

# Informe Técnico-Científico de Prevenção de Desastres e Ordenamento Territorial

Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial | Departamento de Gestão Territorial

V. 2, N. 2 Rio de Janeiro, set. 2021 ISSN 2764-2054

## Síntese dos Condicionantes Geoquímicos Atuantes nas Regiões Sul e Extremo-Sul do Estado de Santa Catarina, Brasil: Um Caso de Influência da Bacia Carbonífera

*Synthesis of Geochemistry Behavior of South and Extreme-South Regions of Santa Catarina State, Brazil: A case of Coal Basin Influence*

Melissa Franzen ([melissa.franzen@cprm.gov.br](mailto:melissa.franzen@cprm.gov.br))<sup>1</sup>  
José Luis Ando Bustamante ([andojl@hotmail.com](mailto:andojl@hotmail.com))<sup>2</sup>  
Eduardo Paim Viglio ([eduardo.viglio@cprm.gov.br](mailto:eduardo.viglio@cprm.gov.br))<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Serviço Geológico do Brasil - CPRM, Superintendência de Porto Alegre  
<sup>2</sup> Consultor Independente  
<sup>3</sup> Serviço Geológico do Brasil - CPRM, Escritório Rio de Janeiro

### Abstract

*This research uses Analysis of Principal Components (ACP) to synthesize information about Low Density Geochemistry stream sediments survey of the South and Extreme-South regions of Santa Catarina State, where it's inserted a coal mining region. The sampling work includes 74 samples from bottom sediments, with a density sample of nearly 1/150 km<sup>2</sup> and <80 mesh size for analysis. The sediments were submitted to extraction by HNO<sub>3</sub>/HCl (3:1) and analyzed by ICP for 53 elements. After data normalization and correlation study, the results of 47 parameters with relevance for ACP analysis were selected. Three principal components explained 72.7% of total variance. The first and second components reflected the lithotypes of acid rocks in the North area and basic rocks in the South area. The third component portrays the anthropic influence of coal mining, resulting in the acid mine drainage, that leaches the natural elements and retains the toxic elements in the affected areas.*

*Keywords: Regional geochemistry, bottom sediments, acid mine drainage.*

Palavras chave: Geoquímica regional, sedimentos de fundo, drenagem ácida de mina.

### INTRODUÇÃO

Até a década de 1980, a atividade extrativa da mineração de carvão em Santa Catarina (SC) ocorria sem nenhum controle ou preocupação ambiental. Na década de 1990, a região carbonífera de SC possuía 5.500 ha (55 km<sup>2</sup>) de áreas degradadas pela exploração de carvão, sendo 2.770 ha minerados a céu aberto e 2.730 ha de depósitos de rejeitos (JICA, 1998). No ano 2000, uma sentença judicial condenou a União, as Empresas Carboníferas e o estado de Santa Catarina a recuperar algumas das áreas impactadas, o que deu início ao Projeto de Recuperação Ambiental das Áreas Degradadas pela Mineração de Carvão.

Atualmente, a atividade extrativa de carvão ocorre condicionada ao licenciamento ambiental, em um novo modelo setorial que preconiza viabilizar a indústria carbonífera catarinense de forma autossustentada e ambientalmente

correta, aliando as atividades carboníferas com a recuperação ambiental. Nos últimos 10 anos, diversas técnicas de recuperação ambiental têm sido empregadas, pois cada condição local exige uma solução. Para avaliação da recuperação ambiental de áreas degradadas, vem sendo realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM), desde 2009, o monitoramento de qualidade das águas superficiais e subterrâneas dentro da área impactada.

Para se conhecer o substrato geoquímico natural e delimitar o impacto gerado pela mineração de carvão, foi realizado um levantamento geoquímico de baixa densidade nas regiões hidrográficas onde se encontra inserida a bacia carbonífera, iniciando o recobrimento geoquímico em escala regional do estado de Santa Catarina pelas regiões hidrográficas Sul e Extremo-Sul.

Este trabalho teve por objetivo apresentar o comportamento geoquímico dos sedimentos fluviais de fundo, desde as nascentes dos recursos hídricos superficiais

até a foz dos grandes rios da região, passando pelas litologias com camadas de carvão, que fazem parte da Bacia do Paraná. Para tal, foi empregado um tratamento estatístico multivariado, de ordenação das variáveis em componentes principais, com a finalidade de diminuir o número de variáveis, e descrever os principais processos, naturais e antrópicos, atuantes e formadores do substrato geoquímico, na região em que se encontra inserida a Bacia Carbonífera de Santa Catarina.

## DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde às regiões Sul e Extremo-sul do Estado de Santa Catarina, onde se encontra inserida a Bacia carbonífera, na porção sudeste do Estado.

A região hidrográfica Extremo-Sul é composta pelas bacias dos rios Mampituba (1.250 km<sup>2</sup>), Araranguá (2956 km<sup>2</sup>) e Urussanga (676 km<sup>2</sup>), enquanto a região Sul é composta pelas bacias dos rios Tubarão (4.734 km<sup>2</sup>) e Duna (1.211 km<sup>2</sup>). Juntas, estas duas regiões hidrográficas totalizam aproximadamente 10.827 km<sup>2</sup> (Figura 1).

Uma estimativa atual para a área de influência da Bacia Carbonífera de Santa Catarina, levando em consideração somente as sub-bacias afetadas pela mineração desde as suas nascentes, seria da ordem de 2.745 km<sup>2</sup> (Figura 1), área inserida nas bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Urussanga e Tubarão, que em conjunto perfazem 8.366 km<sup>2</sup>.

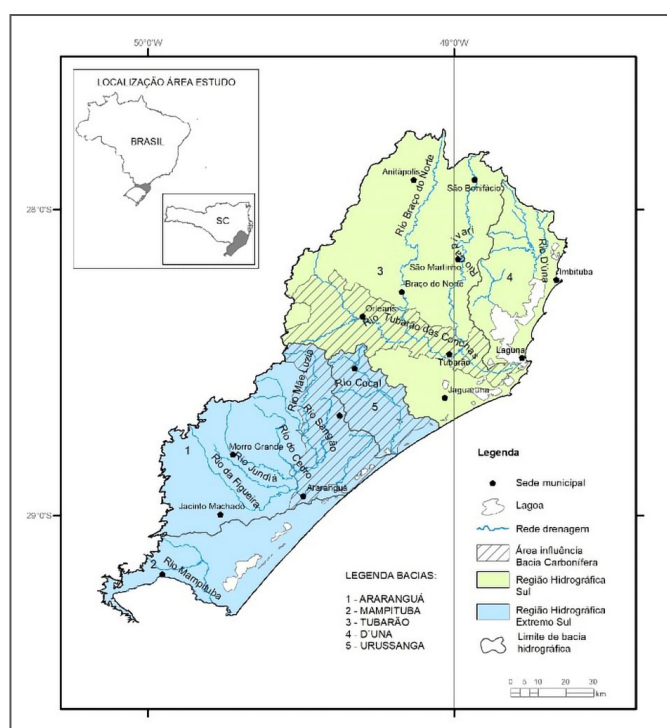


FIGURA 1 - Localização da área de estudo. Fonte: elaborada pelos autores.

As zonas de maior impacto ambiental situam-se no Centro-Leste da área de estudo, onde se encontra totalmente inserida a Bacia de Urussanga. Tal impacto se estende para parte das bacias de Araranguá (ao Sul) e Tubarão (ao Norte), e recai principalmente sobre as águas superficiais e subterrâneas desta área, que circunscreve um grande passivo ambiental associado à extração de carvão, em galerias subterrâneas e a céu-aberto, ao longo dos últimos 40 anos.

A região de Jaguaruna, embora cercada pela área considerada impactada pelo carvão, foi excluída em função do relevo e características das águas superficiais, pois se encontram isoladas as nascentes destes cursos de água.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os sedimentos de fundo foram coletados em pontos representativos de sub-bacias hidrográficas inferiores a 150 km<sup>2</sup>. Ao todo, foram coletadas 74 amostras de sedimentos de fundo, abrangendo uma área de influência aproximada de 10.827 km<sup>2</sup>, o que representa uma densidade média de 1 amostra a cada 146 km<sup>2</sup>.

Os sedimentos de fundo foram coletados no canal ativo da drenagem, abaixo do nível de água, em trechos sub-retilíneos. A coleta foi realizada de forma composta, numa faixa de 10 m ao longo da drenagem, a montante do acesso, com um peneiramento prévio *in loco* em peneira de nylon na fração < 32 mesh (0,5 mm).

As amostras foram secas a 55°C em estufa e peneiradas na fração < 80 mesh (0,177 mm), previamente à extração com água-régia (HNO<sub>3</sub>/HCl concentrados – 3:1) (USEPA, 2007), que visa determinar a disponibilidade e mobilidade dos metais (RAURET, 1998).

As análises químicas foram realizadas por ICP-OES ou ICP-MS, contemplando 53 elementos (Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Pd, Pt, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr), pelo laboratório SGS-GEOSOL. Dependendo da força de ligação dos elementos químicos à matriz cristalina, os resultados da extração com água-régia se aproximam de concentrações parciais ou totais.

O processamento dos dados envolveu estatística descritiva e de distribuição dos elementos (quartis, percentis, histograma, *boxplot*), geoestatística (interpolação para representação em mapas) e multivariada, representada pela Análise de Componentes Principais (ACP), que foi o principal objetivo deste trabalho. Uma análise multivariada de dados pode indicar padrões mais simples do que a análise individual de cada elemento, podendo explicá-los em um número muito menor de variáveis chamados fatores, ou componentes (GEOSOF, 2010).

A preparação dos dados para ACP requer a normalização dos mesmos, sendo que neste caso mantiveram-se os valores extremos em função da baixa densidade amostral. A seleção de variáveis foi realizada por meio da análise de correlação, onde dados pouco correlacionados foram retirados por não aportarem informação. O método ACP calcula uma matriz de correlação usando todas as variáveis de interesse e amostras de um banco de dados, resultando um novo conjunto de variáveis artificiais chamadas autovalores (*eigenvalues*), cujo valor indica a importância de cada componente (fator) sobre a variação total dos dados. Os carregamentos (*loadings*) expressam a influência de cada variável dentro de um fator, e as pontuações (*scores*) expressam a influência de um autovetor em uma amostra específica, permitindo o mapeamento espacial do fator em amostras individuais e exposição espacial por meio de mapas.

As análises foram realizadas por meio do software Geosoft Target 9.8.1, a partir de matriz de dados originais com 74 unidades amostrais e 47 variáveis (elementos químicos). Foram excluídos Au, B, Ge, Re, Se, Ta e Te, seja por terem poucos resultados detectados ou por não apresentarem correlações significativas.

As menções no decorrer do trabalho sobre possíveis origens naturais e antrópicas dos elementos químicos são oriundas de observação do seu comportamento espacial, por bacia hidrográfica, e do seu comportamento geoquímico frente a fatores geológicos e ambientais. Já os teores de fundo, ou de *background*, dizem respeito à uma faixa de valores considerados médios em materiais geológicos não mineralizados (LICHT, 1998). Dentre os métodos robustos consagrados, foi empregado o *boxplot* para estimativa da faixa de *background*. Os valores dos dados ordenados são divididos em quatro partes iguais, com o percentil de 50% (mediana) no centro, e os percentis de 25% e 75% delimitando um bloco de valores que representa 50% do conjunto de dados (REIMANN *et al.*, 2005). Para efeito de simplificação, ao longo do texto, o *background* é referido como o valor central do bloco, representado pela mediana.

## GEOLOGIA

De acordo com CPRM (2014), a área de estudo tem como embasamento unidades do Escudo Catarinense pertencentes ao Cráton Itapema, agrupadas no Complexo Granítico-Gnáissico. Constituem granitoides foliados, sin a tardi-transcorrentes, pertencentes à Suíte Intrusiva Paulo Lopes, que predominam na porção Norte da área de estudo (Figura 2).

Intrusivos no Complexo Granítico-Gnáissico e em parte contemporâneos, datados do Neoproterozoico,

encontram-se corpos graníticos das suítes Pedras Grandes e Cambirela, que compõem o Domínio Interno do Cinturão Dom Feliciano. A consanguinidade entre as unidades pertencentes ao Cinturão Dom Feliciano é considerada devido à homogeneidade petrográfica (cálcio-alcalina ou alcalina) e dados isotópicos existentes, que identificam desde os termos meso a catazonais até os diferenciados epizonais, estes últimos formando *stocks* localizados em cúpulas graníticas rasas, que representam os termos finais da magmatogênese (SILVA; LEITE, 2000).

De pequena expressão no Extremo-Norte da área, ocorre o Complexo Alcalino de Anitápolis, um pequeno maciço alcalino básico-ultrabásico de aproximadamente 6 km<sup>2</sup>, que intruiu os granitoides cálcico-alcalinos da Suíte Pedras Grandes. É o único depósito conhecido de fosfato no sul do Brasil (KAHN, 1988).

Registram-se ainda no Norte, mineralizações hidrotermais filoneanas de fluorita, associada à calcedônia e barita, nos trechos alto e médio da Bacia de Tubarão. O minério se encontra encaixado entre granitoides da Suíte Pedras Grandes e a unidade basal da Bacia do Paraná. A origem dos fluidos pode ser rochas do embasamento cristalino (DARDENNE; SAVI, 1984), o magmatismo alcalino ou as salmouras da Bacia do Paraná (MARTINS FILHO, 2004).

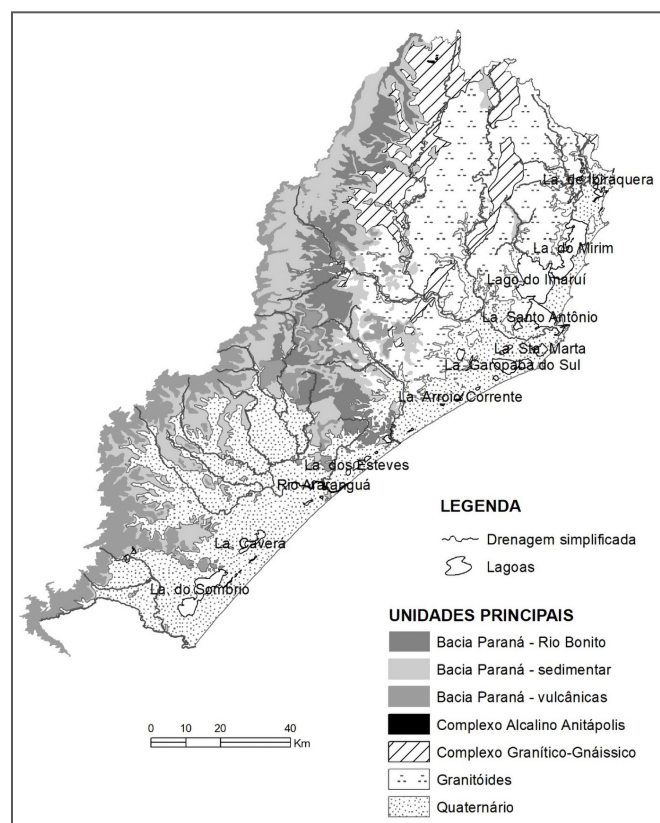


Figura 2 - Esboço geológico simplificado. Fonte: CPRM (2014), modificada pelos autores.

Nas bordas Oeste e Sul do embasamento, e predominando na porção Central-Leste da área, encontram-se as rochas sedimentares da Bacia do Paraná, capeadas por rochas vulcânicas básicas nas bordas escarpadas e altos do planalto Serra Geral, em todo o quadrante Oeste. Esta bacia sedimentar é constituída por depósitos continentais e de plataforma rasa, cuja implantação se deu no período paleozoico-mesozoico. O registro compreende um pacote sedimentar-magmático, de espessura total máxima em torno dos 7 mil metros (MILANI *et al.*, 2007).

Aflora na área de estudo a Supersequência Gondwana I de Milani *et al.* (2007), cujas unidades sedimentares encerram um ciclo transgressivo-regressivo completo, no qual se encontram os depósitos de carvão do Sul-Catarinense. A Figura 2 agrupa as unidades sedimentares pertencentes à Supersequência Gondwana I, com exceção da Fm. Rio Bonito, em destaque por conter as camadas de carvão.

A Fm. Rio Bonito se caracteriza pela alternância de pacotes ora predominantemente arenosos, ora pelíticos, com as camadas de carvão em sua porção superior e meridional da Bacia do Paraná.

O registro estratigráfico expõe ainda os arenitos da Fm. Botucatu, depositados após um longo período erosivo a partir do final do Jurássico, e os magmatitos da Fm. Serra Geral nas cotas mais elevadas do terreno, agrupados na Supersequência III de Milani *et al.* (2007).

Para efeito de simplificação da geologia, os arenitos da Fm. Botucatu foram incluídos no grupo de unidades sedimentares da Bacia do Paraná (Figura 2).

A Fm. Serra Geral é uma sequência vulcânica de rochas básicas toleíticas, acompanhadas de intrusões na forma de *sills* e diques, de lavas ácidas e quantidades subordinadas de rochas intermediárias (PICCIRILLO *et al.*, 1988), que cobrem ou intrudem os sedimentos da Bacia do Paraná, e que estão parcialmente recobertos por sedimentos cenozoicos.

No extremo Sul da área, próximo à cidade de Maracajá, e ao longo do divisor de águas a Oeste-Sudoeste, as rochas vulcânicas da Fm. Serra Geral afloram como corpos essencialmente básicos, cujos acessórios são magnetita esquelética e apatita acicular (SILVA; LEITE, 2000).

O contato da Fm. Serra Geral com as unidades mais antigas da Bacia do Paraná, na porção Central, é determinado por discordância erosiva e, em alguns locais do Norte, os magmatitos jazem diretamente sobre as rochas graníticas do embasamento cristalino, tal como nas proximidades de Orleans, São Ludgero e Urussanga, onde também se verifica o contato por falha entre estas unidades.

Ocupando uma faixa mais larga ao Sul da área de estudo, a Planície Costeira é formada por uma sedimentação cenozoica, desenvolvida durante o Quaternário. Abrange depósitos sedimentares continentais, transi-

cionais e marinhos, além de depósitos de encosta e aluviões ao longo dos atuais cursos de água. Os sedimentos se desenvolveram como produto de processos continentais (depósitos de leques aluviais e aluvionares), transicionais (depósitos flúvio-lagunares e flúvio-deltaico-marinhos) e costeiros dominado por ondas (relacionadas à evolução de duas barreiras arenosas, uma pleistocênica e outra holocênica).

No que se refere aos recursos hídricos subterrâneos, a área abrange os sistemas aquíferos Rio Bonito, Leques Aluviais e Fluviolacustres.

## RESULTADOS

Com a aplicação da ACP se obtiveram as componentes mais relevantes nas primeiras dimensões, ou eixos denominados principais. As relações do conjunto de dados foram obtidas considerando uma significância mínima (1,0) em cada componente, indicada pelo seu autovalor (Tabela 1).

O primeiro componente principal tem o maior autovalor e os componentes seguintes têm autovalores gradativamente menores. As demais componentes (autovalores < 1.0) foram rejeitadas e as componentes principais recalculadas usando o esquema Varimax de Kaiser. Destaca-se que as três primeiras componentes explicam 72.7% da variância total (Figura 3). O resultado da ACP pode ser representado pelos escores das primeiras três componentes principais (PC1 – PC3), visualizadas em 2D (Figura 4), ou ainda no espaço tridimensional em 3D (Figura 5).

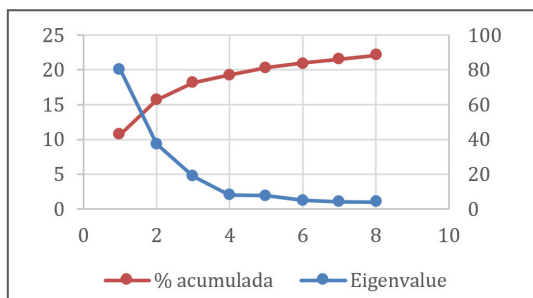
A Tabela 2 resume os autovalores e autovetores em cada uma das principais componentes.

De acordo com os dados expostos, o eixo 1 representa a PC1 com 20,1% da variância (Tabela 1) e maior representação dos autovetores de U, Ce, Tl, Rb, Yb, La, Y, Be, Lu, Th, Tb, Cs, Sn, Bi, Pb, K e Li, altos e negativos (Tabela 2).

TABELA 1: Autovalores da Análise de Componentes Principais.

PC	AUTOVALOR	% ACUMULADA
1	20.097	42.8
2	9.363	62.7
3	4.704	72.7
4	2.04	77
5	1.947	81.2
6	1.26	83.9
7	1.058	86.1
8	1.018	88.3

Fonte: elaborada pelos autores



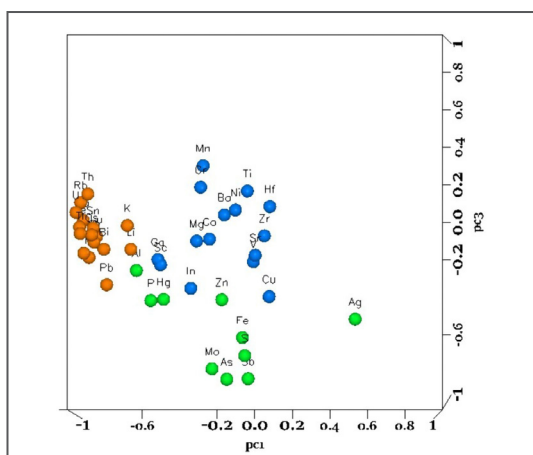
**FIGURA 3 - Autovalores da Análise de Componentes Principais.**  
Fonte: elaborada pelos autores.

O eixo 2 representa a PC2 com 9.3% da variância (Tabela 1) e autovetores altos e positivos com V, Cu, Ga, Sc, Ti, Co, Mg, Zr, Ni, Sr, Hf, Mn, In, Ba e Cr (Tabela 2).

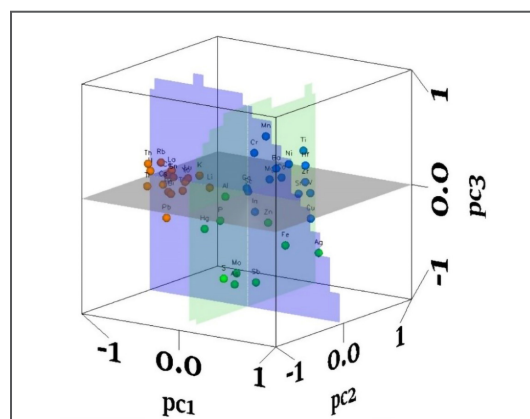
O eixo 3 representa a PC3 com 4.7% da variância e coeficientes de correlação altos e negativos com Fe, Al, Sb, As, Mo, P, Ag, S, Zn e Hg.

Optou-se por omitir as demais componentes em virtude da sua baixa significância e para que este informe pudesse se tornar mais objetivo.

A seguir, apresenta-se a distribuição das principais componentes (PC1 a PC3) na área e uma descrição resumida destas.



**FIGURA 4 - Variáveis representadas pelos escores das três componentes principais em 2D.** Fonte: elaborada pelos autores.



**FIGURA 5 - Variáveis representadas pelos escores das três componentes principais em 3D.** Fonte: elaborada pelos autores.

**TABELA 2: Autovalores e autovetores das componentes principais PC1, PC2 e PC3.**

PC1	LOADINGS	SCORES	PC2	LOADINGS	SCORES	PC3	LOADINGS	SCORES
U	0.912	-0.955	V	0.899	0.948	Fe	0.823	-0.615
Ce	0.876	-0.936	Cu	0.858	0.834	Al	0.814	-0.257
Tl	0.869	-0.932	Ga	0.854	0.739	Sb	0.732	-0.834
Rb	0.866	-0.93	Sc	0.853	0.741	As	0.724	-0.837
Yb	0.853	-0.86	Ti	0.824	0.892	Mo	0.693	-0.781
La	0.84	-0.917	Co	0.797	0.859	P	0.647	-0.417
Y	0.839	-0.858	Mg	0.707	0.782	Ag	0.639	-0.516
Be	0.834	-0.913	Zr	0.625	0.789	S	0.577	-0.711
Lu	0.833	-0.845	Ni	0.602	0.769	Zn	0.525	-0.413
Th	0.796	-0.892	Sr	0.58	0.761	Hg	0.412	-0.411
Tb	0.784	-0.885	Hf	0.571	0.751			
Cs	0.758	-0.871	Mn	0.536	0.678			
Sn	0.744	-0.863	In	0.49	0.611			
Bi	0.649	-0.806	Ba	0.471	0.667			
Pb	0.626	-0.791	Cr	0.359	0.524			
K	0.463	-0.681						
Li	0.438	-0.662						

Fonte: elaborada pelos autores.

■ **PC1** – U, Ce, Tl, Rb, Yb, La, Y, Be, Lu, Th, Tb, Cs, Sn, Bi, Pb, K e Li.

Componente essencialmente litófila, representada por teores naturalmente elevados de U, Tl, Rb, Be, Th, Cs, Sn, K e Li no Norte, em relação ao *background* da área, oriundos do embasamento cristalino; teores de *background* levemente aumentado de Elementos Terras Raras - ETR (Ce, La, Yb, Y, Lu e Tb), tanto no Norte quanto no Sul, e teores possivelmente antrópicos de Bi e Pb nas bacias Tubarão e Duna (Figura 6).

Explicada por litologias predominantemente granitoides, de sieno a monzogranitos, além de milonitos, concentra U, Li, Cs, Sn e Rb nas nascentes do Rio Braço do Norte (Bacia de Tubarão), em ambos os tributários de NW (Anitápolis) e NE (São Bonifácio), de onde se estende

até São Martinho. Somente em Anitápolis destacam-se Th, Be, Tl e os ETR.

Teores possivelmente antrópicos de Bi nas vertentes SW-NE do rio Braço do Norte (Bacia de Tubarão), e de Pb desde as nascentes do Rio Braço do Norte, em Anitápolis e São Bonifácio, assim como próximo a foz do Rio Tubarão, onde chegam também U, Sn, Ce e outros ETR já mais diluídos. O Pb antrópico se destaca ainda na foz da Bacia Urussanga, onde algumas das variáveis naturalmente empobrecidas (Cs, Li) se concentram na foz.

Uma possível origem antrópica para o Bi e o Pb é embasada pelo fato de ambos formarem sulfetos possivelmente presentes nos filões de fluorita, explorados nas bacias de Tubarão e Urussanga. Os teores máximos

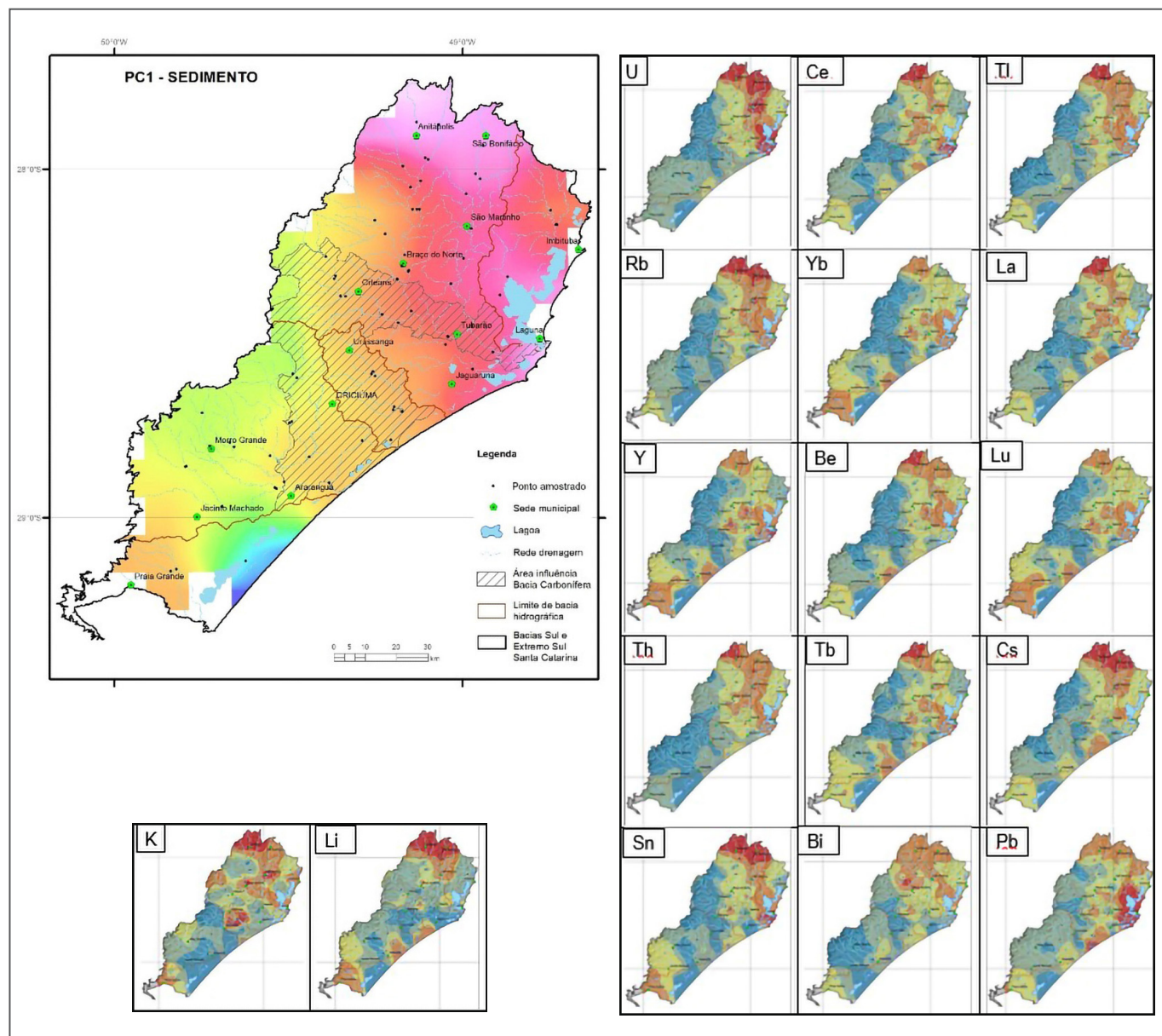


FIGURA 6 - Espacialização da PC1 e dos elementos associados. Fonte: elaborada pelos autores.

identificados nestas bacias se situam cerca de uma ordem de grandeza acima do valor de *background* da área para o Bi, e 5 vezes o valor da mediana para o Pb, o qual se encontra ainda o dobro do limite ambiental.

■ **PC2** – V, Cu, Ga, Sc, Ti, Co, Mg, Zr, Ni, Sr, Hf, Mn, In, Ba e Cr.

Representa influência litófila das rochas básicas no Sul, nas bacias de Mampituba e Araranguá e, secundariamente, das restritas básico-ultrabásicas no Norte, na Bacia de Tubarão. Evidenciam-se ainda enriquecimentos localizados de Ni, In e Ba, nos trechos médios das bacias de Urussanga e Araranguá (Figura 7), que se supõe serem antrópicos, em função das nascentes terem um menor teor de fundo e desses enriquecimentos serem pontuais e à jusante das áreas mineradas.

Teores naturalmente elevados de V, Cu, Ga, Sc, Ti, Co, Mg, Zr, Ni, Mn, In e Cr, em relação ao *background*,

ocorrem desde as nascentes nos basaltos toleíticos da Serra Geral (bacias Mampituba e Araranguá). Em virtude da Drenagem Ácida de Mina (DAM), parte desses metais são localmente lixiviados e se encontram levemente concentrados no trecho médio (V, Cu, Ga, Sc, Ti, Mg), à jusante das áreas mineradas (Treviso e Siderópolis), assim como na foz do rio Araranguá (Co, Ni, In). Outros, simplesmente desaparecem (Mn), podendo vir a serem encontrados nas lagoas à jusante, que não foram amostradas.

A Bacia Urussanga, apesar de ter ocorrências de rochas básicas, se encontra depletada quase todos os elementos de proveniência básica e ultrabásica (V, Cu, Ga, Sc, Ti, Co, Ni, Mg, Cr), havendo enriquecimentos de Zr, Hf, In e Cr na foz.

No extremo Norte da Bacia Tubarão, a restrita ocorrência alcalina básico-ultrabásica de Anitápolis justifica a presença de valores extremos de Cr e Mg.

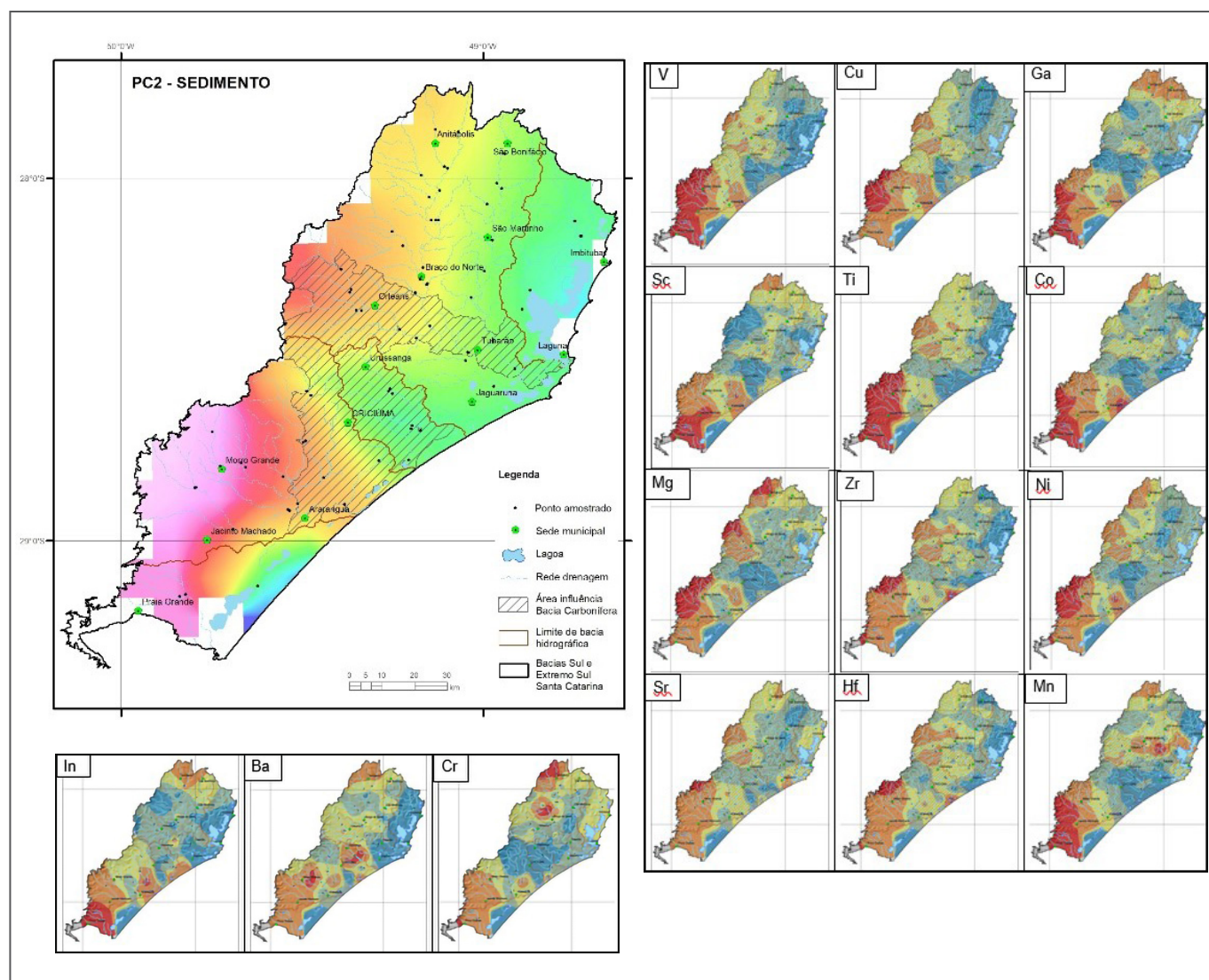


FIGURA 7 - Espacialização da PC2 e dos elementos associados. Fonte: elaborada pelos autores.

**PC3 – Fe, Al, Sb, As, Mo, P, Ag, S, Zn e Hg.**

Resultante da influência antrópica da mineração de carvão no Centro-Leste, na Bacia de Urussanga e parte das bacias de Araranguá e Tubarão (Figura 8).

Em virtude do impacto ambiental causado pela DAM, se observa o enriquecimento de elementos com provável origem antrópica (Sb, As, Ag, Hg) que, caso não houvesse a mineração, não se destacariam na paisagem geoquímica. São marcantes o enriquecimento de Fe e S em toda a área afetada pela DAM, a depleção de alguns elementos nas áreas mineradas (Al, P) e o seu aparecimento à jusante, nos cursos médio (P) e inferior, na foz do rio Araranguá (Al, Mo, Zn), juntamente com aqueles que se encontraram enriquecidos em toda a área afetada pela DAM (Fe, S, Sb, As, Ag, Hg).

Na Bacia de Mampituba, nota-se que os teores de Fe, Al e Zn são naturalmente elevados, assim como nas nascentes da Bacia Araranguá, que possui enriquecimentos antrópicos de P a jusante de Treviso e Siderópolis, neste caso, possivelmente oriundo da ocupação urbana.

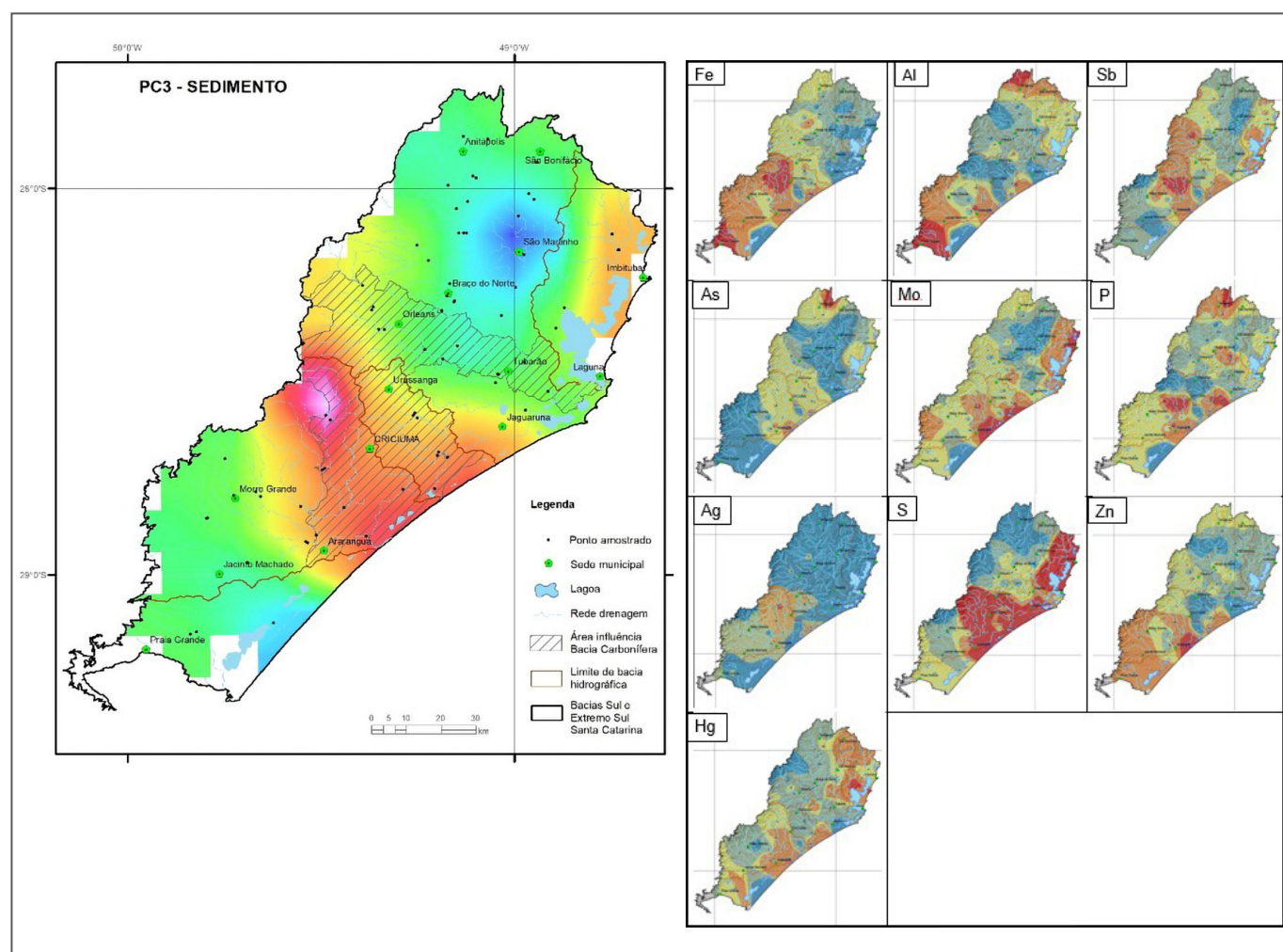
Na Bacia Urussanga, de menor extensão e totalmente circunscrita na área impactada, a maioria dos elementos se concentram na foz (Fe, Al, Sb, As, Mo, Ag, S, Zn, Hg).

Nas nascentes da Bacia de Tubarão observam-se altos no relevo geoquímico de Al, As e P em Anitápolis, e de Hg em São Bonifácio e São Martinho; e ainda de P, possivelmente antrópico, à jusante de Braço do Norte; além de S e Sb na foz do Rio Tubarão, ocupada pela rizicultura.

E a Bacia Duna, amplamente enriquecida em S, constitui uma planície lagunar de águas salobras, com enriquecimento moderado e possivelmente antrópico de Hg e Sb.

**DISCUSSÃO**

As diferenças marcantes no substrato geoquímico entre as regiões Extremo-Sul e Sul de Santa Catarina, de predominância de rochas plutônicas ácidas nas bacias do Sul (bacia de Tubarão), representadas pela PC1, e de rochas vulcânicas básicas no Extremo-Sul (bacias de



**FIGURA 8 -** Espacialização da PC3 e dos elementos associados. Fonte: elaborada pelos autores.



Mampituba e Araranguá), representadas pela PC2, se refletem na Bacia de Urussanga, onde ambas influências no que se refere à geologia, além do impacto da mineração e da ocupação urbana, representadas pela PC3, permitem considerá-la como uma área balizadora para o comportamento geoquímico da região.

Nela, predominam as unidades da Bacia do Paraná, e o impacto da atividade extrativa se manifesta lixiviando a maioria dos metais e outros elementos químicos, resultando um relevo geoquímico depletado.

O conteúdo de Elementos Terras-Raras (ETR), por outro lado, apresenta teores de *background* levemente aumentados tanto nos granitoides do Norte quanto nas básicas do Sul, já que o conteúdo de ETR é associado à mineralogia acessória, coincidente neste caso, devido à similaridade das afinidades geoquímicas dos termos vulcânicos básicos (alcalina) e plutônicos ácidos (cálcico-alcalina e alcalina). Os minerais acessórios que concentram ETR em ambos os termos são: apatita e allanita. Outros minerais acessórios presentes em ambos os tipos, porém sem ETR, são: zircão, magnetita e a titanita.

A apatita ocorre como mineral acessório tanto em rochas básicas (disseminado), quanto nos granitoides (concentrados em pegmatitos e hidrotermalismo).

Devido à baixa resistência à abrasão, diversos minerais podem ser atacados pela DAM, entre eles: gipso, calcita, fluorita, apatita e feldspatos, para citar apenas aqueles que resistem menos do que o quartzo à abrasão ou intemperismo, seja ele físico ou químico. A pirita, principal mineral responsável pelo processo de acidificação das águas de minas, possui uma resistência intermediária e semelhante ao quartzo na Escala de Dureza Mohs (quantifica a dureza dos minerais, ou a sua resistência). Deste modo, fosfatos como a apatita e estes outros minerais menos resistentes podem ser dissolvidos no meio ácido oriundo de DAM, e permanecer amplamente distribuídos em áreas isentas da mineração. Isto explica a ampla distribuição de ETR em teores de *background* tanto no Norte quanto no Sul da área, e depletados no Centro-Leste, área afetada pela DAM.

De fato, o que se verifica tanto nas principais componentes quanto nos mapas elementares, é um baixo relevo geoquímico na área afetada pela DAM, especialmente de elementos considerados naturais, por fazerem parte da composição química do substrato geológico básico (Fe, Mn, Cu, Ti, Co, Mg, Ni, entre outros) e ácido (Ce, La, Cs, Li, Zr). Este fato não pode ser considerado benéfico pois, em contrapartida, há o enriquecimento de elementos considerados antrópicos, que normalmente ocorreriam em quantidades muito pequenas, mas em virtude da DAM se sobressaem e tendem a ser muito nocivos (Sb, As, Zn, Pb, Bi, Hg).

## COMENTÁRIOS FINAIS

Da ordenação de variáveis em componentes principais, chega-se ao resultado de duas dessas componentes (PC1 e PC2) essencialmente litófilas, representando os teores naturalmente elevados e relativos às rochas ácidas e básicas presentes nas regiões Norte e Sul da área de estudo, respectivamente.

Não é por acaso que os elementos naturalmente presentes nas fases minerais menos resistentes são lixiviados da área impactada pela DAM, e que os elementos mais nocivos, menos móveis e potencialmente tóxicos são concentrados na região, conforme evidenciado na porção Central da área, representada pela PC3. É possível perceber o impacto da DAM nos sedimentos de fundo, desde à jusante das áreas de mineração até a foz dos rios principais, tanto na Bacia de Urussanga, quanto nas porções norte da Bacia de Araranguá e sul da Bacia de Tubarão.

Como estes rios principais deságuam em lagoas da Planície Costeira (que não foram amostradas), ou próximo delas, nestes locais podem estar concentrados os diversos elementos que foram lixiviados, hipótese que precisaria ser checada em trabalhos ulteriores.

## REFERÊNCIAS

- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa geológico do estado de Santa Catarina. Porto Alegre: CPRM, 2014. Escala 1:500.000. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17996>. Acesso em: 07 dez. 2020.
- GEOSOFT. **Tutorial Geosoft Montaj Geochemistry**. Versão 7.1. [s.l.]: GEOSOFT, 2010.
- DARDENNE, M. A.; SAVI, C.N. Geologia e geoquímica dos filões de fluorita Segunda Linha Torrens e Cocal, SC. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.14, n. 2, p. 120-127, 1984.
- KAHN, H. **Caracterização mineralógica e tecnológica da jazida de fosfato do maciço alcalino de Anitápolis, SC**. 1988. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.
- JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY - JICA. **The feasibility study on recuperation of mined-out áreas in the South region of Santa Catarina in the Federative Republic of Brazil**. Japan: JICA, 1998. (Technical Annex, Section I, II, III. Sector Studies. Jan/1998, Japan. Mitsubishi Materials Corporation, Chioda-Dames & Moore Co. Ltd.).
- LICHT, O. B. **Prospecção Geoquímica: princípios, técnicas e métodos**. Rio de Janeiro: CPRM. 236 p. 1998.
- MARTINS FILHO, P. J. **Aplicação de técnicas de geologia e geoquímica na região de Ibaré/RS e no filão Cocal de fluorita/SC**. 2004. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS. 2004.

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

PICCIRILLO *et al.* Continental flood volcanism from Paraná Basin (Brazil). In: Macdougall, J.D.; ed. **Continental Flood Basalts**. Dordrecht: Kluwer, 1988. p. 195-235, 1988.

RAURET, G. Extraction procedures for the determination of heavy metals in contaminated soil and sediment **Talanta**, v.46, n.3, p.449-455, jul. 1998.

REIMANN, C.; FILZMOSER, P.; GARRET, R.G. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. **Science of the Total Environment** 346: 1-16. 2005.

SILVA, M. A. S.; LEITE, S.R. **Criciúma: folha SH.22-X-B:** estado de Santa Catarina. Rio de Janeiro: CPRM, 2000. Escala 1:250.000. Projeto de Mapeamento Geológico, Metalogenético Sistemático; Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Method 3051A – Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils.** Revision 1. Washington, DC, 2007. 30p. Disponível em: <http://www.epa.gov/epawaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3051a.pdf>. Acesso em: 10.09.2015.



## INFORME TÉCNICO-CIENTÍFICO DE PREVENÇÃO DE DESASTRES E ORDENAMENTO TERRITORIAL

V.2, N.2, set. 2021  
ISSN 2764-2054

Publicação on-line seriada do Serviço Geológico do Brasil – CPRM  
Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial  
Departamento de Gestão Territorial – DEGET

Disponível em: [rigeo.cprm.gov.br](http://rigeo.cprm.gov.br)

Serviço Geológico do Brasil – CPRM  
Av. Pasteur, 404 Urca - Rio de Janeiro - RJ - BRASIL  
CEP: 22.290-255

Telefone:(21) 2295-0032

Contatos: [seus@cprm.gov.br](mailto:seus@cprm.gov.br) / [solicita.deget@cprm.gov.br](mailto:solicita.deget@cprm.gov.br)

### COMISSÃO DE PUBLICAÇÃO

**Diretora de Hidrologia e Gestão Territorial:** Alice Silva de Castilho

**Departamento de Gestão Territorial:** Diogo Rodrigues da Silva

**Corpo editorial:** Carlos Schobbenhaus Filho, Cassio Roberto Silva, Maria Adelaide Mansini Maia, Maria Angélica Barreto, Sandra Fernandes da Silva, Diogo Rodrigues da Silva.

**Editor:** Eduardo Paim Viglio

**Corpo de revisores:** Aline Costa Nogueira, André Luis Invernizzi, Débora Lamberty, Douglas da Silva Cabral, Heródoto Góes, Iris Celeste Nascimento Bandeira, Ivan Bispo de Oliveira Filho, José Luiz Marmos, Júlio César Lana, Marcelo Eduardo Dantas, Marceley Ferreira Machado, Melissa Franzen, Michele Silva Santana, Patrícia da Fonseca Almeida, Pedro Augusto dos Santos Pfaltzgraff, Raimundo Almir Costa da Conceição, Rogério Valença Ferreira, Sheila Gatinho Teixeira, Thiago Dutra dos Santos e Tiago Antonelli.

**Revisão de texto:** Ana Lúcia Borges Fortes

**Normalização bibliográfica:** Rede de Bibliotecas Ametista

**Editoração eletrônica:** Cristiane de Lima Pereira