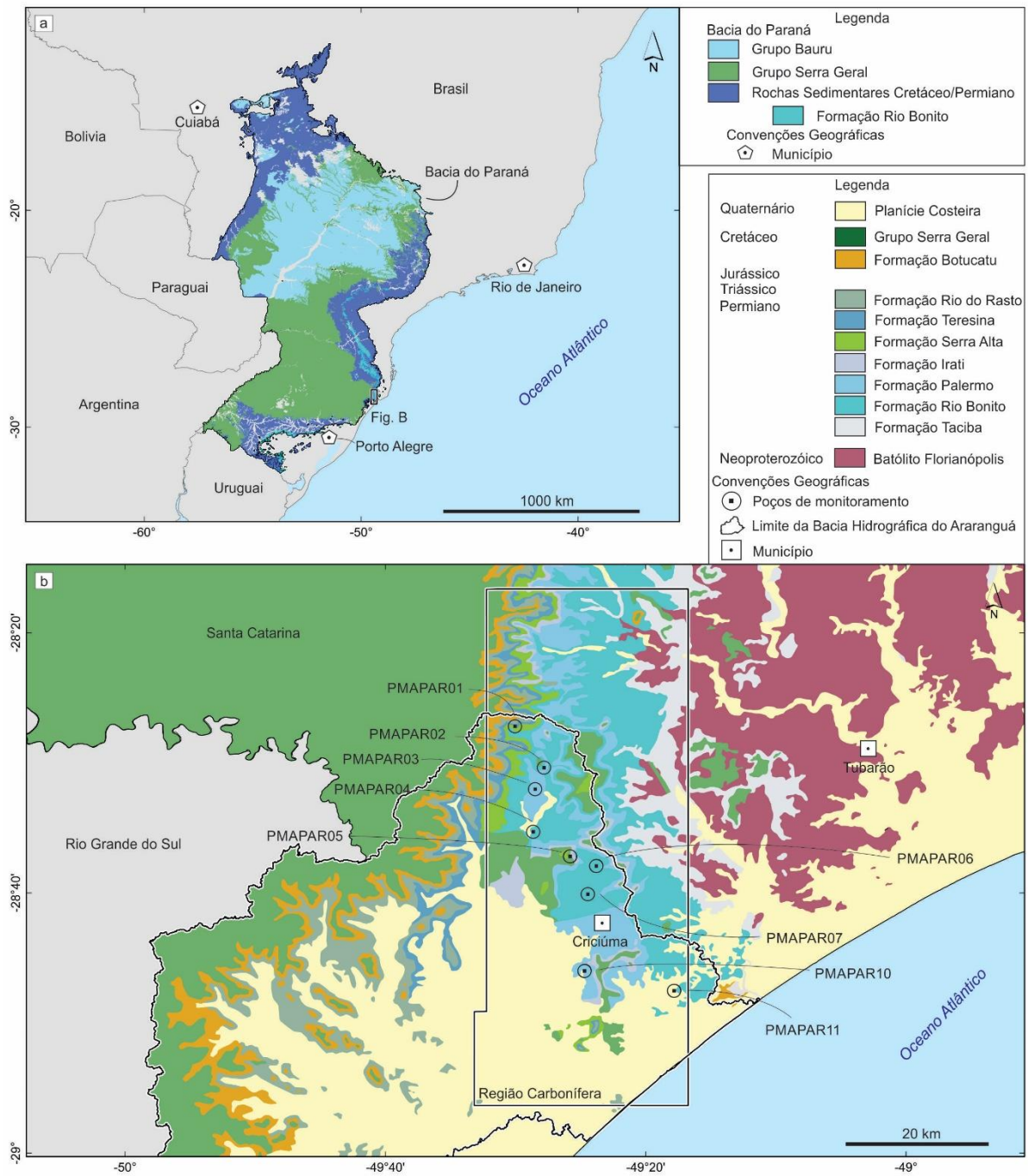


Figura 2. a Mapa Geológico da Bacia do Paraná no Brasil (modificado de CPRM, 2014); b Mapa Geológico da Região Carbonífera de Santa Catarina (modificado de WILDNER *et al.*, 2014).

Sob o membro Rio do Sul, afloram sedimentos da formação Rio Bonito (Grupo Guatá), descritos inicialmente por White (1908) como Camadas Rio Bonito para arenitos, folhelhos e lentes de carvão, que afloram próximo ao município de Lauro Muller. Schneider *et al.* (1974) descrevem que a formação Rio Bonito foi informalmente subdividida em 3 intervalos e propõem os nomes de Triunfo (base), Paraguaçu (intermediário) e Siderópolis (superior). Membro Triunfo é a sequência deposicional de ambiente fluvio-deltaica registrada por sedimentos arenosos com

abundante estratificação cruzada. O membro Paraguaçu foi proposto para designar siltitos e folhelhos cinza intercalados a camadas de arenitos finos e leitos de rochas carbonáticas que marcam um ambiente marinho transgressivo. O membro superior da formação Rio Bonito apresenta camadas de arenitos finos a muito finos, cinza escuro, intercaladas com camadas lenticulares de argilitos e folhelhos carbonosos com camadas de carvão associadas (SCHNEIDER et al., 1974).

Milani *et al.* (1994) descreveu a formação Rio Bonito como arenitos associados a leitos de carvão, siltitos e folhelhos, localmente carbonosos. Eles marcam a sedimentação deltaica de idade carbonífera-eotriássica.

Dias (1995) subdividiu, informalmente, o membro Siderópolis, no município de Criciúma (SC), em três associações litofaciológicas, inferior (sequência Bonito), média (sequência Barro Branco) e superior (areias transgressivas). A sequência Bonito é composta litologicamente por arenitos finos a muito finos, cinza-claro a creme, atingindo colorações mais escuras em profundidade, intercalados com siltitos cinza escuros a pretos, folhelhos carbonosos e camadas de carvão. A composição mineral predominante dos arenitos é quartzosa com lâminas de mica e cimento carbonático, podendo apresentar laminação plano paralela, truncada por ondas e convolutas; e os siltitos são compostos de finos minerais micáceos, nódulos de pirita, bioturbações e marcados por restos vegetais.

A sequência Barro Branco apresenta arenitos médios a grossos, cinza esbranquiçados, arcoseanos, podendo ser considerados conglomerados, com estratificações cruzadas acanalada e tabular de pequeno e médio porte. Esses arenitos podem apresentar, de forma dispersa, lâminas finas de folhelhos pretos micáceos com nódulos de pirita. A associação litofaciológica média é encerrada pela camada de carvão Barro Branco. As areias transgressivas recobrem a sequência anterior com arenitos finos a muito finos, com cores claras variando de cinza a branco, essencialmente, quartzosos e, muitas vezes, friáveis. Nessa sequência, as estratificações podem ser plano paralelas, truncadas por ondas e “hummocky”, e apresentar intercalações de pelitos escuros com acamamento “flaser” e “drape” e, na base, com pelitos carbonosos com estruturas “wavy” e “linsen” (DIAS, 1995).

Krebs (2004) apresenta o mapa geológico para a Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá (BHRA) com o Membro Siderópolis da formação Rio Bonito subdividido em três sequências litológicas, como demonstrado na figura 3. A sequência basal é representada por arenitos cinza amarelado com textura média e/ou arenitos de grão fino a muito fino cinza claro a cinza médio, intercalados com uma espessa camada de

carvão no topo (Camada Bonito). A sequência média é a mais espessa e apresenta a camada de carvão Irapuá intercalada com siltito e folhelho carbonoso, bem como arenitos fino quartzosos com truncamento por ondas e estruturas hummocky. Na sequência superior, é possível observar arenitos com grãos finos a médios cinza claro e a ocorrência de uma importante camada de carvão conhecida como Barro Branco (principal camada explorada na região carbonífera de Santa Catarina) e, localmente, a camada Treviso. Segundo o autor, os membros Triunfo e Paraguaçu não afloram na região carbonífera.

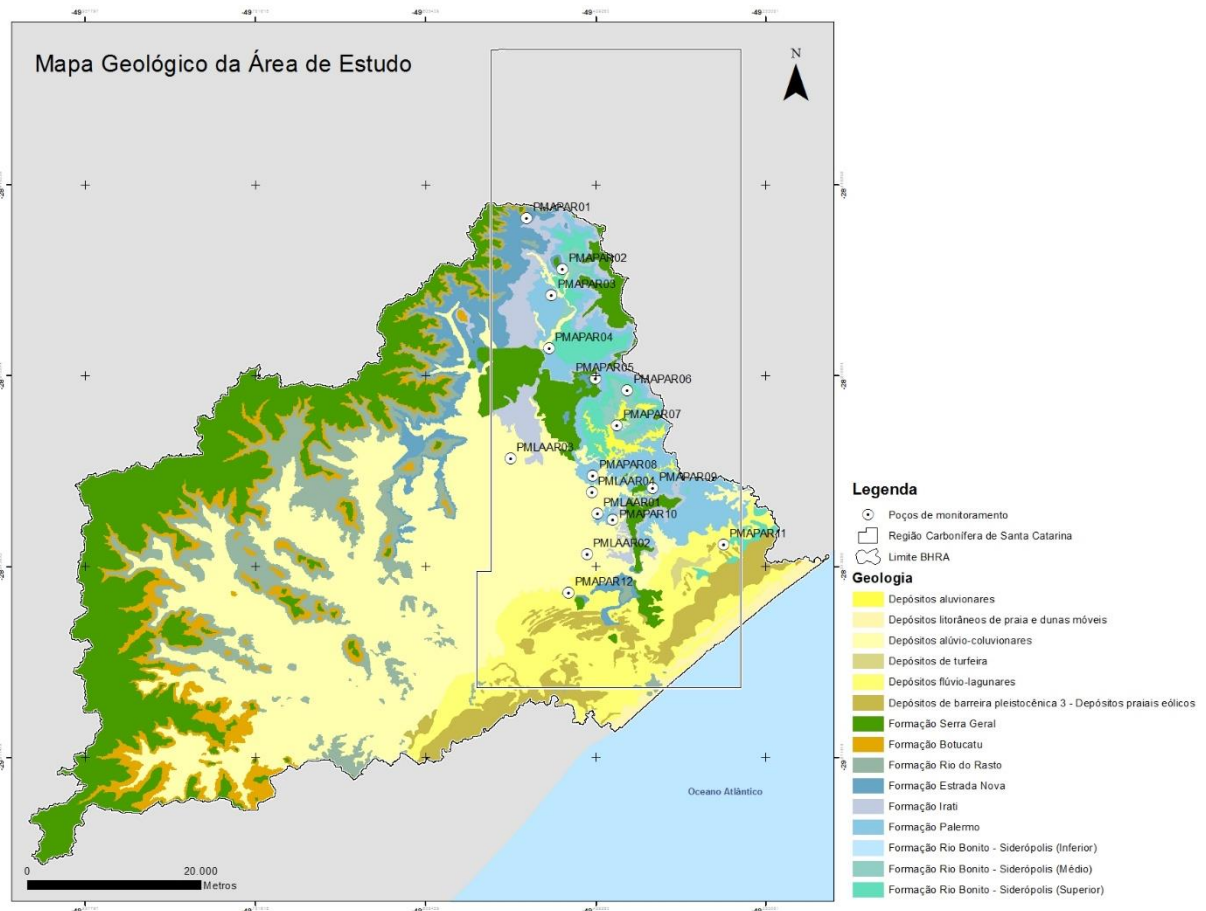


Figura 3. Mapa Geológico da Área de estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá (modificado de KREBS, 2004).

Wildner *et al.* (2014), no mapa geológico do Estado de Santa Catarina, utilizam a formação Rio Bonito para definir arcóseos, siltitos, siltitos carbonosos e quartzoarenitos, folhelhos carbonosos e carvão, tonstein, diamictito com matriz carbonosa e marga; litologias características de ambiente flúvio-deltaico, litorâneo e marinho plataformal. Individualizam, cartograficamente, apenas a formação em Membro Triunfo para designar ritmitos com alternância centimétrica de siltitos e arenitos. De acordo com a figura 3, observa-se também que o membro não aflora na área de estudo.

Os siltitos e siltitos arenosos de coloração cinza do Grupo Guatá, que recobrem as litologias da formação Rio Bonito, foram descritos como formação Palermo, primeiramente, por White (1908), na Vila homônima, no município de Lauro Muller. Outros estudos também caracterizam esta formação como siltitos e siltitos arenosos depositado em uma plataforma marinha rasa (SCHNEIDER *et al.*, 1974; MILANI *et al.*, 1994). Krebs (2004) descreve as litologias propostas, para a formação Palermo, aflorando de forma contínua na BHRA. Wildner *et al.* (2014) definem as mesmas litologias da formação Palermo de ambiente marinho de costa-afora com influência de tempestades.

Sobre o Grupo Guatá, depositaram as litologias do Grupo Passa Dois começando pelos folhelhos com restos de réptil *Mesosaurus brasiliensis* denominados com o nome da cidade de Irati no Paraná, por White (1908). Os folhelhos e argilitos cinza escuro (base), os folhelhos pirobetuminosos cinza escuro com calcários associados (topo) situam-se na estratigrafia acima da formação Palermo. Esta unidade é subdividida em membro Taquaral na base e o membro Assistência (topo) abaixo da Formação Serra Alta (SCHNEIDER *et al.*, 1974). Segundo Milani *et al.* (1994), as características da formação Irati demonstram a deposição em um mar restrito com aumento progressivo de sal da base para o topo.

Segundo Krebs (2004), os membros da formação Irati podem ser verificados na região carbonífera e na estrada da serra do Rio do Rastro, no Estado de Santa Catarina. Na base, observam-se folhelhos e siltitos cinza escuros e acima o membro Assistência composto de folhelhos cinza escuros a pretos, com intercalações de folhelhos pirobetuminosos e lentes de margas associadas. Há ocorrência mineral de pirita em cristais euédricos e disseminada em margas, nos folhelhos pirobetuminosos, há exsudações de óleo em fraturas e amígdalas e, em morros testemunhos na BHRA, são verificados intrusões de rochas ígneas.

Wildner *et al.* (2014) apresentam a formação Irati para denominar folhelho, siltito e argilito, calcário, marga e folhelho betuminoso portador de répteis mesossaurídeos formada em ambiente marinho de costa-afora. As litologias foram depositadas por decantação em águas calmas abaixo do nível de ação das ondas com períodos de estratificação da coluna de água com influência de tempestades.

Superior à formação Irati, encontra-se a formação Serra Alta (Grupo Passa Dois) composta por argilitos, folhelhos e siltitos cinza escuro a pretos com lentes e concreções calcíferas (SCHNEIDER *et al.*, 1974; WILDNER *et al.*, 2014). Milani *et al.* (1994) reafirmam que a formação Irati foi coberta pelos folhelhos da Formação Serra

Alta. As litologias da formação Teresina (Grupo Passa Dois) depositaram-se, após a formação Irati, e são constituídas por argilitos e siltitos cinza escuros intercalados com arenitos muito finos com cor cinza claro. Eles podem apresentar, na porção superior, calcários, por vezes oolíticos e leitos de coquina intercalados (SCHNEIDER *et al.*, 1974; MILANI *et al.*, 1994; WILDNER *et al.*, 2014).

Krebs (2004) caracteriza as duas formações descritas anteriormente (Serra Alta e Teresina) como uma única unidade litológica na BHRA, conhecida como Formação Estrada Nova, predominantemente, pelítica. Ele afirma a presença da Formação Estrada Nova continuamente entre as cotas 450 a 600 metros situadas a norte, próximas à encosta inferior à média do planalto gonduânico.

Encerrando as litologias pertencentes ao Grupo Passa Dois, conforme visto na tabela 1, ocorre a formação Rio do Rasto acima da formação Teresina. Segundo Schneider *et al.* (1974), esta formação tem deposição na base de siltitos e arenitos finos esverdeados a arroxeados (Membro Serrinha) e, no membro superior (Morro Pelado), argilitos e siltitos vermelhos com intercalações de arenitos lenticulares. Krebs (2004) defende que essa formação aflora de maneira contínua na encosta média do planalto, sendo recoberta por leques aluviais em cotas inferiores para sudoeste. Wildner *et al.* (2014) utilizam a formação, diferenciando as litologias do membro Serrinha como pelito e arenito de ambiente lacustre e, do membro Morro Pelado, para siltito e arenito de ambientes lacustre, deltaico, eólico e raros depósitos fluviais.

O grupo São Bento, na região carbonífera, está situado acima das litologias do Passa Dois e corresponde a arenitos eólicos do Botucatu, na base, recobertos e intercalados por derrames vulcânicos da formação Serra Geral. A formação Botucatu é composta, principalmente, por arenitos avermelhados com granulometria fina a média e com estratificações cruzadas de médio a grande porte. A formação Serra Geral engloba derrames basálticos, toleíticos, basalto andesitos, riodacitos e riolitos (SCHNEIDER *et al.*, 1974; MILANI *et al.*, 1994). Wildner *et al.* (2014) apresenta a formação Serra Geral como um grupo composto por outras formações, como a formação Campo Erê, Cordilheira Alta, Palmas e outras. Nos últimos anos, alguns autores utilizaram, informalmente, o termo Grupo Serra Geral (ARENA *et al.*, 2010; PINTO; HARTMANN, 2011) e, recentemente, Rossetti *et al.* (2017) propuseram a mudança de categoria de Formação para Grupo Serra Geral.

Segundo Krebs (2004), a formação Botucatu aflora no extremo norte da região carbonífera, principalmente, em escarpas associadas aos derrames vulcânicos da

Serra Geral e, localmente, na BHRA, em morros alongados, também associados aos depósitos vulcânicos.

Os depósitos de idades Cenozoica presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, segundo Krebs (2004), resultam de dois tipos de sistemas deposicionais, o Sistema de leques aluviais, que recobrem uma área expressiva da BHRA, e os Sistemas Laguna Barreira, ambos descritos no Estado de Santa Catarina por Caruso Jr. (1995).

O Sistema de leques aluviais é composto por depósitos sedimentares proximais das encostas do embasamento granítico e das escarpas da Serra Geral, e fácies aluviais de transporte de material (CARUSO JR., 1995). Leques aluviais são caracterizados por depósitos de sedimentos em forma cônica depositados próximos ao sopé de encostas declivosas até áreas com declividades planas (BULL, 1968; MEDEIROS, 1971; NICHOLS, 2009). Na BHRA, esses depósitos são constituídos por cascalhos, areias e lama mal-classificadas depositados por fluxos torrenciais não canalizados e canalizados, correntes normais e fluxos de detritos (KREBS, 2004).

Os leques aluviais podem ser individualizados em três partes, cabeceira do leque, leque proximal e leque distal (MEDEIROS, 1979; HOOKE, 1967), sendo a cabeceira do leque a porção situada mais próxima aos terrenos com declividade elevada, composta, segundo Hampton (1970), por “depósitos de matriz sustentados, com pouca ou nenhuma organização interna, seleção granulométrica ou composicional”. Krebs (2004) descreve, na área da BHRA, essas características com litologias bastante alteradas, constituindo depósitos poucos permeáveis, com baixa capacidade aquífera.

Os leques proximais ocupam uma área maior, na BHRA e mais plana, e apresentam depósitos com litologias de granulometrias que diminuem em direção à planície costeira. São formados por processos fluviais e apresentam estruturas internas, como clastos suportados com presença ou não de clastos imbricados. As características demonstram que esses depósitos apresentam litologias com boas características aquíferas, bem como os depósitos de leque distal, entretanto, eles parecem pouco espessos e encobertos por litologias dos sistemas laguna-barreira na BHRA. Esses depósitos apresentam granulometrias ainda mais finas, são compostos por seixos, grânulos e areia grossa, com a ocorrência de imbricação de grãos por gradação normal (KREBS, 2004).

Os Sistemas Lagunas-Barreira ocorrem sobre depósitos continentais e retributam eles ao longo dos ciclos de transgressão e regressão marinha. Segundo

Caruso Jr. (1995), na planície costeira do sudeste de Santa Catarina, observa-se, expressivamente, apenas os sistemas laguna-barreira III e IV designados na província costeira do Rio Grande do Sul por Villwock *et al.* (1986). O sistema laguna-barreira III ocorreu durante o Pleistoceno superior e tem como depósitos principais, na bacia hidrográfica do Rio Araranguá, os praias marinhos e eólicos e de retrabalhamento eólico; fluviolagunares com retrabalhamento eólico e paludiais. Já o sistema laguna-barreira IV iniciou sua formação no período Holocênico até os dias atuais e constitui os depósitos lagunares com retrabalhamento eólico e praias marinhos e eólicos com retrabalhamento eólico na BHRA (KREBS, 2004).

Atualmente, também há formação dos depósitos aluviais de diversos tipos que retrabalham sedimentos e rochas e são depositados pelos principais cursos d'água presentes na bacia hidrográfica estudada. Os principais depósitos próximos às áreas fontes e elevadas são barras transversais ou longitudinais e barras em pontal, e, em regiões mais planas, em vales abertos, depósitos argilosos ou com composições arenosas, silticas e argilosas (KREBS, 2004; WILDNER *et al.*, 2014).

2.3. Geologia Estrutural

Alguns estudos (KREBS, 2004; MANOEL FILHO, 2008; MACHADO, 2013) demonstram a importância das estruturas tectônicas para armazenagem, recarga e transmissão de água nas rochas e sedimentos. Por isso, faz-se necessário o estudo prévio para conhecer os sistemas de falhas e fraturas conhecidas na bacia hidrográfica do Rio Araranguá. Essas estruturas podem auxiliar na recuperação e no monitoramento das águas contaminadas por carvão na região, bem como auxiliar no conhecimento da propagação das fontes de poluição.

Segundo Krebs (2004), as principais estruturas encontradas na BHRA são sistemas de falhas de direção $N45^\circ - 75^\circ E$ e $N5^\circ - 30^\circ W$, sendo que algumas encontram-se preenchidas por diques de diabásio. Na planície costeira da BHRA, há uma mudança no padrão estrutural e o principal sistema de falha é o E – W. Entretanto, em toda a bacia hidrográfica podem ocorrer outros sistemas de falha como: N – S, $N30^\circ - 45^\circ E$ e $N30^\circ - 45^\circ W$.

Algumas falhas interceptam outras, como o sistema $N45^\circ - 75^\circ E$ mais jovem que corta o $N5^\circ - 30^\circ W$ (mais antigo). Também podem ser importantes calhas estruturais que controlam rios ou trechos de corpos d'água importantes na região, como o Rio dos Porcos e o Rio Sangão. Estruturas tectônicas como sills de diabásio sustentam morros testemunhos e outras causam o soerguimento de camadas de

carvão a superfície ou a profundidades maiores, possibilitando a mineração a céu aberto como ocorreu no município de Siderópolis ou a lavra subterrânea (KREBS, 2004).

2.4. Aspectos Geoquímicos do Carvão Mineral de Santa Catarina

O carvão de Santa Catarina foi descoberto em 1896 na descrição de litologias da formação Rio Bonito da Bacia do Paraná. De doze (12) camadas de carvão encontradas apenas três (3) apresentaram potencial econômico e foram mineiradas: Barro branco, Irapuá e Bonito (ALEXANDRE, 1999).

Alexandre (1999), Aborange e Lopes (1986) descrevem concentrações elevadas de cinzas e pirita (FeS_2) nos carvões de Santa Catarina e, por isso, o percentual de enxofre, após o beneficiamento, situa-se em torno de 2%.

Kalkreuth, *et al.* (2010) corroboram as informações dos estudos anteriores e acrescenta que os carvões são betuminosos altamente voláteis e localmente estão alterados por intrusões de diabásio. Também descrevem que as três camadas principais de carvão foram formadas durante o ciclo transgressivo/regressivo, sendo que a camada Bonito ocorreu durante o sistema de trato alto (*highstand systems tract*) e as camadas Barro Branco e Irapuá no sistema de trato transgressivo (*transgressive systems tract*), associados ao ambiente deposicional estuarino e de barreira costeira.

Os autores apresentam ainda a descrição petrográfica, química e paleoambiental para os carvões da região. A tabela 3 apresenta as médias de metais pesados calculados para as três camadas e a média do carvão de Santa Catarina. Importante ressaltar que a tabela 3 foi modificada de Kalkreuth, *et al.* (2010) e apresenta apenas os metais analisados nos dados de água subterrânea estudados.

Tabela 3 Valores médios dos metais pesados nas camadas de carvão da Região Carbonífera de Santa Catarina. (Modificado de Kalkreuth *et al.*, 2010).

Parâmetros	BB	BO	IR	SC-média
Mn	138.7	239.6	18.3	150.4
Cu	33.6	17.7	11.6	25.9
Cd	0.3	0.1	0.1	0.2
Pb	64.9	33.7	78.6	58.0
Zn	118.8	36.9	45.2	84.9
As	30.8	26.6	19.6	28.0
Hg	0.56	0.27	0.41	0.46

Todos os dados estão em ppm. BB: Barro Branco, BO: Bonito, IR: Irapuá, SC-média: valor médio do carvão em Santa Catarina.

2.5. Hidrogeologia

As águas subterrâneas ocorrem abaixo do nível freático em formações geológicas. Esses reservatórios naturais de acordo com as características de armazenamento e transmissão de água podem ser denominados de aquíferos, aquícludes, aquípardos e aquífugos. Os aquíferos possuem maior importância hidrogeológica, pois são formações com capacidade de transmissão e armazenamento, enquanto que os aquícludes são incapazes de transmitir água subterrânea, os aquípardos são compostos por unidades geológicas semipermeáveis e os aquífugos são totalmente impermeáveis (MANOEL FILHO, 2008).

De acordo com características físicas e químicas, as rochas são classificadas em sistemas aquíferos que podem ser definidos por uma única unidade geológica ou mais, ou ainda, em alguns casos, podem ser individualizados em intervalos menores. Machado (2013) define as unidades geológicas no Estado de Santa Catarina em zonas aquíferas sedimentares, fraturadas, pouco produtivas ou não aquíferas. Na figura 4, podemos visualizar cartograficamente quais zonas aquíferas ocorrem na BHRA. São caracterizadas, principalmente, pelas litologias, estruturas, condições hidrogeológicas e morfológicas, e a qualidade química das águas subterrâneas. Dentro das zonas aquíferas, Manoel Filho (2008) define as unidades hidroestratigráficas regionais.

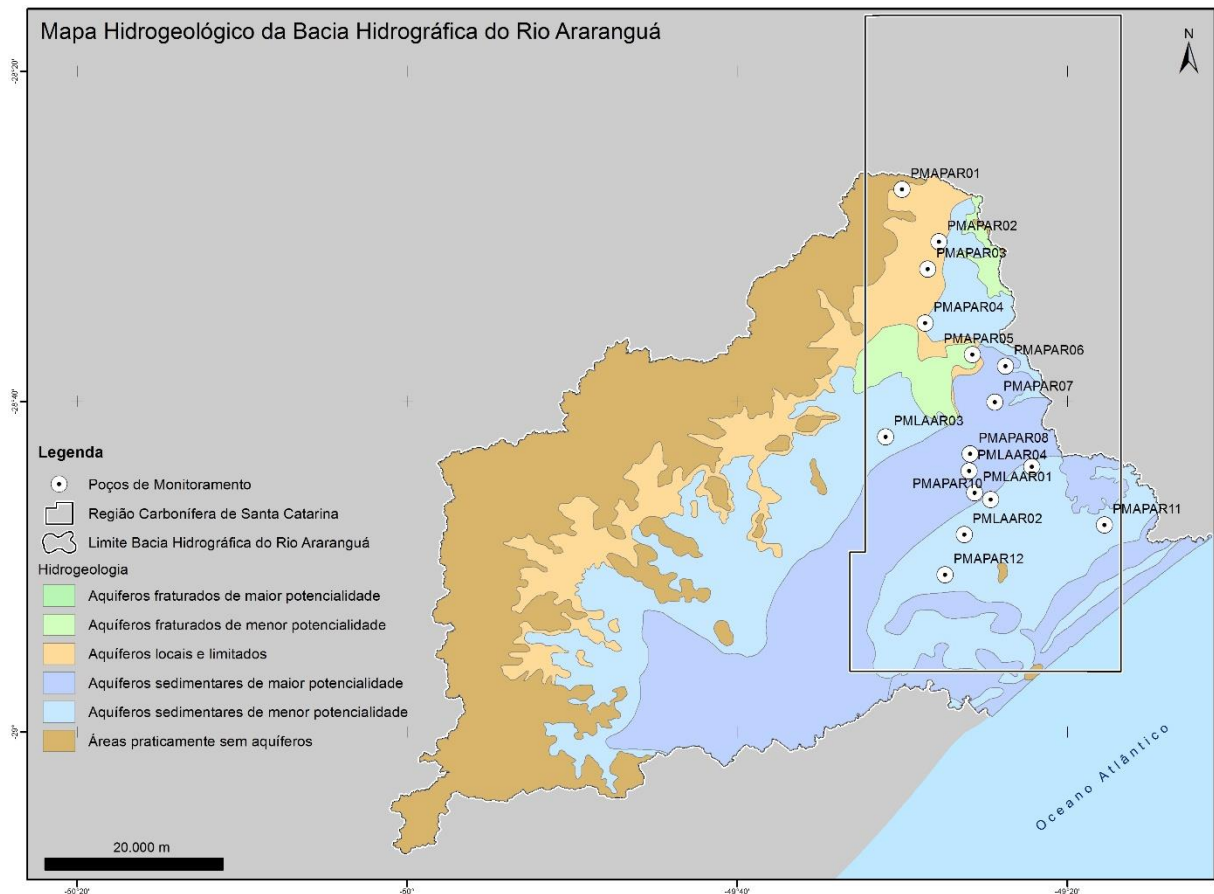


Figura 4. Mapa Hidrogeológico da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá (modificado de Machado, 2013).

Para esse estudo, é importante o conhecimento prévio dos sistemas aquíferos ou das unidades hidroestratigráficas regionais presentes na área em análise. Segundo Krebs (2004), as características geológicas locais definem aquíferos porosos, nas rochas sedimentares gonduânicas e nos sedimentos cenozoicos, e aquíferos fraturados, nas rochas ígneas.

Os principais aquíferos fraturados, na área de estudo, são constituídos pela Formação Serra Geral (KREBS, 2004; MACHADO, 2013). É importante ressaltar que essas rochas apresentam porosidade primária praticamente nula, ou seja, porções desta formação com ausência de falhas e fraturas não são consideradas zonas aquíferas. São consideradas zonas aquíferas quando do tipo livre a semi-confinado de extensão regional em Santa Catarina. No geral, apresentam vulnerabilidade à contaminação de médio risco, em zonas urbanas, e de baixo risco nas zonas rurais (MACHADO, 2013).

Os aquíferos porosos podem ser constituídos pelas formações gonduânicas, sendo individualizados em Sistema Aquífero relacionado à Formação Rio do Sul; Sistema Aquífero relacionado à Formação Rio Bonito; Sistema Aquífero relacionado

às Formações Palermo, Irati, Estrada Nova e Rio do Rasto (terço inferior e médio); Sistema Aquífero relacionado à Formação Rio do Rasto (terço superior); e por sistemas aquíferos relacionados aos depósitos cenozoicos presentes na região (KREBS, 2004).

Machado (2013), para o Estado de Santa Catarina, regionalmente, classifica as unidades hidroestratigráficas de acordo com as unidades geológicas de idade gonduânica definidas para o Estado de Santa Catarina, como: Unidade hidroestratigráfica (UH) Rio do Sul, UH Rio Bonito, UH Palermo, UH Irati, UH Serra Alta, UH Teresina e UH Rio do Rasto. Apenas a Formação Botucatu é descrita por ele em conjunto com a Formação Piramboia, porque elas juntas representam o importante sistema aquífero conhecido mundialmente como Sistema Aquífero Guarani.

Sobre a qualidade das águas subterrâneas coletadas em poços de monitoramento na BHRA, tema desta pesquisa, dentre os sistemas aquíferos porosos citados, os mais relevantes são os sistemas aquíferos relacionados à Formação Rio do Sul, Rio Bonito, Palermo, Irati, e os depósitos terciários e quaternários. Sendo assim, estão caracterizados a seguir. Eles podem funcionar como sistemas aquíferos individualizados ou em associação a mais de uma unidade geológica.

O sistema aquífero relacionado à formação Rio do Sul é caracterizado por não aflorar na área de estudo e por ter sido descrito apenas em testemunhos de sondagens realizados para a mineração de carvão. É considerado um aquífero poroso intergranular com capacidade de armazenamento e transmissão ampliada por faturamento. É constituído por arenito de granulometria fina de caráter confinado, entretanto, localmente, pode apresentar camadas conglomeráticas. Pode estar interligado ao aquífero Rio Bonito situado acima. Apresenta água subterrânea com qualidade boa para diversos fins, mas pode conter concentrações elevadas de ferro e manganês e odores de gás sulfídrico acima dos limites permitidos pelos padrões de referência (MACHADO *et al.* 1984; KREBS, 2004; MACHADO, 2013). Segundo Krebs (2004), na BHRA, esse aquífero apresenta baixa vulnerabilidade natural, porque se encontra confinado por uma camada de pelitos com baixa permeabilidade, mas há alto risco de contaminação, pontualmente, onde ocorre intenso fraturamento e onde os arenitos da formação Rio Bonito, situados acima, afloram na superfície.

O aquífero relacionado às rochas da unidade geológica Rio Bonito ocorre na região carbonífera de Santa Catarina sobre o embasamento cristalino. Essa unidade é subdividida em três intervalos estratigráficos, membros Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis, sendo considerado um aquífero heterogêneo vertical e lateralmente. No

geral, a formação Rio Bonito é considerada um aquífero de porosidade intergranular (primária), ampliada por fraturamento, podendo ser encontrada interligada à formação Rio do Sul, criando regional ou localmente um sistema aquífero único (MACHADO, 2013; KREBS, 2004).

A qualidade química das águas subterrâneas, no aquífero Rio Bonito, apresenta características similares em teores de ferro, manganês e odores de ácido sulfídrico, devido a apresentar-se, constantemente, como um sistema aquífero único para as formações Rio do Sul e Rio Bonito. Entretanto, a unidade Rio Bonito pode apresentar águas com teores mais elevados de cloreto e sulfatos em porções de aquífero confinado (MACHADO, 2013; KREBS, 2004). Segundo Machado *et al.* (1984), os poços, no Rio Bonito, no município de Siderópolis, apresentam os maiores teores de concentrações de elementos químicos derivados da contaminação por consequência da mineração de carvão local.

De acordo com estudos realizados no aquífero Rio Bonito, regionalmente, o membro com melhores características aquíferas é o superior, Siderópolis, constituído por arenitos porosos e permeáveis com intercalações de camadas de carvão, siltitos e folhelhos carbonosos. Aflora em grande extensão na BHRA, apresentando áreas de recarga direta e indireta por sistemas de falhas e fraturas (MACHADO, 2013; KREBS, 2004). Devido a essa característica, foi individualizado em três intervalos aquíferos, por Krebs e Nosse (1998), em sequência litofaciológica superior (Areias Transgressivas), média (sequência Barro Branco) e inferior (Bonito).

O membro Siderópolis comporta-se normalmente como aquífero livre extenso, na área de estudo, mas pode ocorrer confinado por camadas de siltito ou carvão ou litologias pelíticas da formação Palermo (KREBS; NOSSE, 1998; KREBS, 2004). Segundo Krebs (2004), “localmente, onde ocorre intersecção de diferentes sistemas de falhas, pode se comportar como aquífero intergranular extenso fraturado, livre ou confinado”.

As unidades geológicas Palermo e Irati serão descritas em conjunto, pois apresentam similaridades quanto às características aquíferas. Inclusive Krebs (2004) apresenta-as no sistema aquífero relacionado às formações Palermo, Irati, Estrada Nova e Rio do Rasto (terço inferior e médio). Localmente, as formações Palermo e Irati podem estar associadas ao aquífero Rio Bonito, através de sistemas de falhas e fraturas ou confinando o Rio Bonito (MACHADO *et al.*, 1984, KREBS; NOSSE, 1998; KREBS, 2004).

Essas formações não apresentam boas características de armazenamento e transmissão de água e porosidade intergranular baixa ou inexistente, pois são constituídas, predominantemente, de litologias pelíticas, como a formação Palermo por siltitos e siltitos arenosos intensamente bioturbados e a formação Irati por siltitos argilosos e carbonáticos (KREBS; NOSSE, 1998; KREBS, 2004).

Todavia, podem mostrar capacidade de armazenamento e fluxo de águas subterrâneas, quando apresentam descontinuidades nos acamadamentos e falhas e fraturas, sendo que a formação Palermo pode apresentar lentes e camadas localizadas de arenitos; e a formação Irati diques e sills de diabásio que também auxiliam na melhoria das características aquíferas dessas unidades (MACHADO, 2013).

Os aquíferos porosos relacionados aos sedimentos cenozoicos ocorrem sobre unidades pré-cambrianas e terrenos gonduânicos, no Estado de Santa Catarina, sendo que, na BHRA, ocorrem, principalmente, sobre as litologias da Bacia do Paraná (Gonduânica). Esse sistema aquífero situa-se na planície costeira e é constituído de depósitos de leques aluviais (são os depósitos com maior extensão na BHRA), barreiras marinhas com retrabalhamento eólico, paleo-lagunares e fluviolagunares (KREBS, 2004; MACHADO, 2013).

O sistema aquífero de depósitos Cenozoicos caracteriza-se por ser livre a semi-confinado, com porosidade intragranular com boa permeabilidade e é regionalmente homogêneo. Apresenta importância hidrogeológica por sua potencialidade aquífera elevada em quase toda a sua extensão. Porém, pode ocorrer localmente potencialidade aquífera reduzida ou nula, em depósitos paleo-lagunares, devido à baixa permeabilidade das suas camadas de composição siltico-argilosas (KREBS, 2004; MACHADO, 2013).

As áreas de recarga desse aquífero ocorrem em praticamente toda a sua extensão, na área de estudo, desde as cabeceiras da Serra Geral até o oceano, por infiltração direta e/ou por declive hidráulico. Entretanto, sua proximidade com o oceano, as diversas ocupações urbanas nas áreas de recarga e a granulometria dos depósitos conferem elevada vulnerabilidade natural de contaminação. Essa contaminação pode ocorrer por falta de saneamento, por pesticidas utilizados na agricultura, por irrigação (Rio Mãe Luzia e afluentes) de lavouras de arroz em áreas próximas e distantes de áreas mineiradas por carvão (KREBS, 2004; MACHADO, 2013).

2.6. Drenagem Ácida de Mina

Na região carbonífera de Santa Catarina, dentre os passivos ambientais gerados pela mineração de carvão, o que tem causado maior contaminação nas águas superficiais e subterrâneas é a drenagem ácida de mina (DAM), gerada através da percolação de água de precipitação em pilhas de rejeito e estéril expostas. A percolação de água, em bocas de mina e galerias abandonadas ou nos sistemas de falhas e fraturas abertas, também pode ocasionar a geração de DAM (ALEXANDRE, 2000; KREBS, 2004; CASTILHOS, 2007).

Segundo Mello et al. (2014), “ DAM é um fenômeno que se inicia quando as rochas contendo minerais sulfetados são retiradas do interior da terra pelas atividades de mineração e, quando dispostas na superfície terrestre, oxidam-se por reação com água e oxigênio atmosférico”. A DAM caracteriza-se por pH ácido com valores em torno de três unidades e meia (3,5), teores elevados de sulfato e a presença de cátions metálicos com valores acima dos ambientes naturais, normalmente, gerada pela oxidação do mineral de sulfeto de ferro, conhecido como pirita (LOWSON, 1982; MELLO *et al.*, 2014).

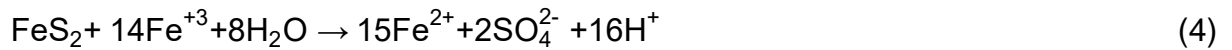
Estudos na região carbonífera demonstram característica ácida nos recursos hídricos da BHRA, bem como alto teor de sulfato, em parte por consequência da mineração de carvão. Esses estudos mostram contaminação ou quantidades elevadas de parâmetros químicos utilizados como referência para qualidade de água, principalmente, nas águas superficiais (ALEXANDRE, 1999; CASTILHOS, 2007).

Alguns autores (LOWSON, 1982; BANKS, 1997; MELLO *et al.*, 2014) apresentam explicações para a oxidação da pirita (mineral existente nos carvões de Santa Catarina), uma pode ser resumida na ocorrência da equação (1) quando o FeS_2 entra em contato com o ar e a água. Após, ocorre a redução de Fe^{+2} para Fe^{+3} , conforme a equação (2), e a hidrólise de Fe^{+3} , de acordo com a equação (3).

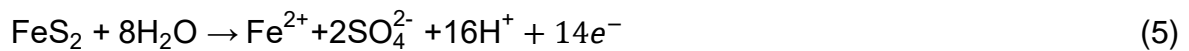


A reação representada pela equação (2) ocorre lentamente em ambiente abiótico, contudo, pode ser intensificada pela ação de bactérias, que se desenvolvem

em ambiente aquático com pH de 2,8 a 3,2. Já quando o meio apresenta pH aproximado ou menor que 2,3, a ocorrência da hidrólise (equação 3) diminui, elevando a concentração de Fe^{+3} e, com isso, o próprio Fe^{+3} começa a oxidar a pirita (equação 4).



A pirita ainda pode oxidar na ausência de oxigênio, entretanto, isso dependerá do potencial eletroquímico, conforme a equação 5.



3. Metodologia

O estudo proposto englobou as seguintes etapas de trabalho:

- Levantamento bibliográfico sobre a degradação ambiental por carvão mineral e sobre a geologia e hidrogeologia da Região Carbonífera de Santa Catarina;
- Levantamento e cadastramento de dados geológicos e de qualidade das águas subterrâneas na região, a partir de bancos de dados do Serviço Geológico do Brasil - CPRM;
- Coleta e análises químicas de amostras de águas subterrâneas em duas etapas de campo, nos 13 poços de monitoramento situados na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá. Um total de 26 amostras foram coletadas, no primeiro ano deste projeto de pesquisa de mestrado. Essas coletas já são realizadas anualmente em duas etapas pela equipe do Núcleo de Apoio de Criciúma - SUREG-PA (CPRM), a fim de cumprir as atividades do Acordo de Cooperação Técnica com o Ministério do Meio Ambiente (2014-2019). Também ocorreu o acompanhamento do campo de coleta da 18ª campanha pela Geóloga Angela da Silva Bellettini no mês de novembro de 2017;
- Análise dos parâmetros executados no monitoramento ambiental da Região Carbonífera de Santa Catarina pelo CECOPOMIN (SUREG-SP) - CPRM, de acordo com o *Standard methods for the examination of water and wastewater* (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 1998), citados na Tabela 4.
-

Tabela 4 Tabela de parâmetros analisados no monitoramento ambiental de águas subterrâneas da Bacia Carbonífera.

Parâmetro	Mínimo Detectável	Método de Análise
pH		Sonda multiparâmetros Aquaprobe modelo AP-800
Temperatura		Sonda multiparâmetros Aquaprobe modelo AP-800
Oxigênio dissolvido		Sonda multiparâmetros Aquaprobe modelo AP-800
Potencial de Oxi-redução (ORP)		Sonda multiparâmetros Aquaprobe modelo AP-800
Condutividade elétrica (Scm^{-1})		Sonda multiparâmetros Aquaprobe modelo AP-800
Acidez (CaCO_3 mg/L)		Titulação potenciométrica por eletrodos
Sulfato (mg/L)		Análise gravimétrica
Cloreto (mg/L)		Titulação potenciométrica com nitrato de prata usando Titrano (boletim de aplicação nº 130 com eletrodo de oxi-redução) e para comparação o Kit de Cloreto Merck na Nova 60
Ferro Total (mg/L)	0,01	Espectrometria de emissão ótica por plasma (ICP-OES)
Fe^2 (mg/L)	0,01	Análise espectrométrica no equipamento UV-VIS
Alumínio total (mg/L)	0,01	Espectrometria de emissão ótica por plasma (ICP-OES)
Manganês total (mg/L)	0,002	Espectrometria de emissão ótica por plasma (ICP-OES)
Cobre (mg/L)	0,002	Espectrometria de emissão ótica por plasma (ICP-OES)
Chumbo (mg/L)	0,005	Espectrometria de emissão ótica por plasma (ICP-OES)
Arsênio (mg/L)	0,002	Hidreto para espectrometria de emissão ótica por plasma
Mercúrio (mg/L)	0,0003	Espectrofotometria de Fluorescência Atômica com Geração de vapor frio com o equipamento Analisador de Hg.
Cádmio (mg/L)	0,002	Espectrometria de emissão ótica por plasma (ICP-OES)
Zinco (mg/L)	0,005	Espectrometria de emissão ótica por plasma (ICP-OES)
Cálcio (mg/L)	0,025	Espectrometria de emissão ótica por plasma (ICP-OES)
Magnésio (mg/L)	0,01	Espectrometria de emissão ótica por plasma (ICP-OES)
Potássio (mg/L)	0,07	Espectrometria de emissão ótica por plasma (ICP-OES)
Sódio (mg/L)	0,07	Espectrometria de emissão ótica por plasma (ICP-OES)

- Caracterização hidrogeológica da área realizada com base nos dados de poços existentes;
- Caracterização mineralógica e textural dos arenitos de topo da camada de carvão Barro Branco com amostra de calha do poço PMAPAR-11 executada pela CPRM (SUREG-PA) na Região Carbonífera de Santa Catarina. Também foram utilizadas amostras de testemunhos de sondagem perfurados na região em projetos antigos e armazenados na Litoteca de Caçapava do Sul da CPRM. A partir de amostras de calha e dos testemunhos foram confeccionadas lâminas petrográficas dos arenitos de topo e base da camada de carvão Barro Branco;
- Sistematização dos dados cadastrados e tratamento estatístico foram realizados no segundo semestre de 2017 e no primeiro semestre de 2018;
- Análise e interpretação dos dados hidroquímicos, em duas etapas. A etapa compreendeu a análise dos dados dos poços profundos, durante o primeiro semestre, e a segunda, foi a análise dos poços de monitoramento dos leques aluviais, no segundo semestre de 2018;
- Análise e interpretação das lâminas petrográficas;
- Avaliação da potabilidade da água pela comparação dos parâmetros analisados com os limites máximos para consumo humano estabelecidos na resolução nº 396/2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2008);
- Elaboração de artigo científico para publicação;
- E elaboração da dissertação a partir do segundo semestre de 2018 até 2019.

4. Artigo

15/04/2019

Zimbra

Zimbra

angela.bellettini@cprm.gov.br

ENGE-D-19-00864 - Submission Confirmation

De : Environmental Earth Sciences (ENGE)
<em@editorialmanager.com>

Seg, 15 de abr de 2019 10:54

Remetente : em enge 0 629778 3700978a
<em.enge.0.629778.3700978a@editorialmanager.com>

Assunto : ENGE-D-19-00864 - Submission Confirmation

Para : Angela da Silva Bellettini
<angela.bellettini@cprm.gov.br>

Responder para : Environmental Earth Sciences (ENGE)
<swathi.alagesan@springer.com>

Dear Mrs. Bellettini,

Your submission entitled "Hydrochemical and contamination evolution of Rio Bonito aquifer in the Carboniferous region, Paraná Basin, Brazil" has been received by Environmental Earth Sciences.

The submission id is: ENGE-D-19-00864
Please refer to this number in any future correspondence.

Environmental Earth Sciences has continued to grow and now publishes 24 issues a year. Please be advised that the average number of days between the initial submission and the first decision may be up to 90 days.

Thank you for submitting your work to Environmental Earth Sciences. We look forward to the opportunity to publish your article.

Please note that there is no authorship change possible after submission.

Kind regards,

Springer Journals Editorial Office
Environmental Earth Sciences

Now that your article will undergo the editorial and peer review process, it is the right time to think about publishing your article as open access. With open access your article will become freely available to anyone worldwide and you will easily comply with open access mandates. Springer's open access offering for this journal is called Open Choice (find more information on www.springer.com/openchoice). Once your article is accepted, you will be offered the option to publish through open access. So you might want to talk to your institution and funder now to see how payment could be organized; for an overview of available open access funding please go to www.springer.com/oafunding.

Although for now you don't have to do anything, we would like to let you know about your upcoming options.

15/04/2019

Zimbra

Recipients of this email are registered users within the Editorial Manager database for this journal. We will keep your information on file to use in the process of submitting, evaluating and publishing a manuscript. For more information on how we use your personal details please see our privacy policy at <https://www.springernature.com/production-privacy-policy>. If you no longer wish to receive messages from this journal or you have questions regarding database management, please contact the Publication Office at the link below.

In compliance with data protection regulations, you may request that we remove your personal registration details at any time. (Use the following URL: <https://www.editorialmanager.com/enge/login.asp?a=r>) Please contact the publication office if you have any questions.

Hydrochemical and Contamination Evolution of Rio Bonito aquifer in the Carboniferous region, Paraná Basin, Brazil

Angela S. Bellettini ¹

Antônio P. Viero ²

Artur Cesar Bastos Neto ²

¹ Geological Survey of Brazil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), Rua Banco da Província, 105; 90840-030 Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil.

² Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Abstract

Groundwater is an essential natural reserve of fresh water in the world. However, population and economic growth in many countries has caused the contamination of many aquifers. Water crises make significant any study of the Paraná Basin aquifers, composed of several geological formations with high capacity of storage and transmission of water. In this context, Rio Bonito aquifer is in part located in the Carboniferous Region of Santa Catarina state (Brazil) and in the Araranguá Hydrographic Basin. The carboniferous region is known for coal mining and minimal care for the environment which led to damaging consequences. In this study, the interpretation of chemical data from nine wells monitored by 'Grupo Técnico de Assessoramento' (GTA 2018) was performed with binary variation diagrams, photo interpretation and comparison with local geology. This resulted in the identification of four groundwater groups with different hydrogeochemical characteristics, due to processes of water/rock interaction and contamination by the coal mines. The petrographic analysis defined that the sandstones from top coal layer of Rio Bonito aquifer is of the fractured type. The results indicate that the Rio Bonito aquifer in the studied region is contaminated by coal

mining with high levels in limited areas, but only in one well. Groundwater quality is monitored in the Rio Bonito aquifer, which is very important for the management of water use and mitigation of existing contamination, but also to prevent contamination of other areas.

Keywords

Groundwater, Contamination, Carboniferous region, Hydrogeochemical, Paraná Basin.

Introduction

Water crises occur in many countries along with population increase and contamination of natural water reserves making water cycle study essential. Groundwater is an invisible part of the water cycle (hydrosphere), but nonetheless it is the main reservoir of fresh water on planet Earth. There are many definitions for aquifers, but in general, aquifers are geological units that store and transmit significant quantities of water into subsurface (Kresic 2007; Poehls and Smith 2009).

The use of aquifers for drinking water and industrial activities is poorly managed by government authorities in general, especially in underdeveloped countries. As a consequence, pollution and groundwater contamination have increased quickly around the world, but the knowledge and care of this resource is slowly advancing (Margat and Van der Gun 2013; Kresic, 2007).

The Paraná Basin is an intracratonic sedimentary basin located in South America that has large aquifer systems such as the Guarani, Rio Bonito and others (Araújo *et al.* 1999; Campos 2000; Wildner *et al.* 2014). In the southern portion of the basin in the south of Brazil, the Rio Bonito Formation contains coal layers at the upper levels that have been exploited since the 19th century. In the Criciúma region, Santa Catarina State, Rio Bonito Formation goes from the surface to depths exceeding 200 meters covered by the Palermo and Irati Formations and by Cenozoic period sediments. This lithostratigraphic unit has thick layers of

sandstone, interspersed with siltstones and shales, which are confined aquifers positioned under the first layer of coal called Barro Branco layer.

Coal mining in Brazil promoted economic development mainly in the south of Santa Catarina State, an area known as the Santa Catarina Carboniferous Region, including the town of Criciúma. Some studies show that surface water and groundwater are heavily contaminated by coal mines (Krebs and Possa 2008; CETEM 2005; Krebs and Alexandre 2000; Alexandre 1999). Currently the government and the population are recovering contaminated areas mainly near local rivers (GTA 2018).

This study aims to contribute with the knowledge about groundwater contamination of the Rio Bonito Aquifer through the analysis of chemical data from monitoring wells of the carboniferous areas located within the limits of the Araranguá Hydrographic Basin (AHB). The monitoring wells capture water in fractures of the intensely cemented sandstones of the Rio Bonito Formation above the Barro Branco coal layer in depths of 45 to 90 meters. The depth of the static level of the wells ranges from 30 meters to the surface indicating regional artesianism.

Four groundwater groups were identified from the hydrochemical data analysis whose chemical characteristics result from different processes of rock/water interaction and contamination by coal mines. The results contribute to the improvement for monitoring groundwater contamination in the Carboniferous Basin, especially in south Santa Catarina State.

Geological setting

The studied area belongs to the Paraná Basin, which represents a large intracratonic basin located in the south of Brazil, Paraguay, Uruguay and Argentina (Milani et al. 2007; Philipp *et al.* 2010; Holz *et al.* 2010). According to Milani et al. (1994) e Milani et al. (2007), the Paraná Basin registers six sedimentary super sequences which correspond to dense blocks

of rocks separated by nonconformities. In the northeastern portion of the carboniferous region there are granite rocks from Florianópolis Batholith and in the south there are sediments of the Cenozoic age (Fig. 1b). The geology of the area is dominated by rocks of the Rio Bonito, Palermo and Irati Formations, belonging to the Gondwana I Supersequence, ranging from the Late Carboniferous to the Superior Permian periods (Milani et al. 2007) (Table 1).

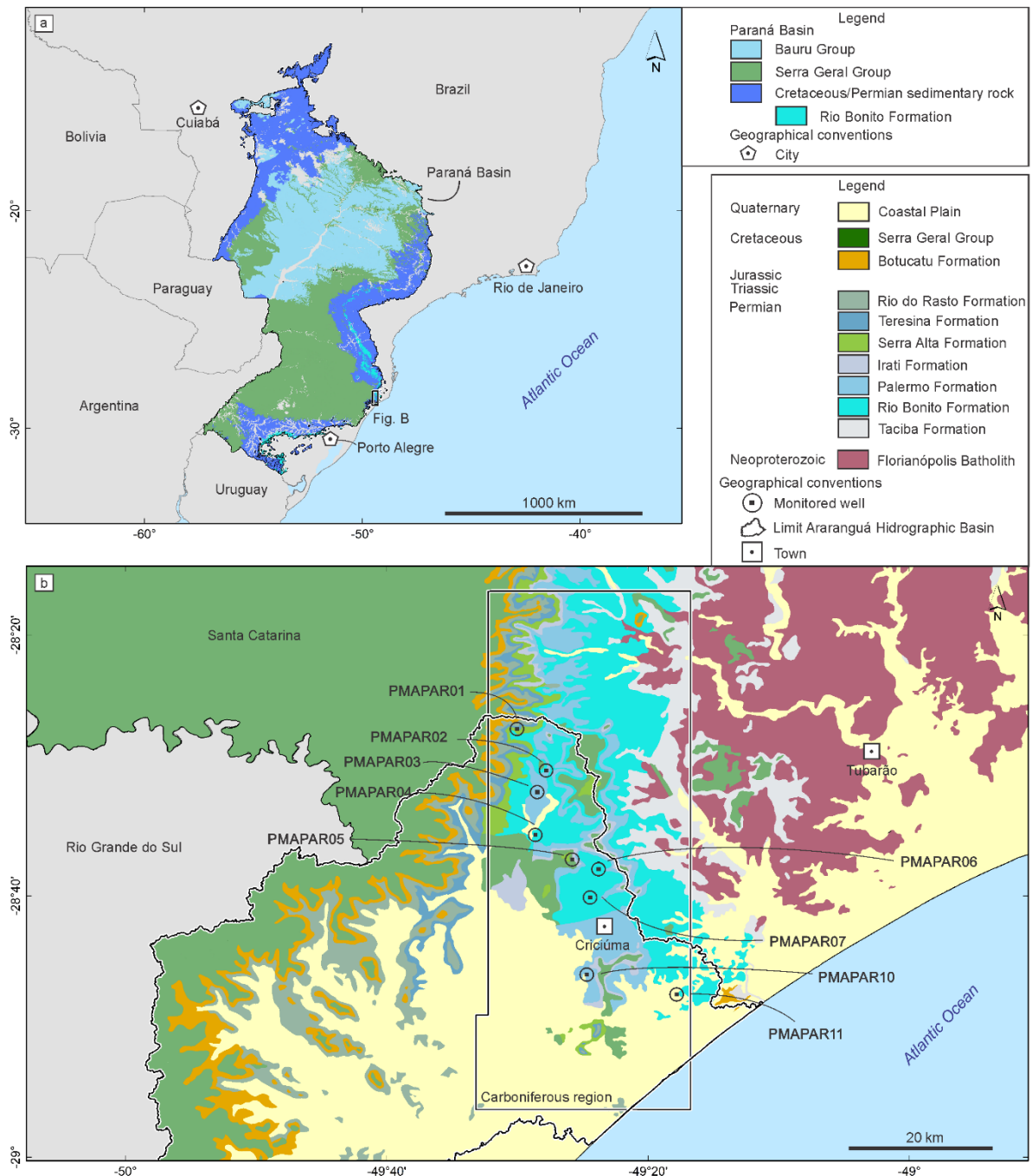


Figure 1. a Geological map of the Paraná Basin in Brazil (modified from CPRM 2014). **b** Geological map of the study area in the Carboniferous region and Rio Araranguá Hydrographic Basin (modified from Wildner *et al* 2014).

Table 1 Carboniferous region stratigraphy; sequences of Milani (2007) include Gondwana III in the Cretaceous and Jurassic and Gondwana I in the Triassic and Permian periods (modified from Krebs 2004).

Era	Period	Group ¹	Formation ¹	Member ¹
Cenozoic			Coastal plain	
Mesozoic	Cretaceous	São Bento	Serra Geral Botucatu	
	Jurassic			
	Triassic	Passa Dois	Rio do Rasto	Morro Pelado
Paleozoic	Permian			Serrinha
			Teresina Serra Alta Irati	Assistência Taquaral
		Guatá	Palermo Rio Bonito	Siderópolis Paraguaçu Triunfo
		Itararé	Taciba	Rio do Sul
Proterozoic	Neoproterozoic		Florianópolis Batholith	

¹Schneider (1974)

The Irati Formation has essentially a pelitic composition and was firstly described by White (1908) to designate the black shales containing fossil records of *Mesosaurus Brasiliensis*. Schneider et al. (1974) proposed the division of Irati Formation into two members: Taquaral (base) and Assistência (top). The Taquaral Member is formed by dark gray to dark shales and dark gray siltstones which turn yellowish (micaceous) and show conchoidal disintegration when weathered. The Assistência Member is formed by gray-dark to black shales interspersed with pyrobituminous shales and some marlstone layers.

The Palermo Formation is deposited above the Rio Bonito Formation and comprises greenish gray to dark gray siltstones and sandy siltstones intensely bioturbated. When weathered the rocks acquire yellowish colors. On the base occur intercalated siltstone and fine to very fine sandstone with parallel plane and lamination of wavy, linsen and flaser type. Towards the top it becomes more pelitic and presents intercalations of fine to medium orthoquartzitic sandstones with hummocky stratification and carbonate cement. Concretions

and nodules of flint, load structures, convolute lamination, pyrite nodules, plant impressions, micas in the bedding plane and fluidization also are frequent on the top (White 1908; Schneider *et al.* 1974; Wildner *et al.* 2014).

The Rio Bonito Formation was first denominated by White (1908), to describe sandstone and siltstones with coal layers. Schneider *et al.* (1974) proposed three depositional sequences named Triunfo, Paraguaçu and Siderópolis members. The coal layers explored in the carboniferous region occur in the Siderópolis Member.

Dias (1995) informally subdivided the Siderópolis Member in the town of Criciúma (SC) into three lithology associations: lower (Bonito sequence as very fine sandstones interspersed with siltstones and coal layers), medium (Barro Branco sequence with medium to thick arkose sandstones) and superior (transgressive sands with fine to very fine quartz-sandstones). Krebs (2004) separated the Siderópolis Member in the Carboniferous region into three different layers: basal sequence, intermediate sequence and upper sequence. The superior sequence is considered to be an aquifer of intergranular porosity and parts of sandstone with porosity filled by SiO₂ matrix.

The transmission and storage capacity of aquifers depends on the structural characteristics of the area. In the lithologies mentioned above, there are open fault systems that may contain sills and dikes of diabase, such as fault systems N5°-30°W, E-W and N-S (N20°E). There are also the system of faults N60°-75°E, which has elevated the surface coal layers; the system N30° - 45°E, which is frequent but restricted, and the system N30° - 45°W (Krebs 2004).

Methodology

This study consists on the analysis of groundwater quality data obtained from monitoring wells installed at different times along the AHB in the last 5 years. The

monitoring of the Carboniferous region is carried out by the Technical Advisory Group for Public Action n°. 93.8000533-4 of the Federal Public Ministry of Brazil (GTA 2018).

Groundwater samples were collected and analyzed by the Brazilian Geological Survey - CPRM (SGB/CPRM) every six months since July 2008 in nine deep wells for monitoring of the Rio Bonito aquifer system (SGB 2018). Samples are collected with a low flow method (ABNT 2010) and preserved according to the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Water Works Association *et al.* 1998).

Each monitoring campaign analyzed the following field parameters: pH, electric conductivity (EC), temperature, dissolved oxygen, oxidation reduction potential (ORP), total dissolved solids, along with the following laboratory parameters: alkalinity, acidity, Cl^- , SO_4^{2-} , Fe total, Fe^{2+} , Mn, Al, Mg, Ca, K, Cu, Cd, Pb, Na, Zn, As, Hg. And since the sixth sampling campaign, held in 2016, the Cl^- , Ca^{2+} , Na^+ e K^+ (SGB 2018) have also been analyzed.

Chemical analyzes were carried out at the laboratories of CECOPOMIN (National training center for mining pollution control) SGB/CPRM in the São Paulo Superintendency (SUREG-SP). The parameters alkalinity and acidity were analyzed with potentiometric titration by electrodes, Cl^- by potentiometric Titrators with silver nitrate using Titrino, SO_4^{2-} gravimetric analysis, Fe^{2+} spectrometric analysis by UV-VIS, Fe total, Mn total, Al total, Mg, Ca, K, Cu, Cd, Pb, Na, Zn with plasma optical emission spectrometry (ICP-OES), and As by hydride for plasma optical emission spectrometry (HVG-ICP-OES). The analytical methods used are the ones defined by the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Water Works Association *et al.* 1998). Field parameters were collected with the multi-parameter probe of the Aquaread: AP 800.

Binary variation diagrams were used in the data analysis to identify geochemical processes of water/rock interaction and contamination by coal mines from the correlation between the chemical parameters. Geochemical modeling with software EQ3/6 (Wolery 1982) was performed to define the equilibrium conditions of the minerals that constitute the

main source of cations and anions dissolved in the water. For the evaluation of drinking water and environmental impacts, the analytical results were compared with the reference values established by Conselho Nacional do Meio Ambiente – the Brazilian national environment council - in the Resolution nº 396/2008 (BRASIL 2008).

Monitoring well data such as location, depth of the wells, depth of the filter section and the year of installation are presented in Table 2. The porosity of sandstones at the top and at the bottom of the coal layer was characterized by petrographic analysis in seven (7) thin sections (a section referring to the PMAPAR01 sample and six samples referring to ARASC09, ARASC10 and ARASCA4, stored in the SGB/CPRM at the collection of Caçapava do Sul – RS).

Table 2 Information on monitored wells, datum SIRGAS 2000 (CPRM 2018).

Monitored well	Coord. E	Coord. N	Year	Aquifer	Depth (m)	Well log	Capture level (m)
PMAPAR01	646908	6851787	2008	Rio Bonito	139	–	–
PMAPAR02	650470	6845886	2009	Rio Bonito	65	x	55 - 65
PMAPAR03	649324	6842825	2010	Rio Bonito	80	x	78 - 80
PMAPAR04	650498	6835661	2013	Rio Bonito	50	x	45 - 47
PMAPAR05	653628	6833222	2013	Rio Bonito	48	x	44 - 46
PMAPAR06	656877	6831875	2013	–	30	–	–
PMAPAR07	655773	6827853	2013	Rio Bonito	30	x	10 - 14
PMAPAR10	655372	6816840	2015	Rio Bonito	88	x	86 - 88
PMAPAR11	666374	68140121	2015	Rio Bonito	64	x	58 - 62

Coord. = UTM coordinate; Year = drilling date of each well; Aquifer = name of well; Depth = total depth of well; x = available well log; Capture level = location of filter; (–) = not determined. Well PMAPAR06 also known as PRBC20.

Results and discussions

Local geology, characterized in the profiles of the wells, shows sediments from the Cenozoic period at the top of the stratigraphic column, shales belonging to the Irati Formation and siltstones from the Palermo Formation in the intermediate zone and sandstones with siltstones intercalation from the Rio Bonito Formation at base (Fig. 2). These sandstone and siltstone levels often have interleaved layers containing plant fossils. The filter section of the

wells is located in the sandstones of the roof of Rio Bonito Formation, being below the Barro Branco coal layer in the wells PMAPAR02 and PMAPAR05.

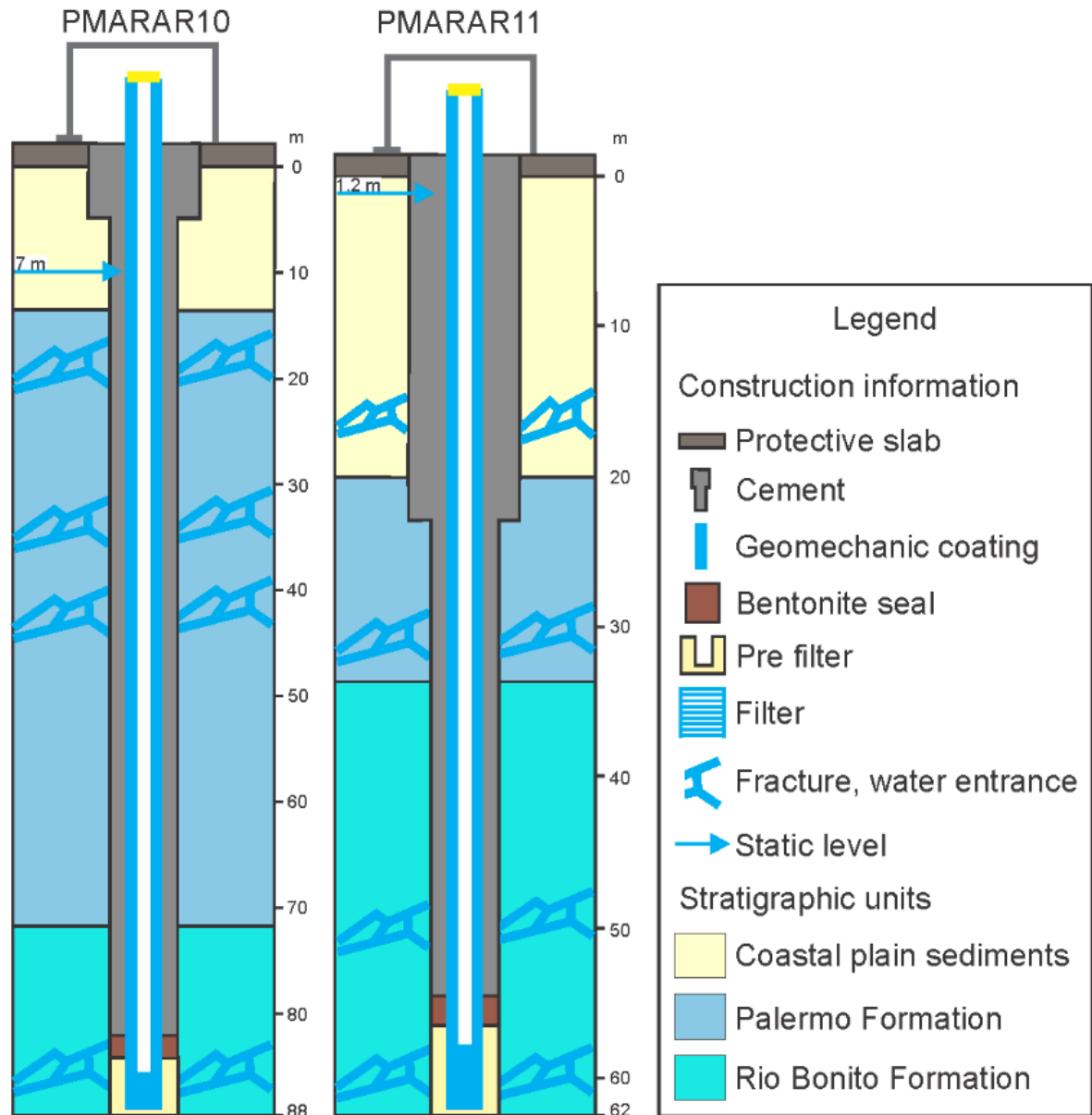


Figure 2 PMAPAR10 and PMAPAR11 well logs.

The sandstones of the roof and base of the coal layer present fine grain and sub-rounded of quartz (90%), microcline (6%), volcanic fragments (2%), plagioclase (2%) and traces of biotite and zircon. Cementation is intense and characterized by abundant diagenetic overgrowth of quartz, in addition to calcite, kaolinite, illite, chlorite, albite and pyrite. The diagenetic processes in these sandstones are marked by the formation of kaolinite from the

microcline dissolution and quartz growth in the pre- and sin-compaction stages. In the later stages of diagenesis, during and after compression, there was the chloritization of volcanic fragments and microcline, illitization of kaolinite, albitization of plagioclase and crystallization of calcite and pyrite.

The cementation and compaction promoted the obliteration of porosity and consequently of intergranular permeability, as shown in figure 3. These sandstones do not present hydraulic properties of intergranular porous aquifer, and so the water flow occurs only through fractures and faults, which attributes to them the behavior of fissural aquifer.

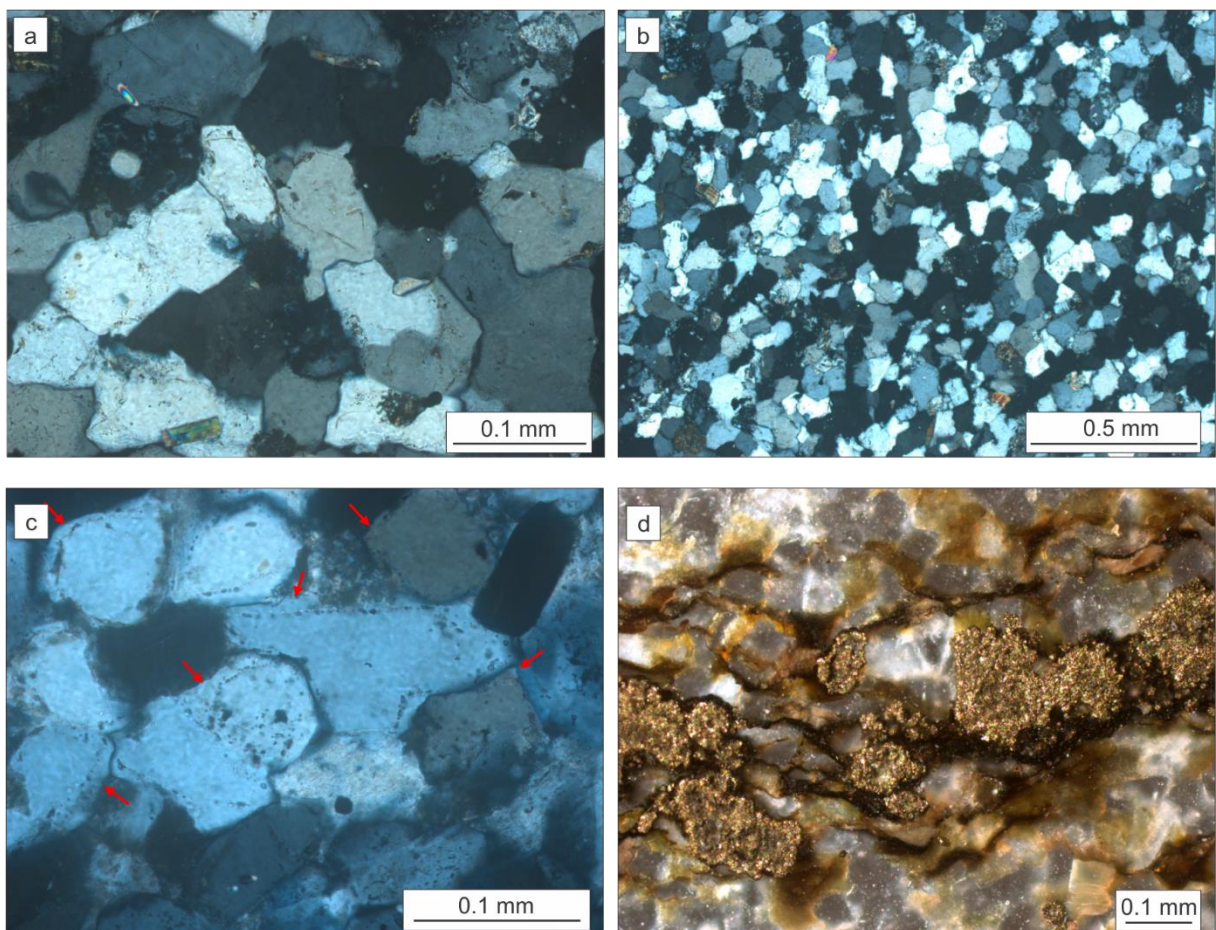


Figure 3 Photomicrography of the thin section in the Rio bonito aquifer. **a** sample collected from the PMAPAR11 well log with overgrow of SiO_2 , **b** sample collected from the PMAPAR11 well log with low porosity, **c** sample collected in ARASC09 drill core with overgrow of SiO_2 , **d** sample collected in the ARASC09 drill core with pyrite.

The wells used in the study are located in carboniferous region near the mining areas (Fig. 4), and present multiple water inflows through fractures in the Rio Bonito Formation.

The PMAPAR01 well is a checkpoint for environmental monitoring in the Araranguá Hydrographic Basin, since it is situated outside the area of influence of coal mines, while the PMAPAR07 well is the only located in the urban area in the town of Criciúma. Results of the groundwater quality monitoring are presented in Table 3, which shows the minimum, maximum and average concentrations and the standard deviation of each parameter analyzed in the field (pH, EC and ORP) and in the laboratory. The water in the monitored wells presents significant chemical differences, which result from geological and hydrogeological variations in the local aquifers, as well as the intensity of contamination by the coal mines.

Electric conductivity, alkalinity, sulfate and sodium are the parameters that record the highest concentrations in most wells, while copper, lead, cadmium, arsenic and mercury present lower concentrations than the respective LQ in all samples analyzed during the monitored period with the exception of Pb in PMAPAR02 well and Cu in PMAPAR03 well. Zinc was found in all analyzed samples with contents between 0.02 and 0.61 mg/L, except for a sample collected in the PMAPAR03 well, which registered 3.18 mg/L.

The PMAPAR11 well contains the most salinized waters, registering the highest values of Electric Conductivity, Chlorides, Sodium, Calcium and Potassium, whereas the PMAPAR03 well had the most dilute and acidic waters, with low electric conductivity, average pH equal to 5.44 and the lowest concentrations of Calcium, Sodium, Manganese and Potassium. The highest pH was recorded in PMAPAR04, with an average value of 8.03. Iron, which represents one of the most important contaminants associated with coal mines, has high concentrations in the PMAPAR05 (up to 11.6 mg/L), PMAPAR06 (up to 40.40 mg/L) and PMAPAR07 (up to 9.74 mg/L) wells. Manganese and sulfate, also associated with coal mining, have concentrations up to 4.02 mg/L and 1004.25 mg/L, respectively in the PMAPAR05 well indicating the occurrence of contamination groundwater by the coal mines in this well. Concentrations of the monitored parameters showed significant and random variations in some wells over the monitored time period (Fig. 5), indicating the chemical

heterogeneity of groundwater due to variations in the aquifer dynamics and water/rock interaction processes over time (AESRD 2011, Deiwakh 2006, McMahon and Bohlke 2006, Roisenberg et al. 2003).

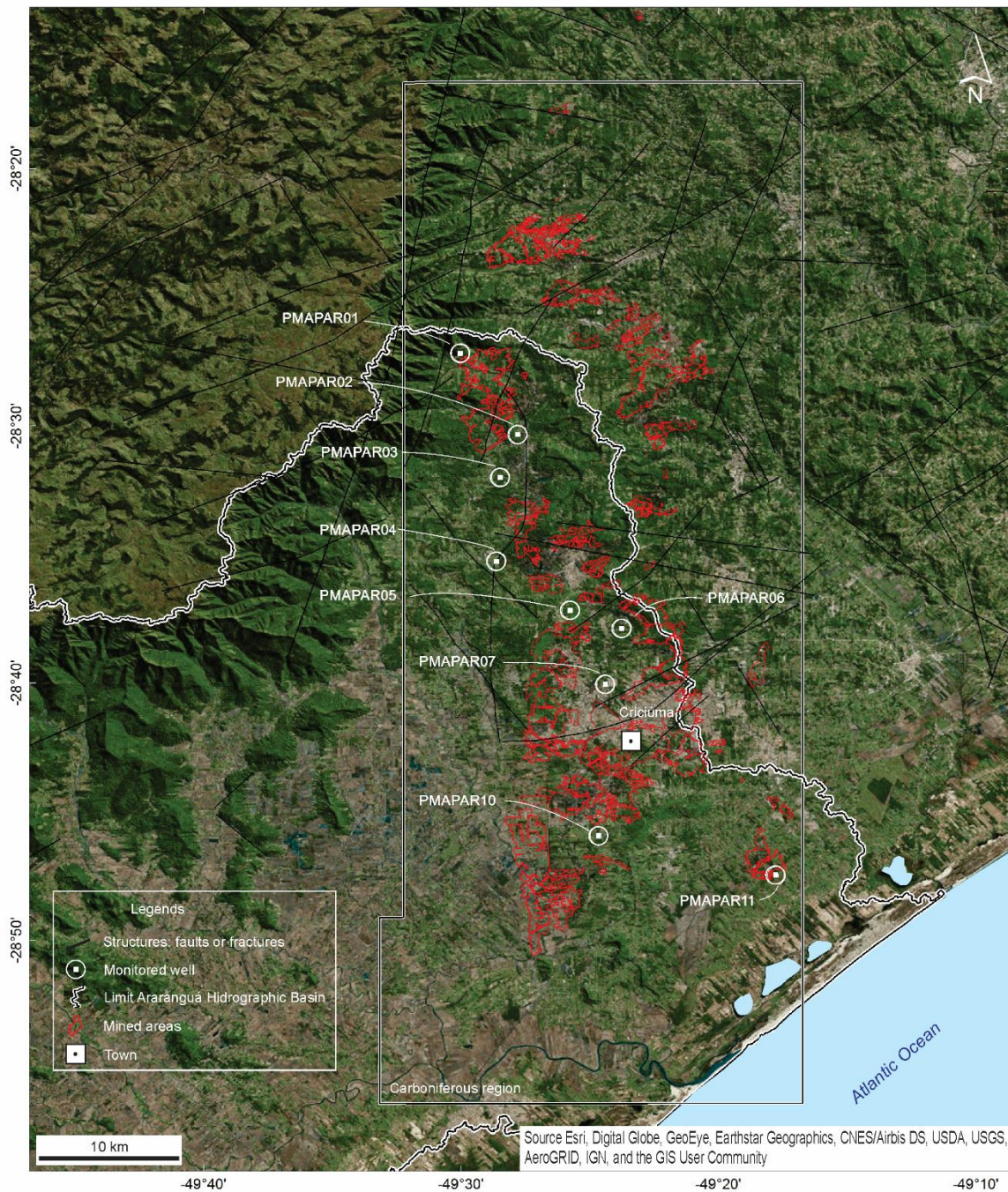


Figure 4 Location of wells and mined areas (modified DNPM and SIECESC 2009) in the Carboniferous region and Araranguá Hydrographic Basin (modified SDS/DRHI 2013/2015).

Table 3 Average (a), minimum (min), and maximum (max) standard deviation (sd) and total campaign numbers (c) by wells from collected samples in the studied Carboniferous region.

	PMAPAR01					PMAPAR02					PMAPAR03				
	a	min	max	sd	c	a	min	max	sd	c	a	min	max	sd	c
pH	6.71	5.38	7.77	0.71	11	6.25	5.46	7.03	0.45	11	5.44	4.47	6.41	0.82	7
Elec. Cond.	399.23	309.00	644.00	101.83	11	146.30	65.50	223.00	49.26	11	50.07	27.00	99.00	33.21	7
ORP	99.6	97.4	101.8	3.1	2	60.2	29.1	91.3	43.9	2	246.8	246.6	247.0	0.3	2
Alkal.	211.68	155.28	240.20	24.17	10	66.53	33.27	96.34	19.36	11	12.40	6.34	24.94	6.65	6
Cl ⁻	4.38	2.54	8.45	2.75	4	2.70	1.53	4.17	1.05	5	0.52	0.02	3.00	1.21	5
SO ₄ ²⁻	16.64	4.46	31.69	7.82	10	12.37	4.78	30.46	9.00	11	30.14	4.94	76.78	24.29	7
Ca	45.04	33.00	53.30	5.18	11	20.42	8.66	30.00	6.15	11	3.38	3.38	3.38	-	1
Na	19.74	1.62	106.00	32.54	9	3.30	2.71	3.89	0.41	8	0.59	0.04	3.65	1.35	7
Mg	17.33	10.10	20.50	2.99	11	1.93	1.26	3.04	0.50	11	2.53	0.03	4.04	1.81	5
Fe	0.54	0.16	1.12	0.31	11	1.67	0.17	3.36	0.92	11	0.70	0.10	3.45	1.22	7
Mn	0.26	0.07	0.74	0.21	11	0.75	0.24	1.20	0.29	11	0.02	0.01	0.04	0.01	6
Al	0.06	0.01	0.22	0.07	11	0.17	0.00	0.71	0.22	11	0.07	0.01	0.15	0.05	7
K	2.09	1.04	9.02	2.38	11	1.30	0.71	5.49	1.39	11	1.11	0.52	1.40	0.30	7
Cu (LQ=0,002)	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	-	< LQ	0,009	-	8	3,19	1,15	7,14	1,61	8
Cd (LQ=0,002)	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8
Pb (LQ=0,005)	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	0,21	0,06	0,45	0,17	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8
Zn (LQ=0,005)	0,05	0,02	0,08	0,02	8	0,10	0,02	0,42	0,14	8	0,98	0,03	6,18	1,65	8
As (LQ=0,002)	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8
Hg (LQ=0,0003)	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8

Elec. Cond. = electrical conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$); ORP = oxidation reduction potential (mV); Alkal. = alkalinity (CaCO_3 mg/l); ions in mg/L; (-) not determined; LQ = limit of quantification of the method.

Table 3 (cont.) Average (a), minimum (min), and maximum (max) standard deviation (sd) and total campaign numbers (c) by wells from collected samples in the studied Carboniferous region.

	PMAPAR04					PMAPAR05					PMAPAR06 (PRBC20)				
	a	min	max	sd	c	a	min	max	sd	c	a	min	max	sd	c
pH	8.03	6.88	9.11	0.72	8	7.27	5.36	9.59	1.11	8	6.30	4.90	6.95	0.68	10
Elec. Cond.	493.06	416.00	637.00	75.30	8	1528.06	1383.50	1667.50	112.89	8	249.30	218.50	369.00	43.73	10
ORP	-141.7	-142.5	-140.9	1.1	2	-88.5	-106.2	-70.8	25.0	2	31.5	-27.1	90.2	82.9	2
Alkal.	260.98	234.00	275.82	18.40	7	205.71	157.32	450.73	99.31	7	74.91	55.92	89.06	11.01	10
Cl ⁻	5.19	5.19	5.19	-	1	8.97	6.91	11.04	2.92	1	3.46	1.75	4.80	1.41	4
SO ₄ ²⁻	44.18	30.87	71.62	12.45	8	799.56	714.13	1004.25	83.66	8	14.58	5.57	25.11	5.97	10
Ca	9.76	2.41	13.00	3.36	8	255.33	169.00	418.00	74.79	8	8.01	4.43	9.46	1.46	10
Na	107.85	83.10	132.00	15.53	6	114.77	78.40	177.00	31.85	6	17.90	12.20	20.90	2.55	8
Mg	1.55	1.05	1.83	0.27	8	22.24	0.49	29.00	8.74	8	5.35	4.06	6.08	0.71	10
Fe	0.51	0.31	0.74	0.14	8	4.85	0.72	11.60	3.01	8	27.27	0.40	40.40	11.07	10
Mn	0.06	0.03	0.09	0.02	8	2.22	0.00	4.02	1.15	8	0.86	0.02	1.36	0.33	10
Al	0.11	0.01	0.27	0.10	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	0.03	0.01	0.12	0.04	10
K	2.99	0.44	4.61	1.27	8	25.44	5.28	167.00	53.15	8	2.94	1.58	12.80	3.47	10
Cu (LQ=0,002)	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	-	< LQ	0,15	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8
Cd (LQ=0,002)	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8
Pb (LQ=0,005)	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8
Zn (LQ=0,005)	0,02	0,01	0,04	0,01	8	0,36	0,03	1,29	0,42	8	0,01	0,02	0,61	0,20	8
As (LQ=0,002)	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8
Hg (LQ=0,0003)	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	8

Elec. Cond. = electrical conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$); ORP = oxidation reduction potential (mV); Alkal. = alkalinity (CaCO_3 mg/l); ions in mg/L; (-) not determined; LQ = limit of quantification of the method.

Table 3 (cont.) Average (a), minimum (min), and maximum (max) standard deviation (sd) and total campaign numbers (c) by wells from collected samples in the studied Carboniferous region.

	PMAPAR07					PMAPAR10					PMAPAR11				
	a	min	max	sd	c	a	min	max	sd	c	a	min	max	sd	c
pH	6.04	5.20	7.48	0.67	8	7.45	6.73	8.81	0.89	6	6.92	5.53	7.57	0.84	6
Elec. Cond.	173.69	100.50	395.50	93.09	8	424.00	348.00	570.00	81.54	6	7766.5	6723.0	8400.0	680.0	6
ORP	47.10	46.15	48.05	0.95	2	-91.1	-94.4	-87.9	4.6	2	-24.8	-88.0	38.3	89.3	2
Alkal.	40.82	33.59	47.83	4,44	8	217.05	187.17	231.76	15.89	6	67.03	56.73	89.06	11.33	6
Cl ⁻	5.30	4.63	5.97	0,67	2	10.28	10.28	10.28	-	1	1948.3	1684.0	2610.4	444.8	4
SO ₄ ²⁻	14.17	5.93	23.05	4.86	8	23.05	15.21	36.63	7.30	6	321.51	281.23	363.18	34.25	6
Ca	7.23	5.93	9.15	1.15	8	18.70	15.80	23.20	2.83	6	283.00	252.00	304.00	18.95	6
Na	10.22	8.72	11.00	0.72	6	69.50	60.40	76.60	8.28	3	1382.5	1230.0	1520.0	118.7	4
Mg	2.57	2.16	3.10	0.25	8	2.50	2.04	2.77	0.27	6	3.27	2.81	3.75	0.37	6
Fe	7.02	5.28	9.74	1.40	8	0.22	0.08	0.33	0.10	6	0.12	0.02	0.17	0.06	6
Mn	0.16	0.13	0.26	0.04	8	0.04	0.02	0.06	0.01	6	0.19	0.16	0.22	0.02	6
Al	0.06	0.01	0.28	0.09	8	0.02	0.01	0.07	0.03	6	0.01	0.01	0.01	0.00	5
K	2.47	2.03	3.01	0.39	8	3.18	1.68	4.01	0.86	6	43.37	38.10	46.10	2.83	6
Cu (LQ=0,002)	-	< LQ	0,13	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	6	< LQ	< LQ	< LQ	-	4
Cd (LQ=0,002)	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	6	< LQ	< LQ	< LQ	-	4
Pb (LQ=0,005)	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	6	< LQ	< LQ	< LQ	-	4
Zn (LQ=0,005)	0,03	0,04	0,01	0,01	8	0,02	0,01	0,03	0,01	6	0,02	0,01	0,02	0,01	4
As (LQ=0,002)	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	6	< LQ	< LQ	< LQ	-	4
Hg (LQ=0,0003)	< LQ	< LQ	< LQ	-	8	< LQ	< LQ	< LQ	-	6	< LQ	< LQ	< LQ	-	4

Elec. Cond. = electrical conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$); ORP = oxidation reduction potential (mV); Alkal. = alkalinity (CaCO_3 mg/l); ions in mg/L; (-) not determined; LQ = limit of quantification of the method.

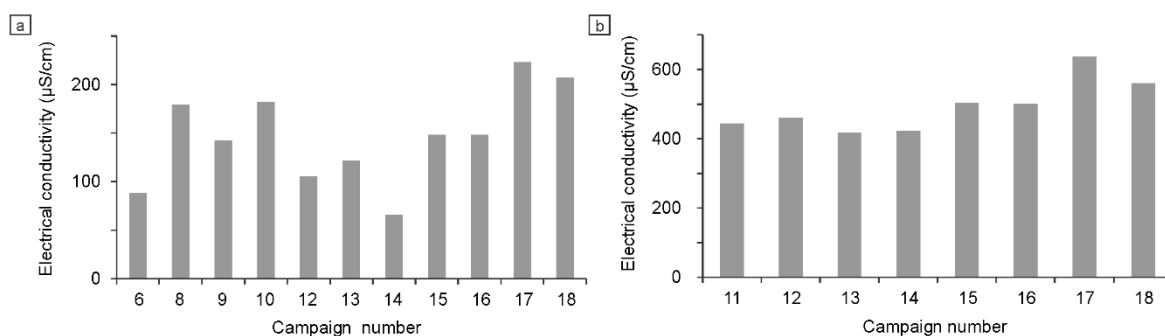


Figure 5 Variation diagrams of electric conductivity during collection campaigns. **a** PMAPAR02, **b** PMAPAR04.

Analysis of binary variation diagrams allowed the identification of four chemically distinct groundwater groups in the monitored wells being distributed as: Group 1 - PMAPAR05 well; Group 2 - PMAPAR11 well; Group 3 - PMAPAR01, PMAPAR04 e PMAPAR 10 wells; and Group 4 - PMAPAR02, PMAPAR03, PMAPAR06 e PMAPAR07 wells (Fig. 6).

Groups 1 and 2 present the most salinized waters with the highest concentrations of sulfate, calcium and sodium. Group 1 differs from group 2 due to higher sulfate content, lower electric conductivity and lower sodium concentration.

Group 1 (PMAPAR05 well) is located between three coal mines and its waters are characterized by the highest concentrations of sulfate (up to 1004.25 mg/L), high calcium (up to 418 mg/L), sodium (up to 177 mg/L) and alkalinity (up to 450 mg/L CaCO_3), in addition to the supersaturation in calcite and dolomite. The high concentrations of calcium, sodium, alkalinity and sulfate and low chloride combined with a good positive correlation between $\text{Ca} + \text{Na}$ and $\text{SO}_4 + \text{Alkalinity}$ (Fig. 7) is a strong indicative that the dissolution of pyrite, gypsum and calcite associated with cation exchange are the most relevant processes of water/rock interaction in the definition of the geochemical signature.

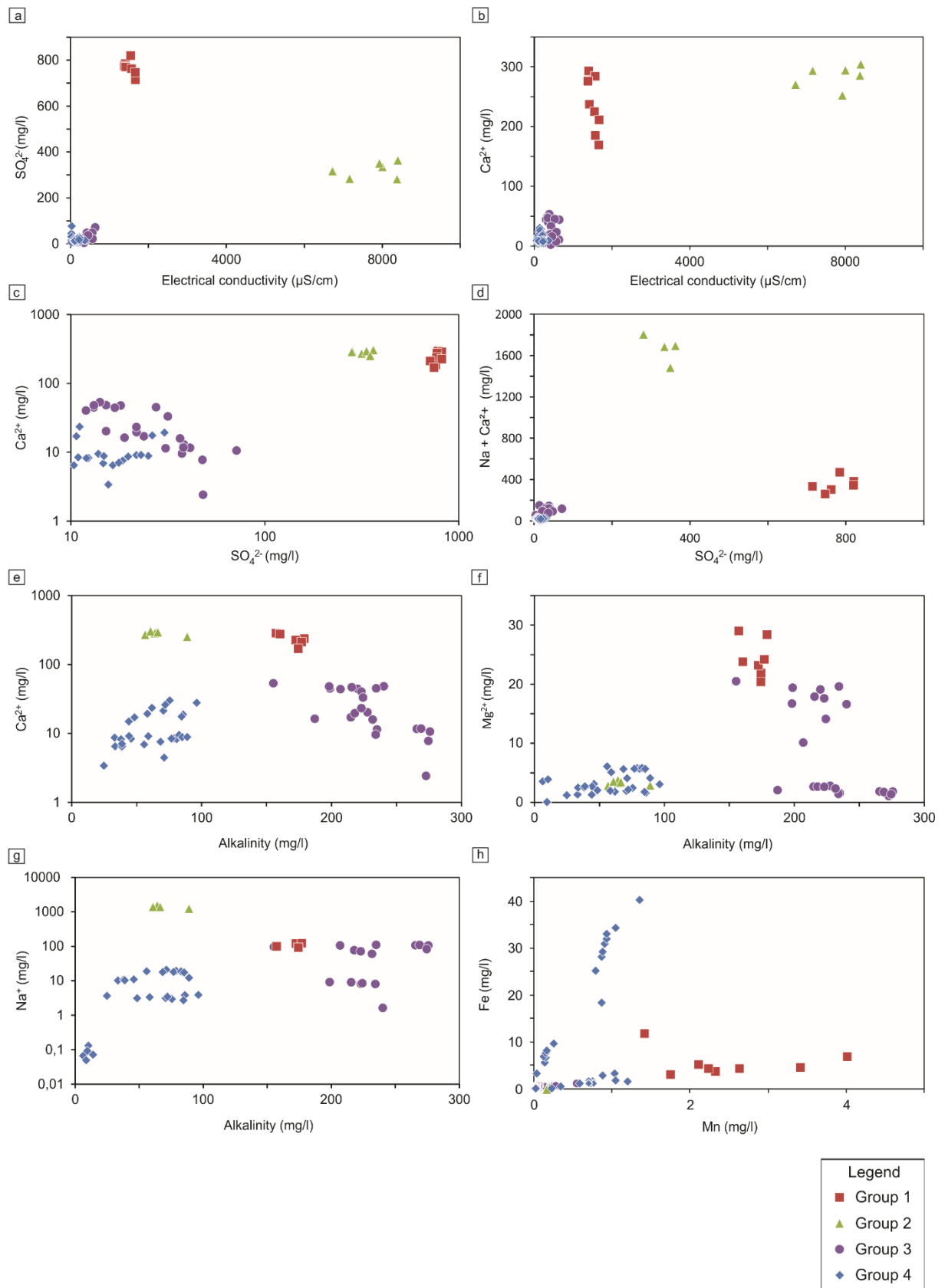


Figure 6 Binary variation diagrams for metals, electric conductivity, sulfate and alkalinity. **a** SO_4^{2-} versus electric conductivity diagram, **b** Ca^{2+} versus electric conductivity, **c** Ca^{2+} versus SO_4^{2-} , **d** $\text{Na} + \text{Ca}^{2+}$ versus SO_4^{2-} , **e** Ca^{2+} versus Alkalinity, **f** Mg^{2+} versus Alkalinity and **g** Na^+ versus Alkalinity, **h** Fe (total) versus Mn (total).

Gypsum and calcite are found filling fractures of the Rio Bonito Formation sandstones and siltstones of the Palermo Formation, and calcite also occurs as cement of these sandstones. Cation exchange is the source of sodium and occurs by the adsorption of calcium in solution ($\text{Ca}^{2+}_{\text{sol}}$) and sodium desorption ($\text{Na}^{+}_{\text{ads}}$) in the clay minerals according to reactions 1, 2, 3 e 4.

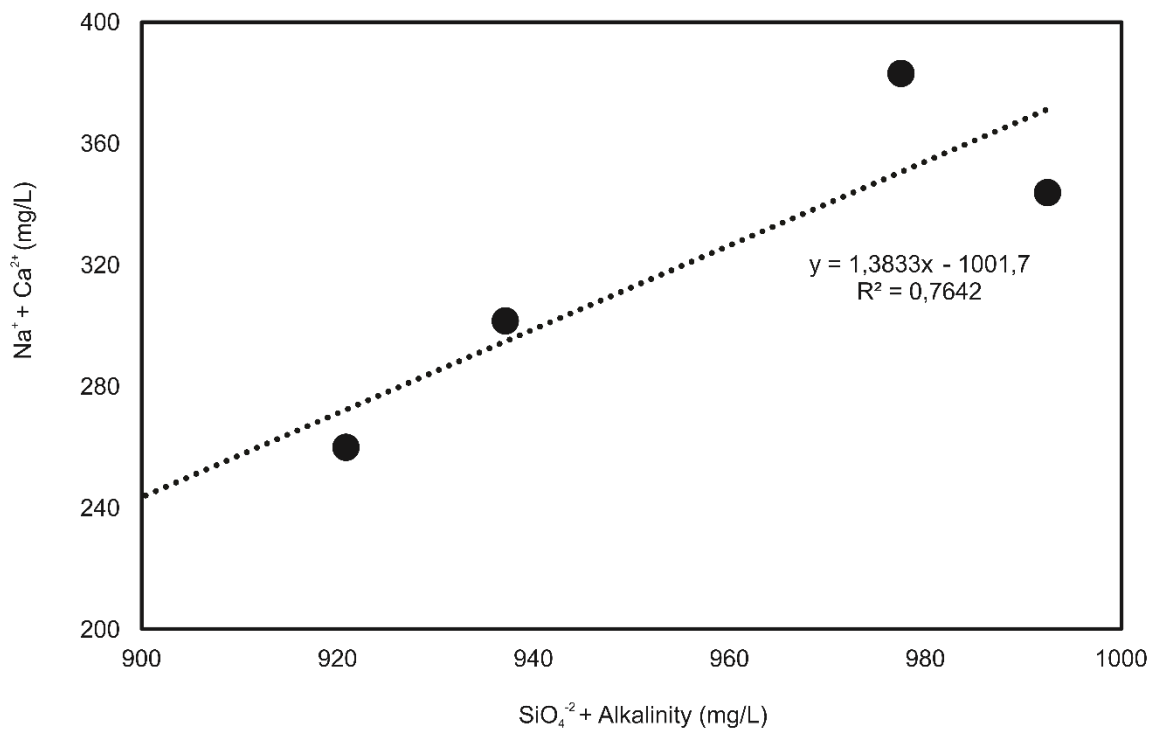
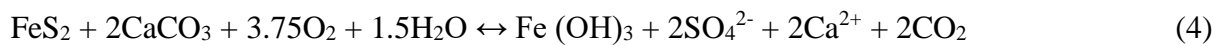


Figure 7 Variation diagram of $\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$ versus $\text{SO}_4^{2-} + \text{Alkalinity}$ of Group 1.

Sulfate originates from the dissolution of gypsum and also from the oxidation of pyrite associated with the hydrolysis of calcite, which is a typical reaction in aquifers impacted by coal mining. The reactions described in equations 2 and 4 solubilize SO_4^{2-} e Ca^{2+} in the 1:1

ratio. The groundwater group 1 has molar ratio $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ close to 1,46, indicating an excess of sulfate in relation to calcium. The calcium deficiency in relation to the stoichiometry in equations 1, 2 and 4 probably results from the process of exchange of cations with sodium (Eq. 3). This exchange reaction occurs in clay minerals or organic matter present in aquifers with sodium adsorption and it is evidenced by the good correlation between $\text{SO}_4^{2-} + \text{Alkalinity}$ and $\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+$ (Figure 7). Therefore the sulfate, in addition to iron and manganese, with concentrations above the maximum values allowed for drinking water (Brasil 2008) are probably in part from the coal mines next to well.

Group 2 (PMAPAR11 well) shows high electric conductivity and the highest concentrations of chloride and sodium (Fig. 6g). The molar ratio Cl/Na is close to 0.80, indicating that the dissolution of halite is an important process in the geochemical signature of this water. The value of this ratio, lower than the stoichiometric ratio of halite (1:1), points to an additional source of sodium that is the cation exchange with calcium according to the reaction of equation 3.

Another relevant characteristic of this group resides in the high concentrations of Sulfate and Calcium, and relatively low Alkalinity (Fig. 6c e 6e), pointing to gypsum as the main source of calcium and sulfate. Halite and gypsum are high solubility minerals that occur in evaporites of the Irati Formation (Teixeira and Viero 2017, Kern *et al.* 2008, Hachiro 1997), stratigraphically located above the Palermo and Rio Bonito Formations.

Therefore, the water from Group 2 probably has their geochemical signature resulting from the circulation in that lithostratigraphic unit where it interacts intensely with the soluble minerals therein contained. It is important to emphasize that this group has sulfate and sodium concentrations above the Brazilian drinking water limit (Brasil 2008), which restricts the use of this water for this purpose.

Groups 3 and 4 are characterized by low salinity, with electric conductivity of up to 640 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in Group 3 and 369 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in Group 4. These groups differ from one another by

the higher alkalinity of group 3 (Fig. 6e e 6f), whose values are the highest of all groups (up to 275 mg/L of CaCO_3).

Group 3 also presents two subtypes of water, which differ in the content of magnesium, sodium and calcium. Within this group, the PMAPAR04 and PMAPAR10 wells exhibit higher concentrations of sodium and lower concentrations of calcium and magnesium in relation to the PMAPAR01 well. Calcite hydrolysis (Equation 1), which is a common mineral in the aquifers of the studied area, both filling fractures and carbonate nodules in the Rio Bonito and Irati Formations, is probably the main source of Ca^{2+} dissolved in the waters of these three monitoring wells. In the PMAPAR04 and PMAPAR10 wells cation exchange processes between Ca^{2+} and Na^+ also occur according to the reaction described in Equation 3.

Group 4 groundwater presents direct recharge by rainwater with low concentrations of all parameters indicating a short residence time in the aquifer and poor interaction of water/rock processes. The PMAPAR06 and PMAPAR07 wells have a slightly higher sodium concentration than the PMAPAR03 and PMAPAR02 wells, which is probably due to a greater influence of the meteoric recharge, since the uptake is shallower and the water/rock interactions are smaller. The PMAPAR06 and PMAPAR07 wells capture groundwater at depths of up to 15 m, while the PMAPAR02 and PMAPAR03 wells capture at depths above 50 meters (Table 2).

Geochemical modeling of the equilibrium conditions of minerals of the aquifers shows the saturation index (SI) of those representing the major sources of dissolved ions in groundwater (Table 4). All analyzed samples record supersaturation in goethite, indicating that this metal is not dissolved in water, but probably in the suspended fraction. Calcite exhibits supersaturation in the PMAPAR01, PMAPAR04 and PMAPAR11 wells in two sample campaigns; in the PMAPAR10 well in one campaign, and in the PMAPAR05 well in three campaigns. The dolomite that represents the main source of Mg is supersaturated in the following wells: PMAPAR05 (five campaigns), PMAPAR04 (four campaigns), PMAPAR01

(two campaigns) and PMAPAR10 (one campaign). On the other hand, the gypsum is unsaturated in all analyzed samples.

Table 4 Saturation index calculated to wells in software EQ3/6 (Wolery 1982).

Monitoring wells	Colection date	Saturation index				
		Calcite	Dolomite	Goethite	Gypsum	
PMAPAR02	20/09/2012	-1,33	-2,10	9,09	-4,18	
	12/04/2013	-2,22	-4,03	9,06	-4,10	
	12/11/2013	-4,07	-7,70	8,37	-4,52	
	06/11/2014	-2,86	-5,10	8,70	-4,11	
	24/06/2016	-2,82	-5,18	9,11	-4,22	
	22/11/2016	-2,43	-4,46	-4,09	-4,09	
	01/06/2017	-4,42	-8,34	8,14	-3,43	
	07/11/2017	-4,89	-9,25	7,79	-3,60	
PMAPAR03	14/06/2017	-8,85		6,09	-4,86	
Group 4	20/09/2012	-2,58	-3,39	10,52	-4,46	
	12/04/2013	-3,23	-4,83	10,65	-4,54	
	04/11/2013	-7,26		7,98	-5,33	
	PMAPAR06	10/11/2014	-5,31	-8,90	9,51	-4,32
		04/07/2016	-2,43	-3,22	10,70	-4,72
		21/11/2016	-2,43	-3,28	10,82	-4,35
		09/06/2017	-4,35	-7,09	10,11	-4,34
		27/10/2017	-2,14	-2,86	8,30	-4,05
PMAPAR07	04/11/2013	-6,01		8,74	-4,66	
	10/11/2014	-4,85	-8,40	9,24	-4,40	
	23/06/2016	-4,48	-7,64	9,26	-4,65	
	21/11/2016	-3,84	-6,50	9,58	-4,44	
	30/05/2017	-5,23	-9,15	9,12	-4,31	
Group 3	PMAPAR01	06/10/2011	-0,82	-0,33	9,23	-3,60
		22/04/2013	-1,49	-1,68	7,54	-3,51
		11/11/2014	-1,05	-0,71	7,82	-3,66
		08/07/2016	0,24	1,85	8,39	-3,74
		30/11/2016	0,43	2,20	9,00	-4,30
		14/06/2017	-1,09	-0,76	8,45	-3,27
		14/11/2017	-1,32	-1,25	8,52	-3,30
	PMAPAR04	10/11/2014	-1,62	-2,53	8,42	-3,91
		07/07/2016	1,35	3,57	8,52	-3,92
		21/11/2016	1,15	3,09	8,47	-3,90
		09/06/2017	-0,19	0,45	8,47	-3,51
27/10/2017	-0,17	0,24	9,92	-0,97		
PMAPAR10	01/12/2016	0,78	2,30	8,32	-3,86	
	14/06/2017	-1,02	-1,43	8,30	-3,71	
	16/11/2017	-1,06	-1,06	8,34	-3,65	
Group 2	PMAPAR11	23/06/2016	-0,36	-1,38	7,67	-1,52
		23/11/2016	0,08	-0,59	7,78	-1,34
		02/06/2017	-0,10	-0,92	7,71	-1,40
		01/11/2017	0,17	-0,40	7,66	-1,43
Group 1	PMAPAR05	26/04/2013	3,65	5,25	8,41	-0,62
		10/11/2014	-3,50	-6,53	8,47	-0,68
		04/07/2016	0,70	1,95	9,56	-0,91
		21/11/2016	0,85	2,18	9,68	-0,79
		30/05/2017	-0,01	0,51	9,80	-0,88
26/10/2017	-0,17	0,24	9,92	-0,97		

Table 5 shows the maximum concentrations of groundwater allowed for human consumption and irrigation. Among the analyzed parameters, sulfate presents concentrations above the drinking water limit in groups 1 and 2, iron in groups 1, 3 and 4, sodium and chloride in group 2 and manganese in all groups. Aluminum does not show problems of drinking water limit, registering concentrations higher than the limit allowed only in samples from three collections from the PMAPAR02 well (Group 4). No drinking water restrictions were found regarding Cu, Cd, Pb, Zn, As and Hg metals. The parameters for the Ca, Mg and K metal do not present reference values in the CONAMA resolution and therefore are not included in table 5.

Table 5 List of Maximum Permissible Values (MPV) and Practical quantification limits (PQL) of CONAMA Resolution 396 of 2008 for the groundwater parameters collected in the monitoring of the Carboniferous region of Santa Catarina (modified Brasil 2008).

Parameters	Human Consumption	Irrigation	Practical Quantification Limit - PQL
Cl	250	100 – 700	2
SO ₄ ²⁻	250	-	5
Na	200	-	1
Fe	0,3	5	0,1
Mn	0,1	0,2	0,025
Al	0,2	5	0,05
Cu	2	0,2	0,05
Cd	0,005	0,01	0,005
Pb	0,01	5	0,01
Zn	5	-	-
As	0,01	-	0,005
Hg	0,001	0,002	0,001

Ions in mg/L.

An important characteristic of all groups is the low concentrations of heavy metals dissolved in groundwater, even though they are relatively abundant in the coal of the region (Philipp *et al.* 2010). Table 6 shows average concentrations of manganese, copper, cadmium, lead, zinc, arsenic and mercury in the mined coal layers from the Carboniferous Region of Santa Catarina and the average value for coal in Santa Catarina. The coal from this State, which represents the main source of groundwater contamination in the region, has significant heavy metal content and Cadmium is the least abundant. However, the content of dissolved

metals is low, mainly at the pH of the water that varies from slightly acidic to alkaline, in a range between 5 and 9, due to the dissolution of calcite associated with the oxidation of pyrite (reactions 1 and 4). Metals have little geochemical mobility in the recorded pH range tending to the sorption in the clay minerals and in the organic matter contained in the sedimentary rocks of the region (Kern *et al.* 2007, Sposito 2016, Fetter 2017).

Table 6 Averaged values of heavy metals for the coal in the Santa Catarina coal region. (Modified of Kalkreuth *et al.* 2010).

Parameters	BB	BO	IR	SC-mean
Mn	138.7	239.6	18.3	150.4
Cu	33.6	17.7	11.6	25.9
Cd	0.3	0.1	0.1	0.2
Pb	64.9	33.7	78.6	58.0
Zn	118.8	36.9	45.2	84.9
As	30.8	26.6	19.6	28.0
Hg	0.56	0.27	0.41	0.46

All data in ppm. BB: Barro Branco, BO: Bonito, IR: Irapuá, SC-mean: mean of Santa Catarina coal.

Conclusion

The groundwater studied is captured in the Rio Bonito Formation sandstones near the top and the base of the Barro Branco layer. It presents different geochemical characteristics that depend on the residence time, the lithology of the aquifers in which it circulates, the presence of fractures with filling of soluble minerals and the occurrence of contamination by coal mining.

In short this study is the observation of the low porosity and intergranular permeability of the Rio Bonito sandstones, above and below the coal layer of the studied area. Several studies indicate regional characteristics of the Rio Bonito Formation marked by great textural variation, of transmissivity and storage of groundwater constituting important aquifers in some levels formed by medium to thick sandstones (Krebs 2004, Dias 1995, Machado *et al.* 1984, Machado 2013). These properties, typical of aquifers with porosity and intergranular permeability, are not observed in the base and top sandstones of the coal layer. In conclusion the layer behaves as a fractured aquifer.

The analytical chemical data exhibits a high compositional variation of the groundwater of the Carboniferous Region of Santa Catarina and in the Araranguá Hydrographic Basin. Data analysis allowed the identification of four groups of groundwater with different chemical characteristics: Group 1 (PMAPAR05); Group 2 (PMAPAR11); Group 3 (PMAPAR01, PMAPAR04, PMAPAR10); and Group 4 (PMAPAR02, PMAPAR03, PMAPAR06 and PMAPAR07). Groups 1, 2 and 3 show strong interaction with aquifers, unlike group 4 in which the water/rock interaction processes are incipient.

The PMAPAR05 well (Group 1) is the only one that exhibits contamination by coal mining with high concentrations of sulfate and electric conductivity. The main characteristics of Group 2 (PMAPAR11) are the high concentration of chlorine and sodium in a ratio close to 1:1 indicating that the waters of this group percolate aquifers formed by rocks of marine origin such as the Irati Formation. It is also verified the presence of sulfate in significant concentrations, probably due to the dissolution of gypsum registered filling the fractures in the Rio Bonito and Palermo Formations. Group 3 chemical characteristics result mainly from the dissolution of calcite plus sodium cation exchange of calcium. Group 4 has poor interaction with the aquifer which means that the water in the wells is geochemically similar to that of the recharge water.

The high concentration of total iron recorded in all the wells is due to the presence of suspended solid fraction, because the pH and Eh conditions are favorable to the precipitation of iron oxides, according to results of the geochemical model.

The four groups presented restrictions on using the water for human consumption (Brazil 2008) due to concentrations of some parameters analyzed during the monitoring campaigns that exceeded the permitted limits.

The data obtained discover that the chemical compositions of groundwater vary randomly over time during the monitored period. The PMAPAR05 well, contaminated by coal mining, does not show a tendency to improve water quality. Concluding this study

demonstrates the importance of hydrochemical monitoring in the upper layer of the Rio Bonito aquifer of the Paraná basin.

References

ABNT (2010) ABNT NBR 1847 Amostragem de águas subterrâneas em poços de monitoramento – métodos de purga. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 15 p.

AESRD. Alberta Environmental and Sustainable Resource Development (2011) Nitrate in Groundwater. <http://environment.alberta.ca/02884.html>. Accessed January 20, 2018

Alexandre NZ (1999) Diagnóstico Ambiental da Região Carbonífera de Santa Catarina: degradação dos recursos naturais. *Revista Tecnologia e Ambiente, UNESC* 5:2:35-50

American Water Works Association and Water Environment Federation (1998) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington, DC 20001-3710

Araújo LM, França AB, Potter PE (1999) Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA. *Hydrogeology Journal* 7:317-336

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 396, de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.

<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>. Accessed november 29, 2018

Campos HCNS (2000) Modelación Conceptual y Matemática del Acuífero Guarani, Cono Sur. *Acta Geológica Leopoldinense, Série Mapas* 4:3-50

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

Dejwakh N (2006) Sources of nitrate in groundwater below a major agricultural area: the high plains in midwest United States. US Geological Survey (USGS).

Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, Sindicato da Indústria de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina - SIECESC (2009) Mapa das áreas mineradas em subsolo região carbonífera de Santa Catarina. Geoprocessing DNPM/SC, scale 1:3, vector files and pdf

Dias, A. (1995) Geologia do Município de Criciúma. Programa de Informações Básicas de Santa Catarina – PROJESC. Porto Alegre: Serviço Geológico do Brasil - CPRM. Séries Cartas Temáticas v. 23

Fetter, CW (2008). Contaminant Hydrogeology. Second ed. New York, Waveland Press, pp 500

Grupo Técnico de Assessoramento – GTA (2018) Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais (Internal technical reports referent the years 2006 – 2018). Volume 1. Ação Civil Pública nº 93.8000.533-4. Processo de cumprimento de sentença nº 2000.72.04.002543-9. Criciúma, Brasil

HACHIRO J (1997). O Subgrupo Irati (Neopermiano) da Bacia do Paraná. Doctoral thesis. USP, São Paulo, Brazil, pp 248

Holz M, França AB, Souza PA, Iannuzzi R, Rohn R (2010) A stratigraphic chart of the Late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of the Paraná Basin, Brazil, South America. Journal of South American Earth Sciences 29:381-399.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2009.04.004>

Kern ML, Viero AP, Machado G (2008). The fluoride in the groundwater of Guarani Aquifer System: the origin associated with black shales of Paraná Basin. *Environmental Geology*, 55:1219-1233

Krebs ASJ, Alexandre NZ (2000) Recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Araranguá – SC: Disponibilidade e conflitos. 1st Joint World Congress on Groundwater

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

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

Kresic N (2007) *Hydrogeology and Groundwater modeling*. USA, Taylor & Francis Group, CRC Press

Margat J, Van der Gun J (2013) *Groundwater around the world: A Geographic Synopsis*. CRC Press

Mcmahon PB, Bohlke JK (2006) Regional Patterns in the Isotopic Composition of Natural and Anthropogenic Nitrate in Groundwater, High Plains, U.S.A. *Environmental Science and Technology* 40: 2965-2970

Milani EJ, França AB, Schneider RL (1994) Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências Petrobrás* 8:1:69-82

Milani EJ, Melo JHG, Souza PA, Fernandes LA, França AB (2007) Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências Petrobrás* 15:2:265-287

Philipp W, Kalkreuth W, Busch A, Krooss BM (2010) High-pressure methane and carbon dioxide sorption on coal and shale samples from the Paraná basin, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, 84:190-205

Poehls DJ, Smith GJ (2009) *Encyclopedic dictionary of Hydrogeology*. Academic Press, Elsevier. ISBN: 978-0-12-558690-0

Roisenberg C, Viero AP, Schwarzbach MSR, Roisenberg A, Morante IC (2003) Caracterização geoquímica e gênese dos principais íons das águas subterrâneas de Porto Alegre, RS. *Revista Brasileira de Recursos hídricos* 8:137-147

Schneider RL, Mühlmann H, Tommasi E, Medeiros RA, Daemon RF, Nogueira AA (1974) Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 18, Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geologia 1:41-66

Secretaria de Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina/Departamento de Recursos Hídricos - SDS/DRHI (2013/2015) *Bacias da Região Carbonífera modified OTTOBACIA*. Geoprocessing SDS/DRHI, shapefile, scale 1:5.000

Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2014) *hidrogeobrasil_lito.zip*. [S.l.]. Vector files and raster, 80,9Mb. *In:* http://189.9.170.22:8080/cprm/geobank.documents.download?id_sessao=20151211094807&usuario=1&file=hidrogeobrasil_lito.zip. Accessed April 5, 2018

Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2018) *Internal Technical report of the covenant with MMA referent the years 2008 – 2018 (covenant term nº 003/2014-SMCQ/MMA (2014-2019); covenant term 2012-2014; covenant term 2010-2011; covenant term 2009-2010 and covenant term 2008-2009)*. Porto Alegre, Brasil

Sposito G (2016) *The chemistry of soils*. Oxford University Press, New York

Teixeira GV, Viero AP (2017) Hydrogeochemical evolution of Mesozoic aquifers in the Southern Paraná Basin in western Rio Grande do Sul State, Brazil. *Águas Subterrâneas* 31: 36-51

White IC (1908) *Relatório Final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil*. Rio de Janeiro, DNPM, pp 301-617

Wildner W, Camozzato E, Toniolo JA, Binotto RB, Iglesias CMF, Laux JH (2014)
Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina. Porto Alegre. Escala 1:500.000. Programa
Geologia do Brasil. Subprograma de Cartografia Geológica Regional

Wolery TJ (1992) EQ3NR, A computer Program for Geochemical Aqueous
Speciation-Solubility Calculations. Lawrence Livermore National Laboratory

Acknowledgments

The authors are grateful to the Geological Service of Brazil (Companhia de Pesquisa e
Recursos Minerais) and the ‘Grupo Técnico de Assessoramento à ação civil pública nº
93.8000533-4’ for the monitoring data and Programa de Pós-Graduação em Geociências,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul for overall support.

5. Resultados e Discussões complementares

5.1 Descrição das lâminas petrográficas dos testemunhos de sondagem

No artigo desta dissertação, apresentou-se a descrição petrográfica da lâmina referente à amostra de calha do poço de monitoramento PMAPAR11 que demonstrou baixa porosidade. Com o intuito de verificar a extensão das características texturais da camada depositada acima da camada de carvão Barro Branco na Formação Rio Bonito (principalmente, o comportamento da porosidade em outros pontos dessa formação na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá), foram confeccionadas lâminas petrográficas de testemunhos de sondagem armazenados na Litoteca de Caçapava do Sul, situados na BHRA (Figuras 5 e 6).



Figura 5. Fotografias dos testemunhos de sondagem realizados na BHRA em 1978 e armazenados na CPRM (litoteca de Caçapava do Sul). **a** Detalhe de parte do testemunho de sondagem SCARASC09 com fraturas preenchidas de gipsita; **b** Testemunho de sondagem SCARA10; **c** Testemunho de sondagem SCARA14.

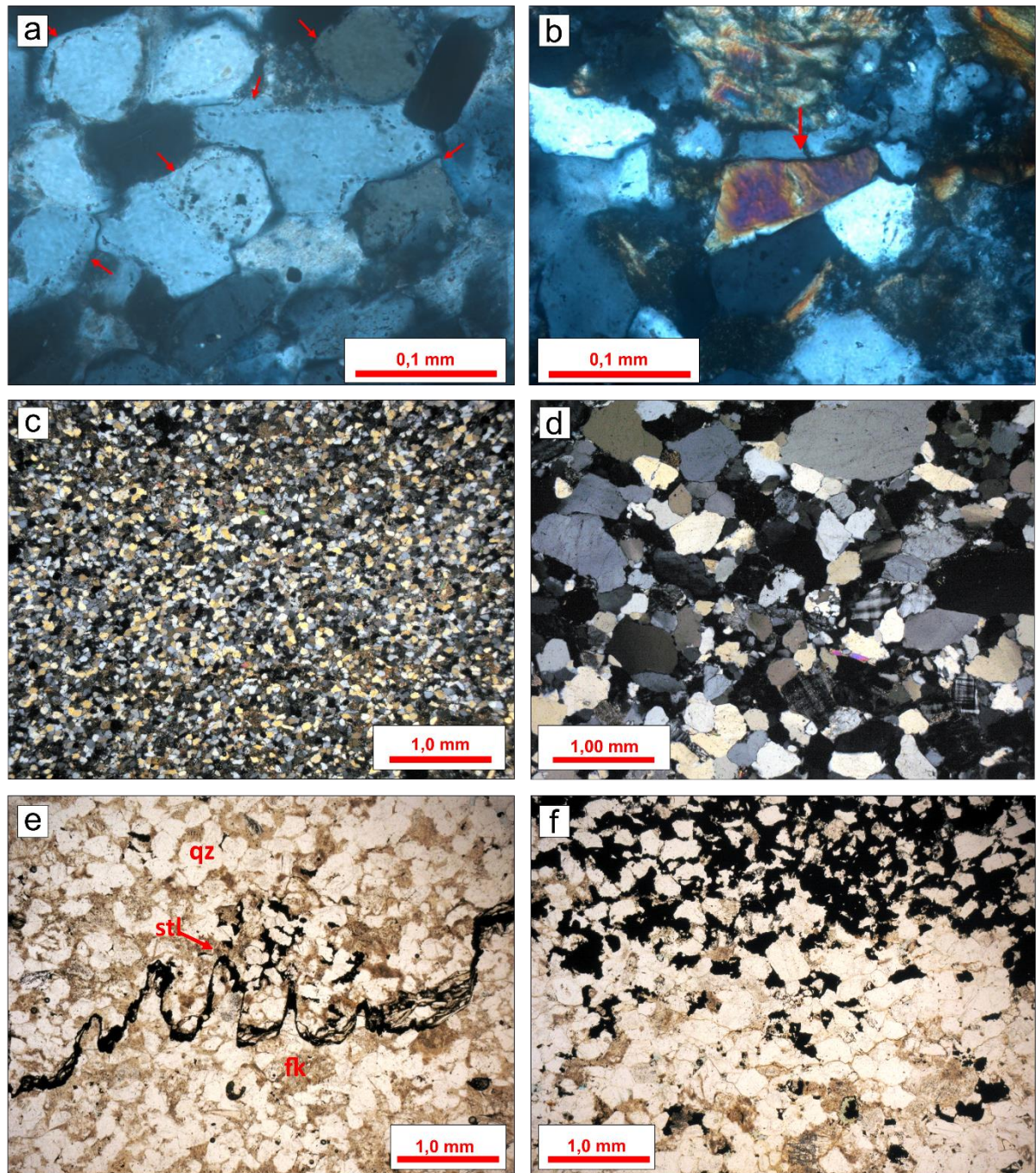


Figura 6. Fotomicrografias das lâminas petrográficas dos testemunhos de sondagem. **a** Lâmina ARASC9.1 apresenta intercrescimento de quartzo, situada antes da camada de carvão (luz polarizada, objetiva de 50x); **b** Lâmina ARASC9.2 destaca a presença de turmalina dendrítica, situada após a camada de carvão (luz polarizada, objetiva de 50x); **c** Lâmina ARASC10.3 apresenta porosidade nula e granulometria dos minerais fina, situada antes da camada de carvão (luz polarizada, objetiva de 25x); **d** Lâmina ARASC10.4 também apresenta porosidade nula, mas granulometria grossa, situada após a camada de carvão (luz polarizada, objetiva de 25x); **e** Lâmina ARASC14_5.1 mostra estilólitos e porosidade nula, camada associada ao carvão ausente no perfil (luz natural, objetiva de 25x); **f** Lâmina ARASC14_5.2 mostra a presença de opacos em aprox. 50% da lâmina (minerais pretos), camada associada ao carvão ausente no perfil (luz natural, objetiva de 25x).

Os perfis litológicos dessas sondagens, realizadas pelo SGB/CPRM em 1978, constam na Biblioteca Virtual no site do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (SGB, 1978). A partir dos perfis, definiu-se a amostragem de rocha da Formação Rio Bonito

depositada antes e após a camada de carvão barro branco, nas sondagens ARASC09 e ARASC10. Na sondagem ARASC14, foram feitas amostras dois intervalos de rocha associados à camada de carvão barro branco ausente no perfil.

A lâmina petrográfica ARASC9.1 (depositado antes da camada de carvão barro branco) apresentou preenchimento por dissolução de sílica com intercrescimento de quartzo e em pouca quantidade de preenchimento por argila (Figura 6a). A composição mineral é predominantemente de quartzo e subordinadamente contém plagioclásio, ripas de micas, pelóides de argilas e opacos. A granulometria é fina com grãos subangulosos com contatos côncavo/convexo e longitudinal.

A lâmina ARASC9.2 (depositado após a camada de carvão barro branco) possui descrição textural (pouca porosidade) e mineralógica (predominância de quartzo) semelhante à lâmina do mesmo testemunho, entretanto contactou-se presença de micas levemente estiradas e turmalina dendrítica (Figura 6b). As características dessas lâminas demonstram pouca relevância do processo de compactação e alta contribuição de cimentação silicosa para fechamento dos poros da rocha.

Na ARASC10.3 o mineral predominante é quartzo associado a feldspato alcalino, plagioclásio, micas e argilominerais. A porosidade é praticamente nula (Figura 6c), sendo a porosidade primária preenchida por overgrow (sílica) e argila (esmectita). A compactação é um pouco mais pronunciada nessa lâmina comparada às outras lâminas estudadas, porque apresenta ocasionalmente grãos com contato serrilhado além de contato reto e longitudinal.

A ARASC10.4 apresenta características similares a ARASC10.3, entretanto contudo, a granulometria é grossa e se observa a presença de litoclastos e de quartzo metamórfico. A porosidade também é praticamente nula, predominantemente preenchida por sílica (quartzo), mas subordinadamente por argilas (caolinita e esmectita) e cimentação carbonática (Figura 6d).

As lâminas ARASC14_5.1 e ARASC14_5.2 apresentam características iguais, entretanto, a lâmina de final 5.2 demonstra 50% da lâmina composta predominantemente por minerais opacos, descritos como pirita secundária, característica dos testemunhos associados a camadas de carvão (Figura 6f). Essas lâminas diferem das anteriores por apresentarem maior quantidade de cimentação carbonática e subordinadamente cimentação silicosa e argilosa. É importante demonstrar a presença de veios preenchidos por opacos, carbonatos e argilas nas

lâminas, alguns formando estilólito (contato irregular característicos de rochas carbonáticas), conforme figura 6e.

As características texturais e minerais dessas lâminas corroboram a conclusão de que a Formação Rio Bonito, principalmente nos intervalos imediatamente anterior (base) e posterior (topo) à camada barro branco, é um aquífero predominantemente fraturado. Essa consideração ocorre devido ao elevado grau de acondicionamento com diagênese avançada marcada por dissolução e precipitação mineral, principalmente silicosa, nas lâminas referentes aos testemunhos ARASC9 e ARASC10 e carbonática no ARASC14.

5.2 Poços de monitoramento nos Leques Aluviais

Os poços de monitoramento no aquífero dos leques aluviais situados na BHRA, são PMLAAR01, PMLAAR02, PMLAAR03 e PMLAAR04. É relevante ressaltar que, devido ao difícil acesso e a problemas técnicos com a coleta no poço PMLAAR02, desde a 10ª campanha iniciou-se a coleta do poço PMLAAR02B, pertencente à extinta Carbonífera Criciúma. O PMLAAR02B apresenta poucos dados químicos (8 campanhas de coleta) e informações construtivas do poço.

PMLAAR01 situa-se no município de Criciúma, o PMLAAR02 e PMLAAR04 em Forquilha, e PMLAAR03 em Nova Veneza, estando apenas PMLAAR03 a montante das áreas mineiradas na região carbonífera de Santa Catarina, conforme a figura 7. Inclusive PMLAAR02 e PMLAAR02B situam-se na área da Mina Verdinho (em processo de fechamento após o abandono pela Carbonífera Criciúma em 2016) próximo ao depósito de rejeito.

Os valores médios, mínimos, máximos, desvio padrão e número de campanhas de coleta dos parâmetros analisados em campo (pH, CE e Eh) e no laboratório CECOPOMIN encontram-se na tabela 5. Dentre os parâmetros de campo a média do pH dos poços situa-se no intervalo de 4,5 a 6,5, valores considerados levemente ácidos a neutro (valores próximos de 7). Os poços PMLAAR01, PMLAAR02, PMLAAR02B, PMLAAR03 mostram médias de condutividade elétrica menores que 300 $\mu\text{s}/\text{cm}$, e PMLAAR04 valores muito mais elevados. O Eh começou a ser analisado a partir da 17ª campanha de coleta, apresentando apenas 2 campanhas de coleta para cada poço. Até o momento, os poços PMLAAR01, PMLAAR02B e PMLAAR04 apresentaram valores positivos e PMLAAR02 e PMLAAR03 (valor mínimo) valores negativos de Eh.

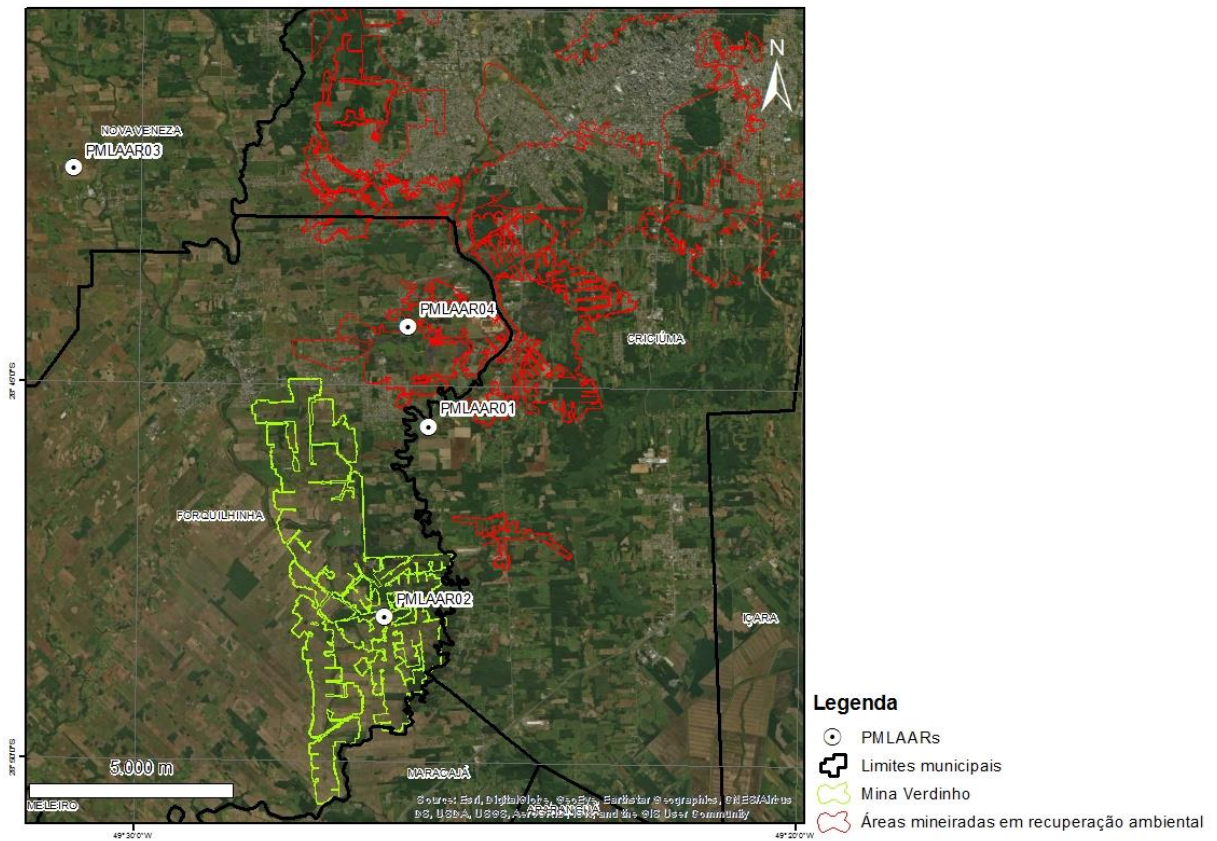


Figura 7. Localização dos poços que monitoram o aquífero formado pelos leques aluviais e as áreas com minas de carvão (modificado DNPM e SIESESC, 2009).

Tabela 5 Média, mínimo (min), máximo (max), desvio padrão (dp) e número total de campanhas de campo (c) dos dados coletados nos poços do aquífero de leques aluviais na Região Carbonífera de Santa Catarina.

	PMLAAR01					PMLAAR02					PMLAAR02B				
	média	min	max	dp	c	média	min	max	dp	c	média	min	max	dp	c
pH	4,74	3,90	5,83	0,46	15	6,01	4,49	7,01	0,67	17	6,34	4,96	7,68	0,91	9
CE	91,91	71,00	183,50	28,57	15	232,38	76,00	399,00	79,84	17	280,50	197,00	400,00	57,79	9
Eh	263,30	250,70	275,90	17,82	2	100,90	-20,3	222,10	171,40	2	246,25	222,10	270,40	34,15	2
Alcal.	2,12	0	5,59	1,54	11	39,94	0	97,50	28,91	13	129,49	100,68	192,71	29,58	8
Cl ⁻	6,61	2,18	10,67	2,93	6	7,72	4,90	8,99	1,40	8	9,97	9,61	10,34	0,51	2
SO ₄ ²⁻	11,87	5,76	21,81	5,16	16	61,41	21,40	104,77	22,58	17	29,55	18,52	46,51	9,29	9
Ca	3,10	1,37	4,13	0,88	11	16,90	7,86	24,70	5,28	15	24,01	14,60	38,60	7,19	9
Na	5,94	4,23	7,67	1,19	9	11,27	5,25	19,40	4,30	13	20,10	11,00	39,20	9,80	7
Mg	1,97	0,88	2,84	0,56	11	9,23	4,76	13,20	2,81	15	10,80	3,10	15,30	3,54	9
Fe	0,71	0,16	1,90	0,59	16	3,81	0,42	12,35	3,55	17	4,33	0,80	7,65	2,49	9
Mn	0,19	0	1,88	0,46	16	0,45	0,04	1,99	0,60	17	0,39	0,08	0,55	0,15	9
Al	0,52	0,16	1,82	0,44	16	0,28	0,02	1,34	0,39	17	0,40	0,18	0,62	0,31	9
K	3,48	1,85	14,00	3,53	11	1,55	0,61	6,69	1,60	15	2,32	1,11	6,11	1,65	9
Cu (LQ=0,002)	0,03	0,03	0,04	0,01	7	0,09	0,09	0,09	-	8	<LQ	<LQ	<LQ	-	8
Cd (LQ=0,002)	<LQ	<LQ	<LQ	-	7	<LQ	<LQ	<LQ	-	8	<LQ	<LQ	<LQ	-	8
Pb (LQ=0,005)	<LQ	<LQ	<LQ	-	7	<LQ	<LQ	<LQ	-	8	<LQ	<LQ	<LQ	-	8
Zn (LQ=0,005)	0,05	0,02	0,18	0,06	7	0,02	0,01	0,04	0,01	8	0,28	0,02	0,75	0,25	8
As (LQ=0,002)	<LQ	<LQ	<LQ	-	7	<LQ	<LQ	<LQ	-	8	<LQ	<LQ	<LQ	-	8
Hg (LQ=0,0003)	<LQ	<LQ	<LQ	-	7	<LQ	<LQ	<LQ	-	8	0,0008	0,0008	0,0008	-	8

CE. = condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$); Eh = potencial de oxi-redução (mV); Alcal. = alcalinidade (CaCO_3 mg/l); íons em mg/l; (-) não determinado.

Tabela 5 (cont.) Média, mínimo (min), máximo (max), desvio padrão (dp) e número total de campanhas de campo (c) dos dados coletados nos poços do aquífero de leques aluviais na Região Carbonífera de Santa Catarina.

	PMLAAR03					PMLAAR04				
	média	min	max	dp	c	média	min	max	dp	c
pH	6,63	6,05	7,25	0,40	18	5,94	4,96	6,81	0,49	16
CE	222,10	178,00	373,00	48,75	18	1661,96	2,02	2202,50	687,05	16
Eh	-26,90	-28,00	-25,80	1,56	2	33,03	14,50	51,55	26,19	2
Alcal.	115,60	99,45	143,38	15,17	11	29,67	0	240,20	71,73	11
Cl ⁻	6,61	4,46	9,10	1,67	5	12,95	9,27	14,51	2,16	5
SO ₄ ⁻²	7,51	0	15,23	5,22	18	1133,64	12,80	1518,78	444,15	16
Ca	20,63	9,50	31,30	5,07	12	247,25	125,00	284,00	50,12	12
Na	10,24	7,97	12,20	1,26	10	58,83	44,50	72,60	8,26	10
Mg	9,23	5,99	10,60	1,30	12	115,98	85,80	132,00	13,53	12
Fe	5,32	3,87	7,78	1,29	18	61,24	3,32	81,00	18,03	16
Mn	0,30	0,10	0,96	0,19	18	4,49	1,87	5,30	0,88	16
Al	0,49	0	0,60	0,24	18	0,24	0	0,58	0,24	16
K	1,51	0,87	6,50	1,58	12	14,59	6,99	69,50	17,33	12
Cu (LQ=0,002)	<LQ	<LQ	<LQ	-	8	0,36	0,36	0,36	-	8
Cd (LQ=0,002)	<LQ	<LQ	<LQ	-	8	<LQ	<LQ	<LQ	-	8
Pb (LQ=0,005)	<LQ	<LQ	<LQ	-	8	<LQ	<LQ	<LQ	-	8
Zn (LQ=0,005)	0,02	0,01	0,03	0,01	8	0,03	0,02	0,06	0,01	8
As (LQ=0,002)	<LQ	<LQ	<LQ	-	8	<LQ	<LQ	<LQ	-	8
Hg (LQ=0,0003)	<LQ	<LQ	<LQ	-	8	<LQ	<LQ	<LQ	-	8

CE. = condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$); Eh = potencial de oxi-redução (mV); Alcal. = alcalinidade (CaCO_3 mg/l); íons em mg/l; (-) não determinado.

No geral, o poço de monitoramento que apresentou os maiores teores de boa parte dos parâmetros, tais como, condutividade elétrica, alcalinidade, cloreto, sulfato, cálcio, sódio, magnésio, ferro, manganês, potássio e cobre, foi PMLAAR04 (Figura 8). PMLAAR01 apresentou valores baixos para quase todos os parâmetros laboratoriais, menos para Eh, Al e K. Os poços PMLAAR02, PMLAAR02B e PMLAAR03 têm concentrações maiores de Fe total (médias > 3), Ca e Na em comparação ao PMLAAR01.

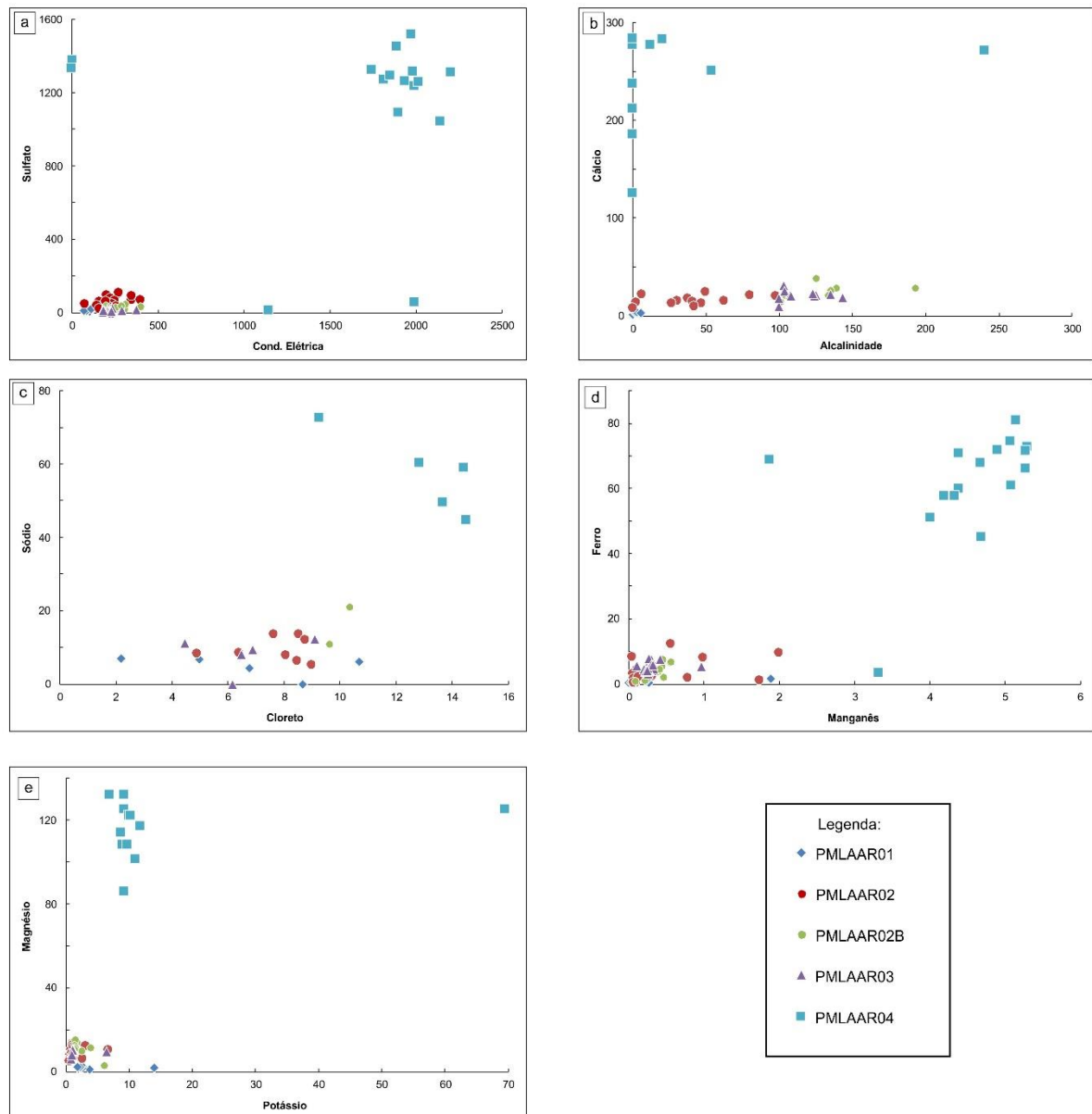


Figura 8. Diagramas de variação binária dos metais, condutividade elétrica, alcalinidade e sulfato referente aos poços PMLAARs. **a** Diagrama de Sulfato por Condutividade Elétrica; **b** Diagrama de Cálcio por Alcalinidade; **c** Diagrama de Sódio por Cloreto; **d** Diagrama do ferro por Manganês; **e** Diagrama de Magnésio por Potássio.

Ressalta-se que os teores de ferro total maiores que 3 são comuns na região da bacia carbonífera, mesmo em áreas com ausência de mineração de carvão,

principalmente, nos leques aluviais, porque são compostos em especial de seixos de basalto da Bacia do Paraná (basalto contém teores de ferro em quantidade elevadas e facilidade para sofrer processos de alteração química e física).

A análise dos parâmetros demonstrou que, nos poços PMLAAR01 e PMLAAR03, não há incidência de contaminação por minas de carvão, pois os teores são reduzidos, principalmente, dos parâmetros Fe, SO_4^{2-} , Mn e CE, característicos desse tipo de contaminação. Os poços PMLAAR02 e PMLAAR02B mostram concentrações um pouco mais elevadas desses parâmetros, principalmente, de sulfato e condutividade elétrica, apresentando indícios de contaminação. O poço PMLAAR04, por sua vez, encontra-se com valores extremos de praticamente todos os parâmetros devido à contaminação por minas de carvão. É importante ressaltar que esse poço situa-se no município de Forquilha, dentro das áreas mineiradas em recuperação ambiental (Figura 7).

A tabela 6 contém os valores máximos permitidos na resolução do CONAMA (BRASIL, 2008) para monitoramento ambiental das águas subterrâneas no consumo humano e na irrigação. Comparando os teores dos parâmetros para consumo humano da CONAMA com as médias dos parâmetros por poço, que constam na tabela 5, observou-se que os parâmetros Cl^- , Fe, Mn estão acima dos valores permitidos, e apenas o parâmetro sódio encontra-se abaixo dos valores permitidos na CONAMA (BRASIL, 2008) para todos os poços. Já o sulfato apresenta teores abaixo do valor permitido apenas no PMLAAR01, pois os poços PMLAAR02, PMLAAR02B e PMLAAR03 apresentam alguns teores um pouco acima de 250 mg/L e o PMLAAR04 as concentrações mais elevadas desse parâmetro.

Tabela 6 Lista de Valores Máximos Permitidos (VMP) e limites de quantificação (LQ) da Resolução CONAMA 396-08 para os parâmetros de água subterrânea coletados no monitoramento da região Carbonífera de Santa Catarina (modificado de BRASIL, 2008).

Parâmetros	Consumo Humano	Irrigação	Limite de quantificação – LQ
Cl^-	0,2	100 – 700	2
SO_4^{2-}	250	-	5
Na	200	-	1
Fe	0,3	5	0,1
Mn	0,1	0,2	0,025
Al	0,2	5	0,05
Cu	2	0,2	0,05
Cd	0,005	0,01	0,005
Pb	0,01	5	0,01
Zn	5	-	-
As	0,01	-	0,005
Hg	0,001	0,002	0,001

Íons em mg/L.

6. Considerações Finais

A região carbonífera de Santa Catarina apresenta um grande passivo ambiental. Com o intuito de melhorar a qualidade do monitoramento ambiental realizado na área da BHRA, durante este estudo, foram avaliados quatro poços de monitoramento do aquífero livre (leques aluviais) e nove do aquífero Rio Bonito, na camada de capa e lapa do carvão Barro Branco.

Com isso, constatou-se contaminação por carvão tanto nos leques aluviais quanto no aquífero Rio Bonito. A partir das metodologias aplicadas nos dados hidroquímicos, observou-se a presença principalmente de sulfato e de condutividade elétrica elevadas nos poços PMLAAR02 e PMLAAR04, nos leques aluviais, e no PMAPAR05 (aquífero Rio Bonito). A localização desses poços próxima a áreas mineiradas ou com passivos ambientais, ou ainda, com estruturas regionais situadas nas áreas mineiradas e próximas aos poços, foram fatores importantes para explicar a quantidade de concentrações de parâmetros característicos de contaminação por carvão.

Tanto os poços dos leques aluviais quanto os poços que captam água no Rio Bonito demonstraram variação composicional das águas. No caso dos poços no Rio Bonito, foi possível identificar quatro grupos de água subterrânea: Grupo 1 (PMAPAR05); Grupo 2 (PMAPAR11); Grupo 3 (PMAPAR01, PMAPAR04, PMAPAR10); e Grupo 4 (PMAPAR02, PMAPAR03, PMAPAR06 e PMAPAR07). No caso dos poços dos leques aluviais, cada um apresentou diferenças composicionais entre si, entretanto, apenas o PMLAAR01 mostrou baixas concentrações de praticamente todos os parâmetros, provavelmente, devido à sua localização a montante das áreas mineiradas.

A avaliação dos parâmetros para todos os poços de monitoramento da BHRA, com os valores permitidos da resolução CONAMA (Brasil, 2008), demonstrou que tanto o aquífero de leques aluviais quanto o Rio Bonito apresentam restrições de uso das águas para consumo humano, na área de estudo.

Outra conclusão obtida com o estudo das lâminas petrográficas do arenito Rio Bonito (amostras de calha PMAPAR11 e testemunhos de sondagem) é a constatação da baixa porosidade e permeabilidade intergranular desses arenitos, situados acima e abaixo da camada de carvão, na área estudada. Diversos estudos apontam características regionais da Formação Rio Bonito marcadas por grande variação textural, de transmissividade e armazenamento de água subterrânea, constituindo-se

em aquíferos importantes em alguns níveis formados por arenitos médios a grossos (Krebs, 2004; Dias, 1995; Machado et al., 1984; Machado, 2013). Essas propriedades, típicas de meios com porosidade e permeabilidade intergranular, não são observadas nos arenitos de base e topo da camada de carvão, os quais se comportam como aquíferos fraturados.

Os dados obtidos mostram que as características químicas das águas subterrâneas variam aleatoriamente ao longo do tempo, durante o período monitorado. Os poços PMAPAR05, PMLAAR02 (PMLAAR02B) e PMLAAR04, contaminados pela mineração de carvão, não demonstram tendência de melhora da qualidade da água.

Com relação às águas subterrâneas, as metodologias propostas demonstraram a importância do monitoramento ambiental. Todavia, confirmou-se, neste estudo, que, para uma avaliação confiável de uma área com passivos ambientais, principalmente quanto à diminuição da contaminação das águas ao longo do tempo, é necessária uma quantidade bem dimensionada de poços de monitoramento e de campanhas de coleta. Também faz-se necessária uma definição prévia da metodologia de coleta e de análise dos parâmetros hidroquímicos, ao longo do tempo, de forma sistemática, utilizando como base, para a avaliação, a resolução CONAMA 396/2008 e as especificidades hidrogeológicas e hidroquímicas de cada local, em particular, a porosidade e a permeabilidade.

No caso deste estudo, a análise petrográfica, em lâminas delgadas dos arenitos de base e de topo da camada de carvão Barro Branco, constituiu-se em ferramenta de extrema importância para o entendimento do arcabouço hidrogeológico e dos mecanismos de circulação e de contaminação das águas subterrâneas. Outra medida prévia no monitoramento de contaminantes é o estudo das características físicas e químicas dos aquíferos, principalmente, no que tange à porosidade e à permeabilidade. Nesta pesquisa, portanto, a análise de lâminas petrográficas foi extremamente importante.

REFERÊNCIAS

ABOARRAGE, A.; LOPES, R. **Projeto a Borda Leste da Bacia do Paraná: Integração geológica e avaliação econômica**. CPRM/DNPM, 1986. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/11193>. Acesso em: 17 out. 2018.

ALEXANDRE, N. **Diagnóstico Ambiental da Região Carbonífera de Santa Catarina: degradação dos recursos naturais**. Tecnologia e Meio Ambiente, Criciúma, v. 5, n. 2, p. 35-50, 1999.

ALEXANDRE, N. **Análise integrada da qualidade das águas da bacia do Rio Araranguá (SC)**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Curso de Mestrado em Geografia, Departamento de Geociências, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

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

ARAUJO, L.; FRANÇA, A.; POTTER, P. **Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA**. Hydrogeology Journal 7:317-336, 1999.

ARENA, K. R., HARTMANN, L. A., BAGGIO, S. B. **Geological controls of copper, gold and silver in the Serra Geral Group, Realeza region, Paraná, Brazil**. Ore Geol. Rev. 63, 178-200, 2010. Doi: 10.1016/j.oregeovev.2014.05.005.

AZEVEDO, A. A.; FILHO, J. L. A. **Ensaio de Permeabilidade em Solo: Orientação para a sua Execução no Campo**. ABGE, p. 35-45, 2013.

BANKS, David et al. **Mine-water chemistry: the good, the bad and the ugly**. Environmental Geology, 32 (3), 1997.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 396, de 03 de abril de 2008**. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>. Acesso em 29 de novembro de 2018.

BULL, W. B. **Alluvial fans**. Journal of Geological Education. Chapel Hill, N. C., v. 16. Bulletin of Volcanology, Berlim, v. 55, p.119 – 139, 1968.

CAMPOS H.C.N.S. **Modelación Conceptual y Matemática del Acuífero Guarani, Cono Sur**. Acta Geológica Leopoldinense, Série Mapas 4:3-50, 2000.

CARUSO Jr, F. **Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Sudeste de Santa Catarina**. Brasília: DNPM, 1995. Escala 1:100.000

CASTILHOS, Z. *et al.* **Avaliação dos impactos ambientais associados à drenagem de minas em três bacias hidrográficas da região carbonífera Sul Catarinense**. Simpósio “Experiências em gestão dos Recursos Hídricos por Bacia Hidrográfica.” Rio de Janeiro, CETEM, 2007.

DANTAS, M. *et al.* **Geomorfologia aplicada à gestão integrada de bacias de drenagem: bacia do rio Araranguá (SC), zona carbonífera sul-catarinense.**

Relatório interno, 2005. In:

<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/637> Acessado em 01/10/2018.

DIAS, A. **Geologia do Município de Criciúma.** Programa de Informações Básicas de Santa Catarina – PROJESC. Porto Alegre: CPRM (Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais), 1995. Séries Cartas Temáticas, v. 23.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM, SINDICATO DA INDÚSTRIA DE EXTRAÇÃO DE CARVÃO DO ESTADO DE SANTA CATARINA – SIECESC. **Mapa das áreas mineradas em subsolo região carbonífera de Santa Catarina.** Geoprocessing DNPM/SC, scale 1:3, vector files and pdf, 2009.

FOSTER, S.; VENTURA, M.; HIRATA, R. **Poluição das Águas Subterrâneas:** Um documento executivo da situação da América Latina e Caribe com relação ao abastecimento de água potável. São Paulo: Instituto Geológico, 1993. 55 p.

FRANÇA, A.B., POTTER, P.E. **Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1).**

Boletim de Geociências da Petrobrás. v.2, n.2/4, p. 147-191, 1988.

HAMPTON, M. A. **The role of subaqueous debris flow in generating turbidity currents.** Journal of Sedimentary Petrology, 42, 775 – 793, 1970.

HOOKE, R. Le B. **Processes on arid-region aluvial fans.** Journal of Geology, Chicago, 75 (4): 60 – 438, 1967.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Mapa de vegetação do Brasil.** 2004, 1:5000000.

KALKREUTH, W. *et al.* **Depositional setting, petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 2 South Santa Catarina Coalfield, Brazil.** International Journal of Coal Geology, 84, p. 213-236, 2010.

KOPPE, J.; COSTA, J. F. **A lavra de carvão e o meio ambiente em Santa Catarina.** In: SOARES, Paulo Sérgio; SANTOS, Maria Dionísia C.; POSSA, Mario Valente. (Eds) Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 25-35.

KREBS, A. S. J.; NOSSE, E. O. **Potencial Hidrogeológico do Município de Criciúma, SC.** Programa de Informações Básicas para a Gestão Territorial de Santa Catarina - PROJESC. Porto Alegre, CPRM, 1998. Disponível em:

<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/9068>. Acesso em: 16 out 2018.

KREBS, A. S. J. **Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do Rio Araranguá, SC.** Tese (Doutorado em Geografia: Utilização e Conservação de Recursos Naturais) Florianópolis, UFSC, 2004.

KREBS, A. S. J.; POSSA, M. **O papel da hidrogeologia como instrumento de gestão ambiental na mineração de carvão.** In: SOARES, Paulo Sérgio; SANTOS,

Maria Dionísia C.; POSSA, Mario Valente. (Eds) *Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, P. 109 – 127, 2008.

LOWSON, R. **Aqueous oxidation of pyrite by molecular oxygen**. *Chemical Reviews*, vol. 82, nº 5, 1982.

MACHADO, J. L. F.; PERUFFO, N.; LIMA, J. **Projeto estudo da vulnerabilidade a contaminação dos mananciais subterrâneos decorrente da extração do carvão mineral**: relatório final da 1. Fase. Porto Alegre: CPRM, 1984. v.1 Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/7606>>. Acesso em: 15 out. 2018.

MACHADO, J. L. F. **Mapa hidrogeológico do estado de Santa Catarina: relatório**. Porto Alegre: CPRM, 2013. Escala 1:500.000. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/11594>. Acesso em 15 out. 2018.

MANOEL FILHO, J. **Ocorrência das águas subterrâneas**. In: FEITOSA, Fernando A. C. et al. (Org.) *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Rio de Janeiro: CPRM, 2008, 3ª ed. p. 53-75.

MEDEIROS, R. A. **Fácies sedimentares**: análise e critérios para o reconhecimento de ambientes deposicionais. SCHALLER, H. FRIEDMAN, G. M. (colab.) CAMPOS, C. V. M. (trad.) Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1971. 124p.

_____. **Sistemas de leques terrígenos**. Salvador: PETROBRÁS, Divisão de Ensino da Bahia, 1979, 63 p.

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

MILANI, E. J.; FRANÇA, A. B.; SCHNEIDER, R. L. **Bacia do Paraná**. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 1994, 8:1:69-82.

MILANI, E. J. *et al.* **Bacia do Paraná**. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 2007, 15:2:265-287.

NICHOLS, G. **Sedimentology and Stratigraphy**. Second edition. Wiley-Blackwell, London, 419p., 2009.

PINTO, V. M., HARTMANN, L. A. **Flow-by-flow chemical stratigraphy and evolution of thirteen Serra Geral Group basalt flows from Vista Alegre, southern most Brazil**. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2011, V. 83, 425-440. Doi: 10.1590/S0001-37652011000200006.

ROSSETTI, L. *et al.* **Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil**: Towards a formal stratigraphical framework. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2017. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2017.05.008.

SCHNEIDER, R. L. *et al.* **Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná**. In: XXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre, SBG, v.1, p. 41-66, 1974.

SDS/DRHI - Secretaria de Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina/Departamento de Recursos Hídricos. **Bacias da Região Carbonífera**. Modificado OTTOBACIA. Geoprocessamento SDS/DRHI, shapefile, scale 1:5.000, 2013/2015.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. **Perfis de Sondagem ARA**. Projeto Araranguá: Subprojeto Arroio do Silva. In: SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. Biblioteca Virtual. Porto Alegre: CPRM, 1978. Disponível em:http://acervo.cprm.gov.br/rpi_cprm/docreaderNET/docreader.aspx?bib=PerfisSondagem&pasta=ARA%20-%20Projeto%20Ararangua%20Subprojeto%20Arroio%20do%20Silva%20-%201%20a%2046&pesq=. Acesso em 5 mar. 2018.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. hidrogeobrasil_lito.zip. [S.l.]. Arquivos vetoriais e raster, 80,9 Mb, 2014.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. Relatório técnico interno do Convênio com o **Ministério do Meio Ambiente**, referente aos anos 2008 – 2018 (Termo de convênio nº 003/2014-SMCQ/MMA (2014-2019); Termo do convênio 2012-2014; Termo do convênio 2010-2011; Termo do convênio 2009-2010 e Termo do convênio 2008-2009). Porto Alegre, 2018.

VILLWOCK, J. A. et al. Geology of the Rio Grande **do Sul Province**. In: Rabassa J. (ed.), International symposium on sea level changes and quaternary shorelines, São Paulo. Quaternary of *South America* and Antarctic Peninsula. Balkema: Rotterdam, 1986, v. 4, p. 79-97.

WILDNER, W. *et al.* **Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina**. Porto Alegre. 2014. Escala 1:500.000. Programa Geologia do Brasil. Subprograma de Cartografia Geológica Regional.

ANEXOS

ANEXO 1 – Perfis construtivos originais (Relatórios Técnicos de Execução dos Poços, Banco de Dados interno CPRM).

PMARPAR02

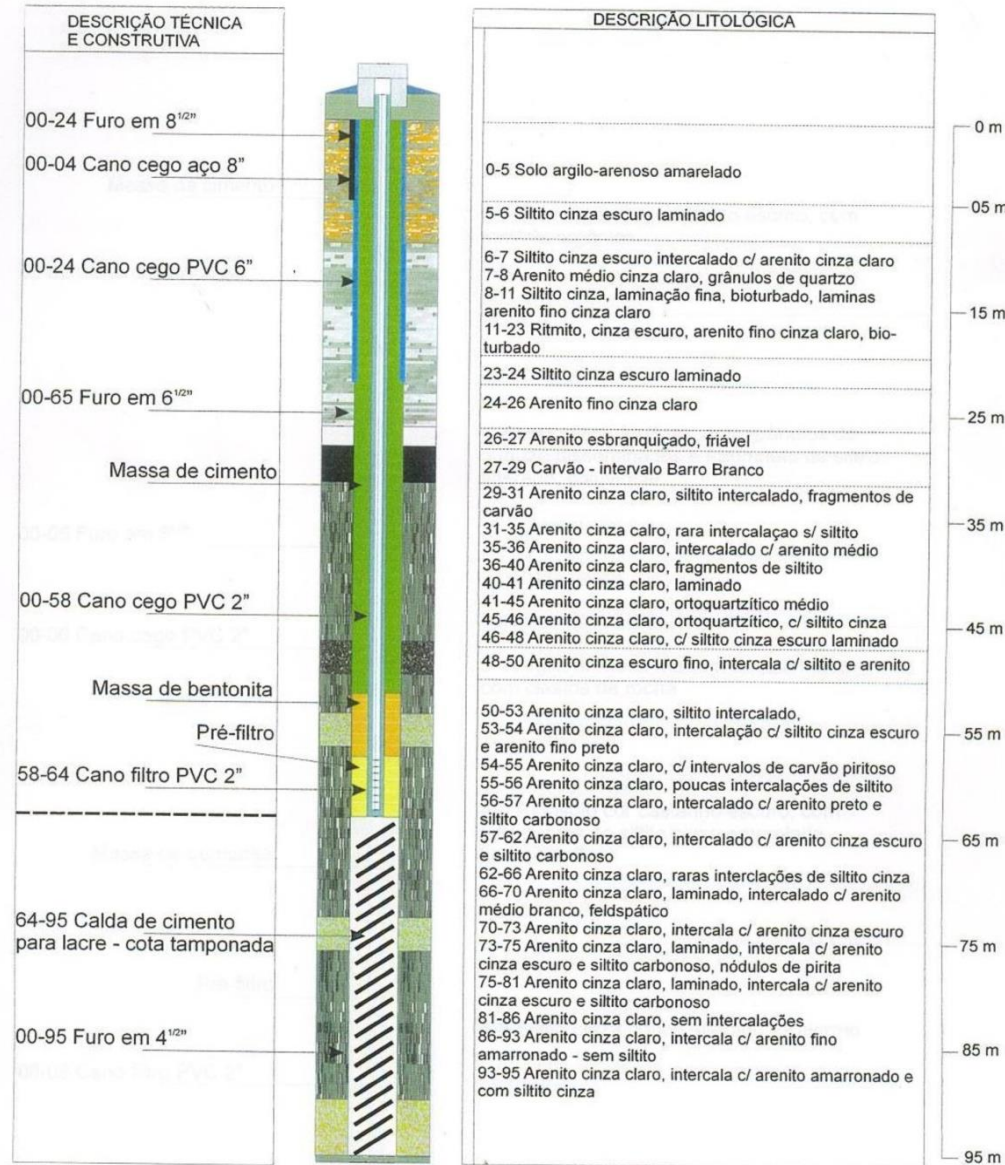
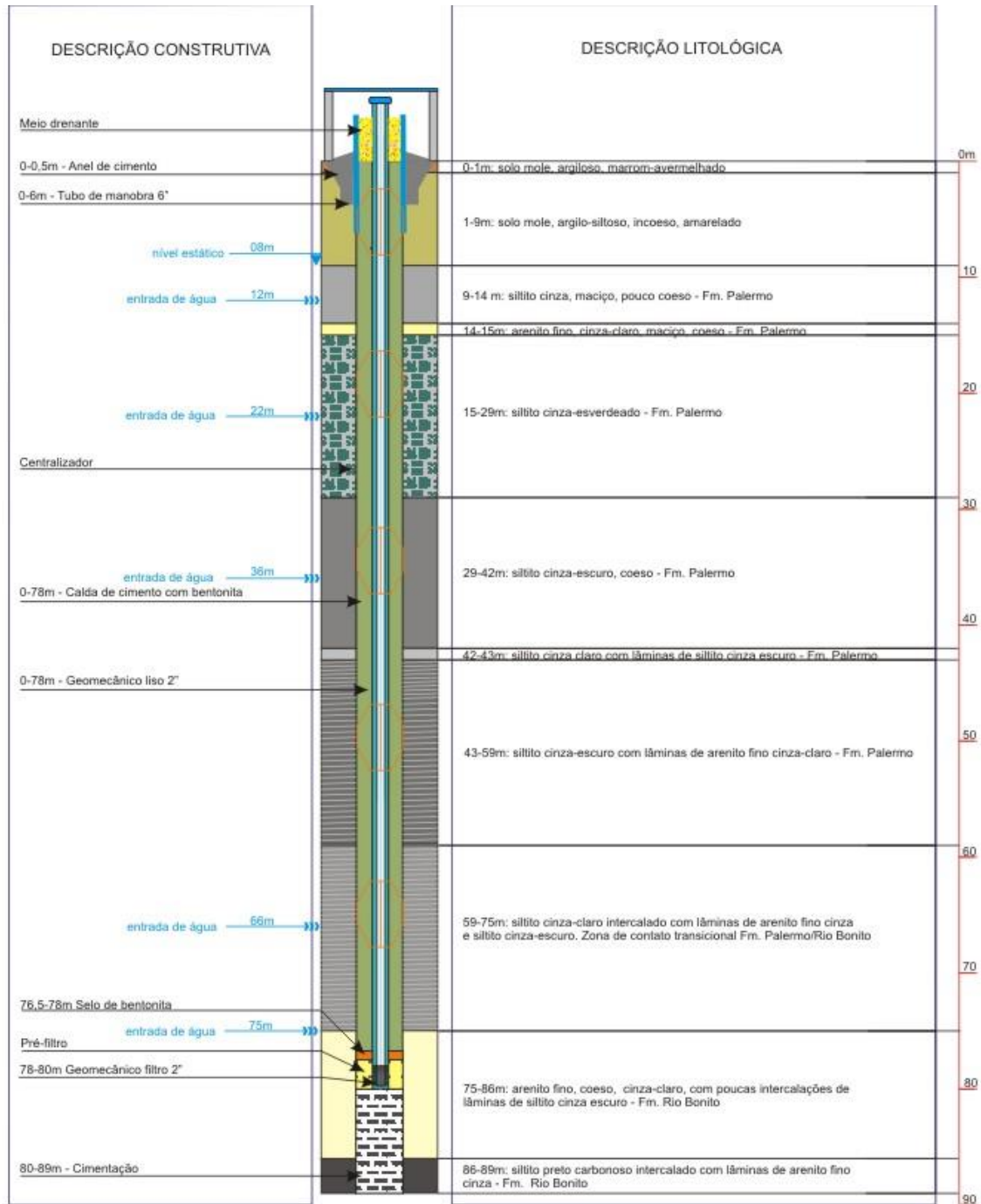


Figura 01 - Perfil poço Treviso - PMAPAR02 UTM - E 650470
Profundidade - 65 m N 6845886

Execução - HIDROBRASIL
Desenho - Geól. Guilherme CREA-RS101946
Data - 13/02(início) a 19/02 (fim)



PMAPAR03



PMAPAR03

Monitoramento da Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera de Santa Catarina
3ª Campanha de perfuração, completção e desenvolvimento de poços de monitoramento

Data de execução: 28/01 a 02/02/2010
Coordenadas: UTM22J E650.129/N6.842.158
Profundidade final da perfuração: 90m
Profundidade de instalação: 80m
Método: Rotopneumático

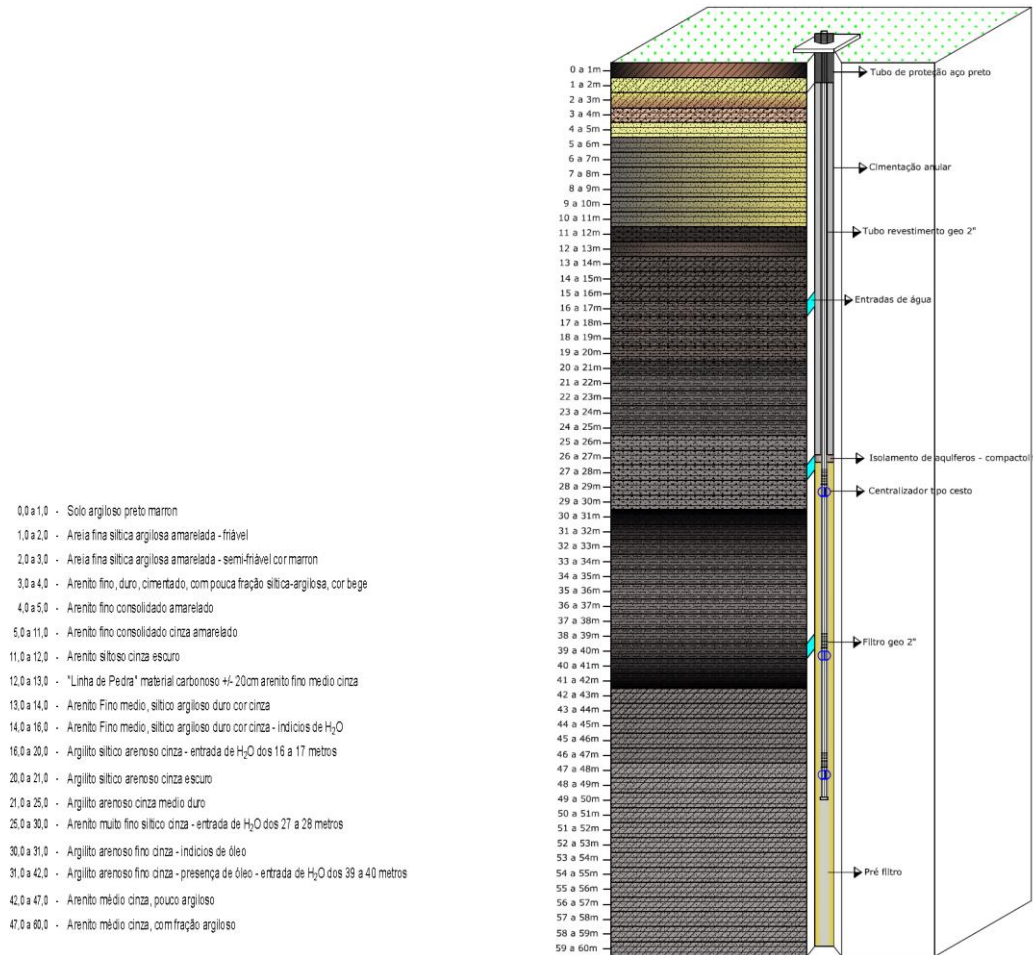
Resp. Técnico/Descrição Litológica: Geólogos Roberto Romano Neto e Marlon Hoelzel
Resp. Técnico/Execução: Geólogo Serlécio Guilherme Pinz/Hidrobrasil



PMPAR04



PERFIL LITOLÓGICO-CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO



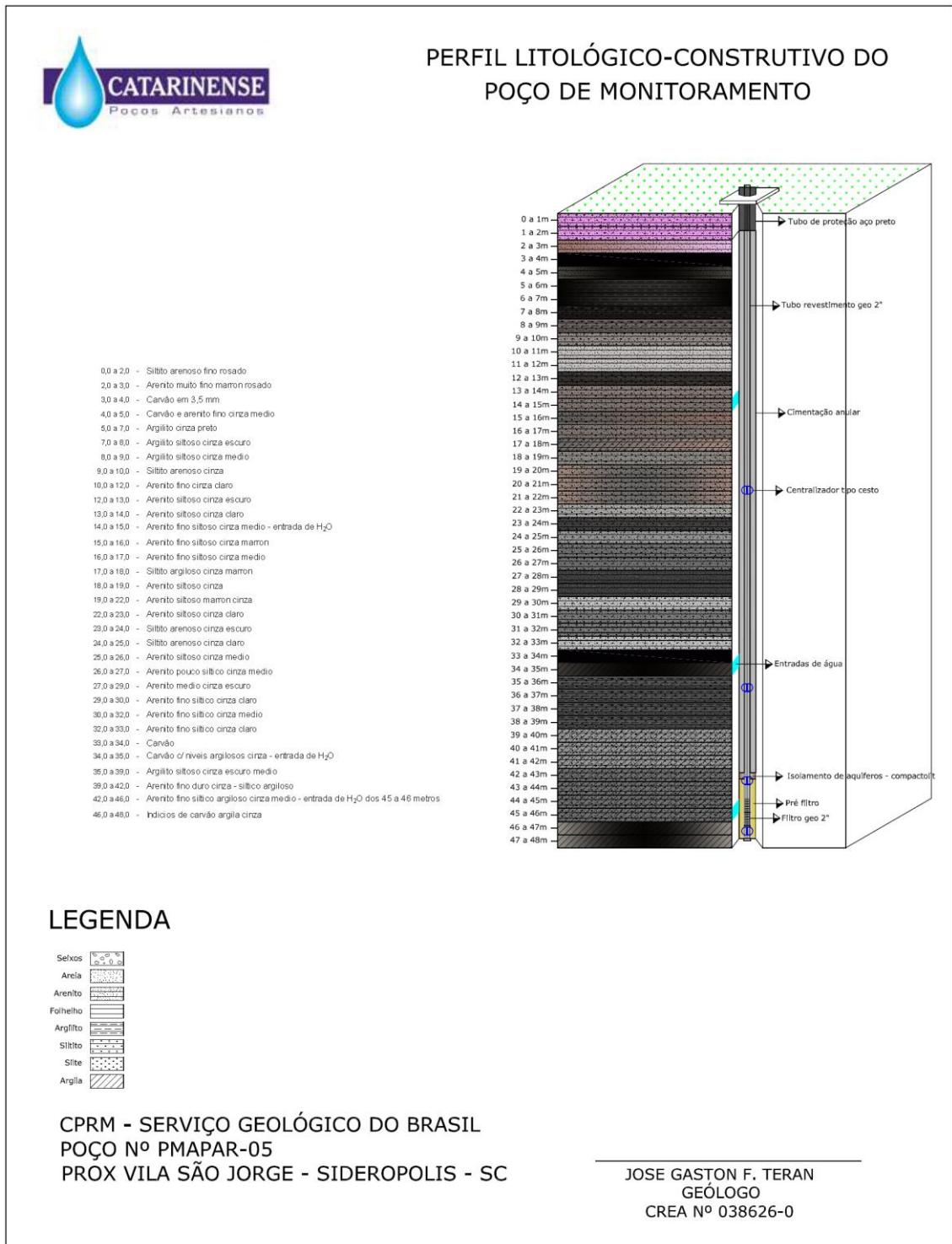
LEGENDA

Selvos	
Areia	
Arento	
Folhelho	
Argilito	
Siltito	
Silte	
Argila	

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL
POÇO Nº PMPAR-04
VILA FUNIL - SIDERÓPOLIS - SC

JOSE GASTON F. TERAN
GEÓLOGO
CREA Nº 038626-0

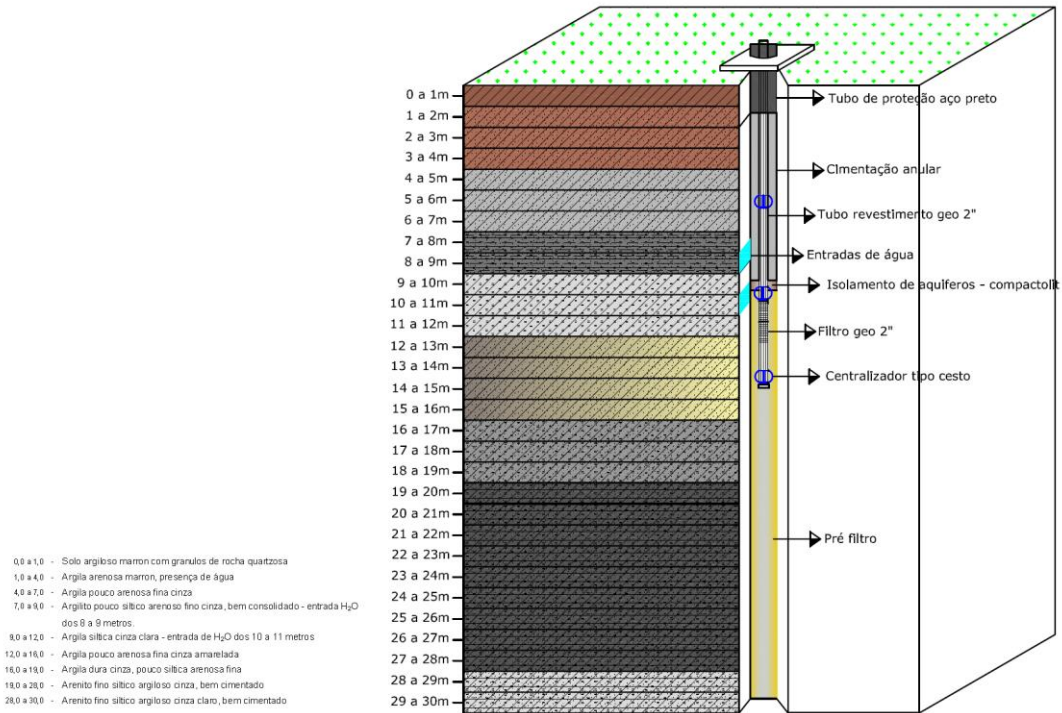
PMAPAR05



PMAPAR07



PERFIL LITOLÓGICO-CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO



- 0,0 a 1,0 - Solo argiloso marrom com granulos de rocha quartzosa
- 1,0 a 4,0 - Argila arenosa marrom, presença de água
- 4,0 a 7,0 - Argilto pouco arenosa fina cinza
- 7,0 a 9,0 - Argilto pouco silico arenoso fino cinza, bem consolidado - entrada H₂O dos 8 a 9 metros
- 9,0 a 12,0 - Argila silica cinza clara - entrada de H₂O dos 10 a 11 metros
- 12,0 a 16,0 - Argila pouco arenosa fina cinza amarelada
- 16,0 a 18,0 - Argila dura cinza, pouco silica arenosa fina
- 18,0 a 28,0 - Arenito fino silico argiloso cinza, bem cimentado
- 28,0 a 30,0 - Arenito fino silico argiloso cinza claro, bem cimentado

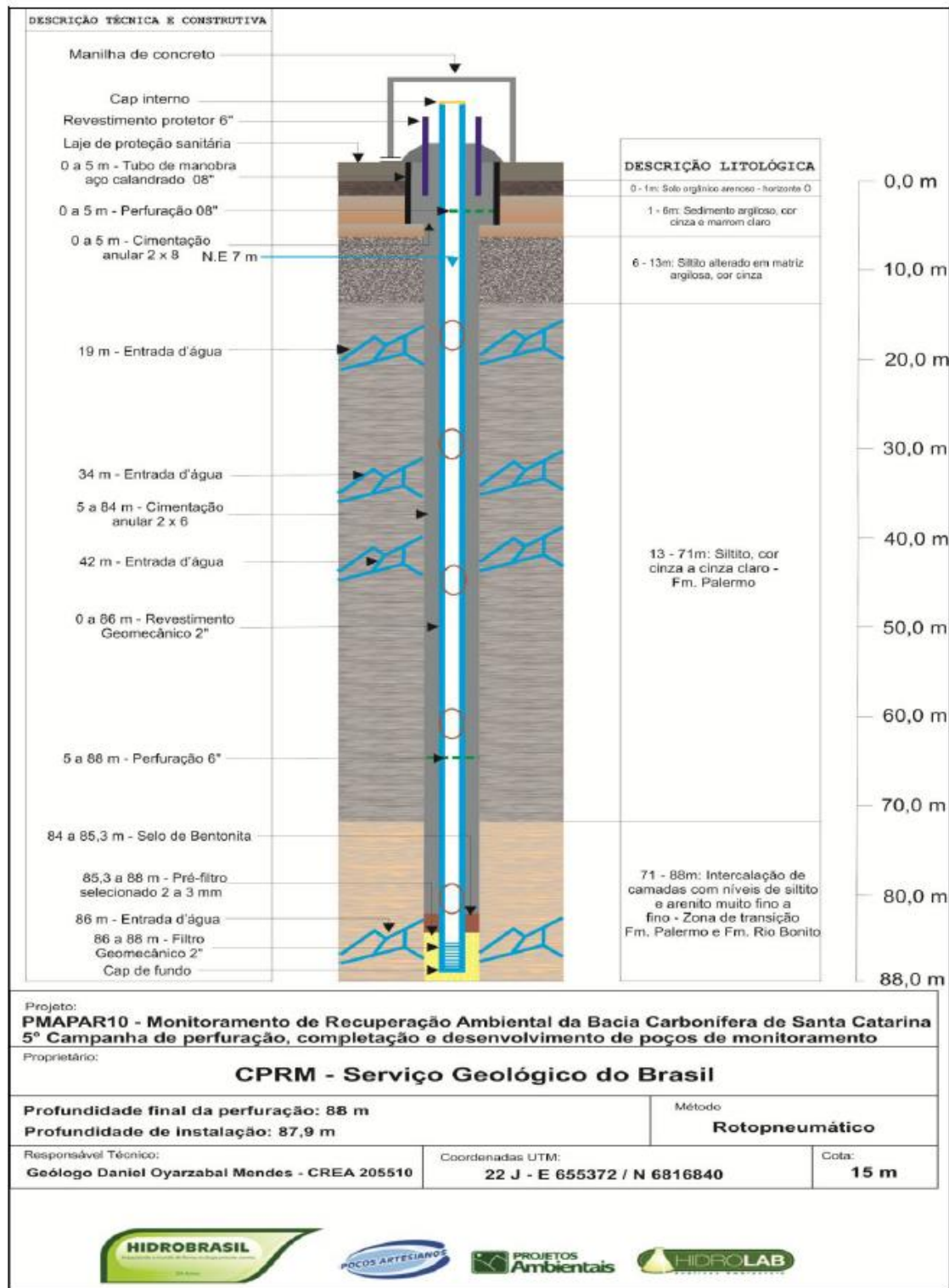
LEGENDA

- Seixos
- Arelia
- Arenito
- Folhelho
- Argilto
- Silito
- Silte
- Argila

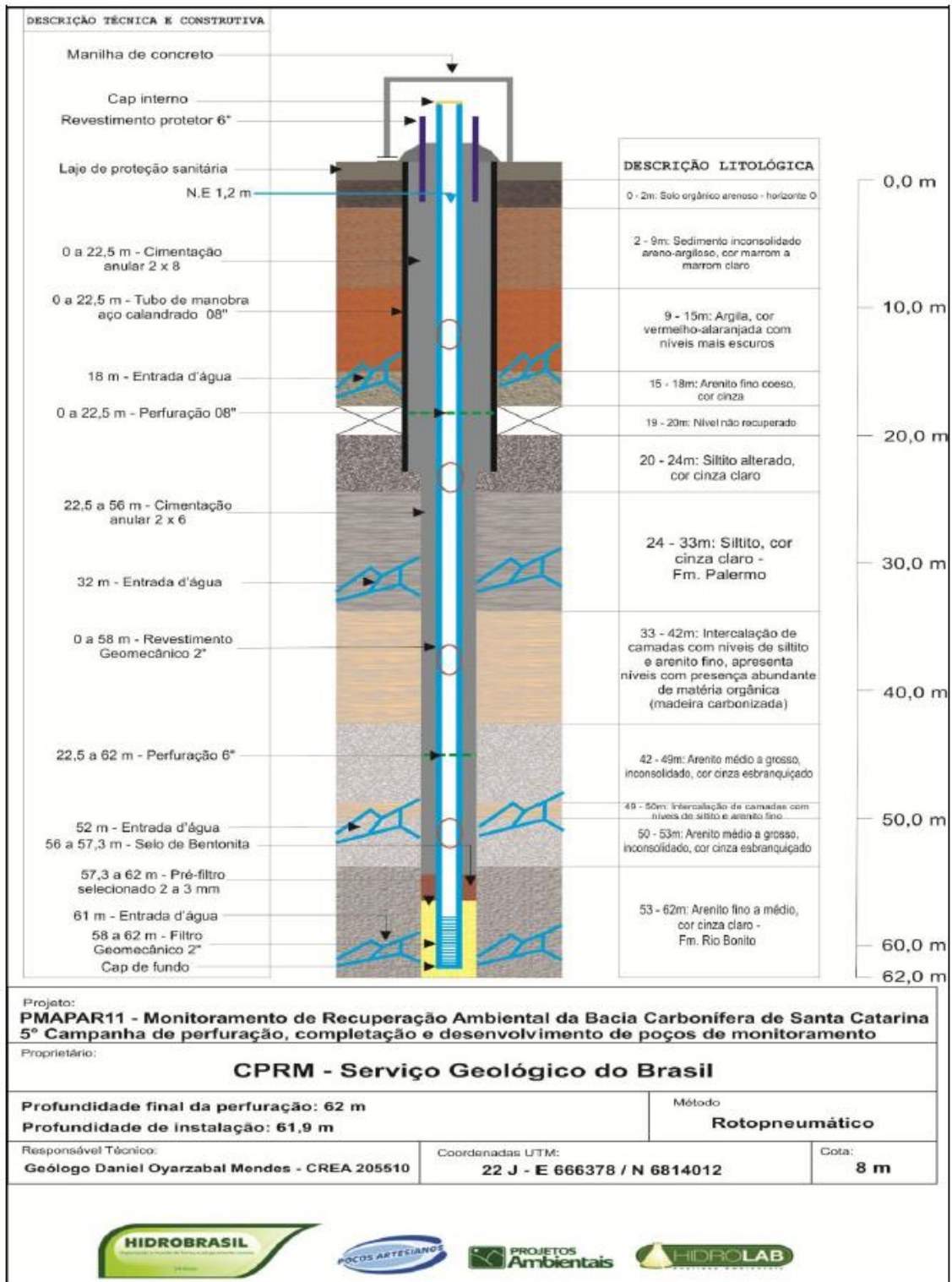
CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL
 POÇO Nº PMAPAR-07
 VILA ZULEIMA - CRICIUMA - SC

JOSE GASTON F. TERAN
 GEÓLOGO
 CREA Nº 038626-0

PMAPAR10



PMAPAR11



ANEXO 2 – Tabela de dados do monitoramento da Região Carbonífera de Santa Catarina para os poços profundos (SGB, 2018).

Poços	Camp.	Data da Coleta	NA inicial	NA final	pH Campo	Cond. Campo	O.D. Campo	Temp. Campo	ORP Campo	TSD Campo	Alkalin.	Cloreto	Sulfato	Fe Total	Fe²	Mn Total	Al Total	Mg	Ca	K	Cu	Cd	Pb	Na	Zn	As	Hg		
PMAPAR01	1ª	02/07/2008	89,20	91,71	7,35	470,50	6,50	19,05					50,40	2,66		0,02	1,22												
	2ª	30/06/2009	36,30	38,80	8,39	617,50	1,15	20,00					173,30	0,20		<LQ	0,93												
	3ª	16/04/2010	44,38	48,10	6,85	1434,00	0,43	22,00						528,97	1,49		0,65	<LQ											
	4ª	13/10/2010	43,30	48,30	6,70	552,00	1,15	23,20						41,25	1,99		0,44	0,00											
	5ª	19/04/2011	34,15	36,12	6,35	397,00	3,90	20,00						19,80	0,90		0,60												
	6ª	06/10/2011	34,16	36,98	6,79	381,50	5,70	27,05				240,20	2,92	15,23	1,12		0,74	0,06	16,60	48,30	1,56				1,62				
	7ª	21/03/2012	28,42	30,72	7,12	683,00	9,40	26,10						466,16	1,23		0,91	0,23											
	8ª	05/09/2012	24,03	26,02	5,85	1134,50	5,00	25,65				264,94	1,95	503,73	2,23		0,20	0,09	16,30	151,00	5,72				247,00				
	9ª	22/04/2013	30,87	32,00	6,59	387,50	4,65	21,20				155,28	8,45	14,14	0,39		0,17	0,22	20,50	53,30	9,02				12,80				
	10ª	19/11/2013	28,83	30,52	5,76	644,00	3,75	22,60				206,86	2,54		0,34		0,20	<LQ	10,10	43,90	3,18				106,00				
	11ª	15/07/2014	28,53	30,23	6,45	333,50	3,80	21,44						18,11	0,27		0,20	<LQ	19,00	47,80	1,25	<LQ	<LQ	<LQ	14,40	0,02	<LQ	<LQ	
	12ª	11/11/2014	32,20	33,80	6,80	336,00	3,75	22,40				198,69		13,17	0,22		0,07	<LQ	19,40	44,80	1,14	<LQ	<LQ	<LQ	9,11	0,06	<LQ	<LQ	
	13ª	10/06/2015	30,31	31,74	5,38	328,00	4,65	23,59				198,30		13,17	0,16		0,10	<LQ	16,70	48,00	1,22	<LQ	<LQ	<LQ		0,04	<LQ	<LQ	
	14ª	30/11/2015	34,10	35,56	6,79	309,00	4,65	20,60				220,10		16,88	0,71		0,16	0,06	19,10	44,30	1,08	<LQ	<LQ	<LQ		0,04	<LQ	<LQ	
	15ª	08/07/2016	30,64	32,54	7,77	358,00	4,45	19,65				223,08		11,99	0,60		0,27	0,10	17,60	40,20	1,15	<LQ	<LQ	<LQ	8,16	0,05	<LQ	<LQ	
	16ª	30/11/2016	32,46	34,36	7,73	354,00	4,27	23,56				215,59		4,46	1,00		0,56	0,14	17,90	46,80	1,24	<LQ	<LQ	<LQ	9,00	0,08	<LQ	<LQ	
	17ª	14/06/2017	23,22	26,28	6,70	530,00	2,22	24,90	97,40	344,00		234,41		27,58	0,46	N.A.	0,16	<LQ	19,60	45,00	1,04	<LQ	<LQ	<LQ	8,07	0,05	<LQ	<LQ	
	18ª	14/11/2017	27,58	38,99	7,01	430,00	36,10	23,00	101,80	279,00		224,24	3,63	31,69	0,65	<LQ	0,29	<LQ	14,10	33,00	1,07	<LQ	<LQ	<LQ	8,48	0,03	<LQ	<LQ	
PMAPAR02	3ª	14/04/2010	2,80	3,04	7,45	244,50	1,06	24,50					1,03	1,43		0,25	0,42												
	4ª	05/10/2010	2,87	3,41	6,74	216,50	1,06	22,70					3,34	1,31		0,03	0,18												
	5ª	19/04/2011	2,64	3,60	6,35	397,00	3,90	20,00					3,60	0,20		0,40	0,80												
	6ª	05/10/2011	2,96	3,45	6,19	87,80	3,90	23,25				44,10	3,20	4,78	0,67		0,34	0,00	1,26	14,90	0,71				N.D.				
	7ª	20/03/2012	3,10	3,72	6,18	157,60	3,73	26,00						5,35	1,65		0,92	0,79											
	8ª	20/09/2012	2,54	3,70	7,03	179,00	2,60	20,90				96,34	1,53	6,34	1,91		1,05	0,07	3,04	27,80	0,89				3,89				
	9ª	12/04/2013	2,13	2,60	6,55	142,00	2,05	22,40				75,69	4,17	6,86	2,01		0,76	0,26	2,43	30,00	5,49				2,93				
	10ª	12/11/2013	2,62	3,24	5,76	182,00	4,40	23,65				85,84	1,89	4,95	1,63		1,20	<LQ	1,62	18,80	0,85				3,80				
	11ª	15/07/2014	2,55	3,02	6,45	333,50	3,80	21,44						10,70	1,05		0,46	1,10	2,83	15,50	1,00	<LQ	<LQ	0,45	3,91	0,42	<LQ	<LQ	
	12ª	06/11/2014	2,12	2,79	6,51	105,00	4,40	21,92				48,55		10,70	1,20		0,58	<LQ	2,03	17,10	0,81	<LQ	<LQ	0,14	3,11	0,03	<LQ	<LQ	
	13ª	16/06/2015	2,08	2,80	6,49	121,50	2,05	21,39				61,95		11,11	1,37		0,77	<LQ	1,77	23,40	1,01	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	<LQ	
	14ª	27/11/2015	2,42	3,34	6,24	65,50	2,05	22,08				33,27		19,76	0,17		0,24	<LQ	1,31	8,66	0,87	<LQ	<LQ	0,31		0,06	<LQ	<LQ	
	15ª	24/06/2016	2,85	3,49	6,36	148,00	0,68	21,50				70,77		7,14	2,97		0,88	0,14	1,92	21,30	0,88	<LQ	<LQ	<LQ	3,14	0,02	<LQ	<LQ	
	16ª	22/11/2016	2,41	3,18	6,50	148,00	0,82	21,13				72,24		7,60	3,36		1,04	0,34	2,14	25,90	0,97	0,09	<LQ	<LQ	3,46	0,07	<LQ	<LQ	
	17ª	01/06/2017	1,20	1,97	5,73	223,00	2,00	20,37	91,35	112,00		58,37		30,46	1,83	N.A.	0,71	0,35	1,94	19,30	0,92	<LQ	<LQ	0,08	3,34	0,03	<LQ	<LQ	
	18ª	07/11/2017	2,63	3,50	5,46	207,50	0,26	23,80	29,15	134,00		84,73	2,71	26,34	1,26	<LQ	0,70	0,71	1,75	17,50	0,89	<LQ	<LQ	0,06	2,71	0,08	<LQ	<LQ	
	PMAPAR03	3ª	15/04/2010	5,80	5,10	5,95	152,50	2,16	24,15					11,87	0,48		<LQ	<LQ											
		4ª	14/10/2010	5,87	9,79	5,49	61,00	1,15	21,00																				
5ª		18/04/2011	5,40	8,30	5,23	39,35	2,42	23,30					0,70	1,80		0,00	2,50												
6ª		06/10/2011	5,79	8,30	5,98	28,60	4,10	25,20				17,53		1,98	0,06		0,07	N.D.	N.D.	2,22	0,49	4,65				0,83			
7ª		28/03/2012	6,17	8,60	5,70	42,00	4,58	27,10						2,31	0,46		0,11	0,35											
8ª		05/09/2012	6,36	8,54	5,55	57,00	4,55	27,15				2,79			0,44		0,10	0,14	4,99	1,45	2,09	3,61				0,63			
9ª		22/04/2013	3,20	4,85	3,82	95,00	2,45	22,41				0,00		2,92	2,79		0,34	0,42	4,72	6,51	2,15	7,14				6,18			
10ª		19/12/2013	6,19	8,42	6,03	36,00	4,25	22,91				1,15		1,15	0,12		0,05	0,09	4,35	2,12	0,87	1,15				0,55			
11ª		15/07/2014	5,73	7,21	6,09	30,50	4,25	20,31					0,03	14,82	0,10		0,02	0,07	4,04		1,35	2,51	<LQ	<LQ	0,04	0,53	<LQ	<LQ	
12ª		11/11/2014	5,84	6,99	6,05	32,00	4,25	21,75				6,34	0,02	4,94	0,12		0,02	<LQ	3,52		1,17	3,52	<LQ	<LQ	0,07	0,43	<LQ	<LQ	
13ª		10/06/2015	5,74	7,20	4,71	27,00	2,45	22,07				8,79	0,04	45,28	0,13		0,01	<LQ			1,04	1,73	<LQ	<LQ	0,05	0,53	<LQ	<LQ	
14ª		30/11/2015	5,96	7,42	6,41	28,00	2,45	19,92				14,12	0,03	30,87	0,13		0,02	0,08			1,05	2,41	<LQ	<LQ	0,07	0,44	<LQ	<LQ	
15ª		08/07/2016	6,12	7,92	6,33	49,00	3,80	18,87				15,33	0,03	212,57	0,40		0,06	0,17	3,86		1,57	2,96	<LQ	<LQ	0,13	0,60	<LQ	<LQ	

	18*	16/11/2017	2,38	2,43	7,08	455,00	8,78	25,90	-87,90	295,00	231,76	10,28	36,63	0,28	<LQ	0,06	<LQ	2,31	15,80	3,78	<LQ	<LQ	<LQ	60,40	0,02	<LQ	<LQ
PMAPAR11	13*	24/06/2015	0,00	0,00	5,53	6723,00	0,90	21,40			56,73		316,16	0,02		0,18	<LQ	2,81	270,00	44,20	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	0,00
	14*	18/11/2015	0,00	0,00	6,22	7164,00	0,90	22,63			64,75		283,18	0,10		0,17	<LQ	3,29	293,00	45,10	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	<LQ
	15*	23/06/2016	0,00	0,00	7,28	8380,00	0,48	20,37			64,30	1805,00	281,23	0,17		0,19		3,75	285,00	44,10				1520,00			
	16*	23/11/2016	0,00	0,00	7,57	8400,00	0,33	21,47			60,90	1694,00	363,18	0,17		0,22	<LQ	3,49	304,00	46,10				1390,00			
	17*	02/06/2017	0,00	0,00	7,41	8004,50	0,40	22,25	38,35	5202,50	66,45	1684,00	335,04	0,14	N.A.	0,20	<LQ	3,45	294,00	38,10	<LQ	<LQ	<LQ	1390,00	0,02	<LQ	<LQ
	18*	01/11/2017	0,00	0,00	7,52	7928,00	0,08	23,00	-88,00	5153,00	89,06	2610,49	350,27	0,11	<LQ	0,16	<LQ	2,85	252,00	42,60	<LQ	<LQ	<LQ	1230,00	0,01	<LQ	<LQ

PMLAAR03	6	28/09/2011	1,48	1,48	6,76	231,50	0,54	22,60		103,00	6,16	1,49	4,17		0,31	0,03	9,35	31,30	1,27				N.D.						
	7	20/03/2012	1,65	1,65	6,38	193,75	4,34	28,70					0,00	7,52		0,30	0,12												
	8	18/09/2012	1,16	1,17	6,06	207,00	1,95	21,45		103,63	9,10	9,03	5,00		0,23	<0,01	10,30	24,90	1,25					12,20					
	9	11/04/2013	0,70	0,70	6,05	220,50	2,00	23,05		107,28	6,87	0,09	4,71		0,20	<LQ	9,36	21,00	6,50					9,39					
	10	31/10/2013	1,42	1,44	7,11	201,00	4,35	21,41		99,92	4,46	<0,5	4,18		0,23	<LQ	5,99	9,50	0,87					11,10					
	11	02/07/2014	1,40	1,44	6,83	178,00	2,85	20,78					12,34	4,36		0,26	<LQ	9,05	17,90	0,93	<LQ	<LQ	<LQ	11,50	<LQ	<LQ	<LQ		
	12	05/11/2014	1,23	1,27	6,16	186,50	2,85	22,88		99,45			9,06	4,57		0,33	<LQ	9,59	18,20	0,90	<LQ	<LQ	<LQ	9,68	<LQ	<LQ	<LQ		
	13	17/06/2015	1,37	1,39	6,43	183,00	2,00	19,06		107,95			2,06	4,77		0,25	<LQ	8,17	20,40	1,14	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	<LQ		
	14	23/11/2015	1,46	1,52	6,95	184,50	2,00	20,51		124,83			11,52	7,78		0,27	<LQ	10,00	20,90	1,06	<LQ	<LQ	<LQ		0,01	<LQ	<LQ		
	15	05/07/2016	1,65	1,68	7,25	228,00	0,63	21,57		124,05			5,23	5,91		0,30	0,43	10,20	20,10	1,14	<LQ	<LQ	<LQ	10,20	0,03	<LQ	<LQ		
	16	17/11/2016	1,40	1,53	7,15	230,00	0,29	21,63		122,95			4,82	7,57		0,41	0,49	10,60	22,90	1,11	<LQ	<LQ	<LQ	10,40	0,01	<LQ	<LQ		
	17	12/06/2017	1,32	1,32	6,30	373,00	6,06	22,33	-28,00	135,18			15,23	5,81	N.A.	0,32	0,20	10,10	22,20	1,03	<LQ	<LQ	<LQ	9,75	0,03	<LQ	<LQ		
	18	31/10/2017	1,31	1,44	6,34	292,00	0,01	21,90	-25,80	143,38	6,47		10,70	4,18	<LQ	0,25	<LQ	8,06	18,30	0,98	<LQ	<LQ	<LQ	7,97	0,01	<LQ	<LQ		
	PMLAAR04	3	16/03/2010	1,10	1,60	6,50	1898,50	0,39	23,10				1088,33	59,87		4,38	<LQ												
		4	30/09/2010	1,74	1,75	6,81	6,81	6,81	6,81				1376,92	68,70		1,87	0,00												
		5	11/04/2011	1,94	1,94	5,63	1142,50	0,76	23,05				12,80	71,60		4,90	0,00												
		6	28/09/2011	2,11	2,11	5,93	1745,00	1,81	22,30		240,20	13,68	1321,60	72,80		5,30	N.D.	132,00	271,00	6,99					49,50				
		7	16/03/2012	2,78	2,78	5,82	1890,50	2,09	23,25				1452,73	74,50		5,07	0,26												
8		12/09/2012	1,95	1,96	6,24	1974,50	1,75	21,55		0,00	12,84	1518,78	50,90		4,01	<0,01	125,00	212,00	9,22					60,20					
9		08/04/2013	1,90	1,96	5,85	1993,00	2,30	22,01		12,24	14,43	56,90	3,32		3,32	<LQ	125,00	277,00	69,50					58,90					
10		30/10/2013	2,22	2,22	4,69	1992,00	3,75	21,55		0,00	9,27	1235,52	67,66		4,67	<LQ	132,00	125,00	9,29					72,60					
11		08/07/2014	1,95	1,95	5,78	1816,00	3,75	19,77				1270,61	60,80		5,08	<LQ	108,00	284,00	8,97	<LQ	<LQ	<LQ	68,20	<LQ	<LQ	<LQ			
12		05/11/2014	2,11	2,11	5,76	1981,50	3,75	21,43		20,18		1313,00	71,50		5,27	<LQ	122,00	283,00	10,00	<LQ	<LQ	<LQ	63,20	0,02	<LQ	<LQ			
13		17/06/2015	1,84	1,85	5,51	1853,00	1,75	20,66		0,00		1290,37	57,70		4,19	<LQ	101,00	281,00	11,10	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	<LQ			
14		27/11/2015	1,97	2,00	5,95	1936,00	1,75	22,23		0,00		1261,14	70,80		4,38	<LQ	122,00	277,00	10,30	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	<LQ			
15		05/07/2016	2,32	2,35	6,50	2140,00	1,69	21,40		0,00		1040,40	57,70		4,33	0,58	108,00	237,00	9,81	<LQ	<LQ	<LQ	55,70	0,03	<LQ	<LQ			
16		17/11/2016	2,37	2,42	6,45	2,02	0,66	21,43		0,00		1333,70	81,00		5,15	0,34	117,00	284,00	11,80	0,36	<LQ	<LQ	60,20	0,06	<LQ	<LQ			
17		07/06/2017	1,42	1,43	5,82	2017,50	0,53	21,85	51,55	53,71		1255,79	66,10	N.A.	5,28	<LQ	114,00	251,00	8,76	<LQ	<LQ	<LQ	55,30	0,02	<LQ	<LQ			
18		31/10/2017	2,25	2,26	5,86	2202,50	6,47	22,25	14,50	0,00	14,51	1309,71	44,90	<LQ	4,69	<LQ	85,80	185,00	9,28	<LQ	<LQ	<LQ	44,50	0,02	<LQ	<LQ			