

GEOLOGIA, AMBIENTE e SUSTENTABILIDADE



Fabricia Benda de Oliveira

Calvin da Silva Candotti

Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira

Fabricia Benda de Oliveira
Calvin da Silva Candotti
Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira
(Organizadores)

GEOLOGIA, AMBIENTE
E
SUSTENTABILIDADE
VOLUME I

CAUFES
2023

CCENS-UFES - Centro de Exatas, Naturais e da Saúde, Universidade Federal do Espírito Santo,
Alto Universitário, s/n, Caixa Postal: 16, Guararema, Alegre-ES Telefax: (28) 3552- 8687,
www.alegre.ufes.br

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

G342 **Geologia, ambiente e sustentabilidade [recurso eletrônico] /**
Fabricia Benda de Oliveira, Calvin da Silva Candotti, Carlos
Henrique Rodrigues de Oliveira, Organizadores. – Dados
eletrônicos. - Alegre, ES : CAUFES, 2023.
215 p.: il. (Geologia, ambiente e sustentabilidade; v.1)

ISBN: 978-65-86981-37-7

Modo de acesso: <https://geologia.ufes.br/e-book>

1. Petrografia. 2. Geoquímica. 3. Isótopos. 4. Energia eólica.
5. Lavra. 6. Rochagem. I. Oliveira, Fabricia Benda de, 1978-. II.
Candotti, Calvin da Silva, 1985-. III. Oliveira, Carlos Henrique
Rodrigues de, 1980-.

CDU: 551.1/4

Elaborado por Manuela Barbosa Garcia – CRB-6 ES-000980/O

Os textos apresentados nesse livro são de inteira responsabilidade dos autores. Os organizadores não se responsabilizam pela revisão ortográfica e gramatical dos trabalhos apresentados.

REITOR – UFES

PAULO SÉRGIO DE PAULA VARGAS

DIRETOR DO CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, NATURAIS E DA SAÚDE - UFES

TAÍS CRISTINA BASTOS SOARES

ORGANIZADORES DESSA OBRA

FABRICIA BENDA DE OLIVEIRA

CALVIN DA SILVA CANDOTTI

CARLOS HENRIQUE RODRIGUES DE OLIVEIRA

APRESENTAÇÃO

A produção deste trabalho é independente e surgiu da ideia e colaboração de professores, alunos e ex-alunos do curso de Geologia do Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, da Universidade Federal do Espírito Santo. Estão contidos neste livro 6 trabalhos apresentados na forma de capítulos e que abrangem temas relacionados a Geologia, Meio ambiente e Sustentabilidade. O material contido nesta obra servirá de auxílio para estudantes, professores e profissionais da área das geociências em seus trabalhos e pesquisas.

LISTA DE ORGANIZADORES

Fabricia Benda de Oliveira. Professora do Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo / Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, Alegre, ES, e-mail: fabricia.oliveira@ufes.br

Calvin da Silva Candotti. Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Agricultura nos Trópicos Úmidos, Instituto Nacional de Pesquisas na Amazônia, Manaus, AM, e-mail: calvindasilvacandotti@gmail.com

Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira. Professor do Instituto Federal do Espírito Santo /campus de Alegre, ES, e-mail: carlos.oliveira@ifes.edu.br

LISTA DE AUTORES

ADAM BARROS FERNANDES
ADIMIR FERNANDO REZENDE
AIRTON BARATA
ARIADNE MARRA DE SOUZA
CALVIN DA SILVA CANDOTTI
FABRICIA BENDA DE OLIVEIRA
HERNANI MOTA DE LIMA
IAGO MATEUS LOPES MACÊDO
IURI VIANA BRANDI
JENESCA FLORENCIO VICENTE DE LIMA
LUIZA DE ALMEIDA VAILLANT
MARCELO ROBERTO BARBOSA
MARIANA DA SILVA TRIGO
MATHEUS SERRI MOULIM DE OLIVEIRA
MAURO CESAR GERALDES
MIRNA APARECIDA NEVES
RAFAEL GUIMARÃES DE PAULA
RENATO FERREIRA MIRANDA
RENZO DIAS RODRIGUES
SONIA SENA ALFAIA
TOMÁS CORRÊA
VANESSA MONTEIRO PINTO
WILLIAM MARCOS PINTO

Sumário

Capítulo 1.....	11
Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuaí, Espírito Santo	
<i>Renzo Dias Rodrigues; Ariadne Marra de Souza; Mauro Cesar Geraldtes; Iago Mateus Lopes Macêdo</i>	
Capítulo 2.....	49
Isótopos Estáveis nas Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim - ES	
<i>Mariana da Silva Trigo; Matheus Serri Moulim de Oliveira; Renato Ferreira Miranda; Mirna Aparecida Neves</i>	
Capítulo 3.....	67
Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD	
<i>Willian Marcos Pinto; Jenesca Florencio Vicente de Lima</i>	
Capítulo 4.....	121
A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma Revisão	
<i>Luiza de Almeida Vaillant</i>	
Capítulo 5.....	171
Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás – PA	
<i>Iuri Viana Brandi; Marcelo Roberto Barbosa; Airton Barata; Rafael Guimarães de Paula; Tomás Corrêa; Adimir Fernando Rezende; Hernani Mota de Lima; Adam Barros Fernandes</i>	
Capítulo 6.....	195
A rochagem como alternativa para agrossistemas tropicais	
<i>Calvin da Silva Candotti; Sônia Sena Alfaia; Fabricia Benda de Oliveira; Vanessa Monteiro Pinto</i>	

Capítulo 1

**Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova,
Orógeno Araçuaí, Espírito Santo**

*Renzo Dias Rodrigues¹; Ariadne Marra de Souza¹; Mauro Cesar Geraldes²; Iago Mateus
Lopes Macêdo²*

RESUMO. Os extensos volumes de magmas produzidos durante o estágio pós-colisional do Orógeno Araçuaí deram origem a diversas associações de rochas ígneas que vai de membros de composição puramente félsicas, marcada por uma variedade de granitos, até membros de composição extremamente máfica como olivina-gabros e noritos. A Região das Montanhas Capixabas é formada por conjuntos desses corpos ígneos que configuram a paisagem com belezas cênicas de inúmeros picos, afloramentos rochosos, cachoeiras, vales, escarpas e pontões constituindo parte da riqueza e beleza local. O Complexo Intrusivo de Venda Nova é um desses casos que, além de influenciar fortemente na economia das comunidades locais, é composto por uma série de rochas e estruturas magmáticas que podem servir de itinerário para diversos estudos acadêmicos. O espaço em que se dispôs a área aflorante é representado por evidências de sucessões de eventos magmáticos que marcaram a evolução do Orógeno Araçuaí. As rochas encaixantes são representadas por rochas paraderivadas e ortognaisses. A associação ígnea constituinte da área que pode ser melhor visualizada em campo inclui Granitos, Sienomonzonitos, Charnockitos, Dioritos, Gabros, Noritos e toda a gama de variação textural e composicional que pode ocorrer entre esses grupos principais, além de diques e pegmatitos presentes em diferentes partes da área. A assembleia mineral comum as rochas félsicas são feldspatos, biotita, quartzo e nas máficas plagioclásio, piroxênio, anfibólio, hornblenda e biotita, além de inclusões de apatita, zircão e alguns opacos que são comuns a todos. Registros de processos magmáticos que ocorrem com maior frequência são vistos em estruturas em rede, variedade de enclaves e xenólitos, acamamento magmático, foliação de fluxo magmático, deformação das encaixantes próximas a borda, estruturas de fluxo tardio e de contatos bruscos, **¹Departamento de Geologia da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) – Alegre, ES, Brasil;**

²Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuaí, Espírito Santo

gradual ou de mistura de magmas. A química para identificação de elementos maiores e menores desses grupos principais, indica pelo menos três fontes diferentes. Assim a configuração da área foi marcada pela injeção de múltiplos pulsos de magmas em curto espaço de tempo, com a contribuição de diferentes fontes em vários momentos durante a sua estruturação que assinalaram toda a assembleia litológica e os produtos gerados desse magmatismo associado ao orógeno.

PALAVRAS-CHAVE. Orógeno Araçuaí; Magmatismo; Complexo Intrusivo de Venda Nova.

INTRODUÇÃO

O estado do Espírito Santo, está localizado na região sudeste do Brasil e é contemplado por diversos corpos ígneos intrusivos que configuram a paisagem devido a sua geomorfologia que influencia diretamente na economia e na qualidade de vida das comunidades locais, devido a concentração de uma gama de atrativos geoturísticos, agroturísticos e bens minerais que são proporcionados pela geologia local, constituindo-se parte do polo de referência mundial na extração de rochas ornamentais para mercado interno e externo, principalmente no fornecimento de granitos cinzas, amarelos, claros, esverdeados e escuros. Além de numerosos pegmatitos portadores de bens minerais como berilos, turmalina, topázios, quartzos, feldspatos, biotita, muscovita, argilominerais, minerais industriais e outros.

Esses corpos ígneos intrusivos constituem a porção setentrional do Sistema Orogênico da Província da Mantiqueira na parte do domínio interno do Orógeno Araçuaí (OA) onde afloram uma enorme variedade de conjuntos de rochas ígneas. A evolução tectônica do OA é marcada por extensa produção e colocação de corpos magmáticos associados aos estágios de colisão, definidos pela literatura como: Pré-Colisional (630-580 Ma), Sin-Colisional (580-560 Ma), Tardi-colisional (560-530 Ma) e Pós-Colisional (530-490 Ma) que deram origem a todo o conjunto de associação de rochas magmáticas geradas durante esses eventos, com destaque para as Supersuíte G4 e G5, e as unidades associadas que correspondem às da Supersuíte G1, G2 e G3, que se assemelham as unidades presentes dentro da área de estudo (WIEDEMANN-LEONARDOS et al. 2000; HEILBRON et al., 2004; PEDROSA-SOARES et al. 2007).

A quantidade, diversidade e proximidade de corpos ígneos intrusivos pré-sin-tardi a pós-colisionais presente no estado do Espírito Santo é um contexto bastante interessante e específico a ser estudado. Sendo assim, o Complexo Intrusivo de Venda Nova (CIVN) é o propósito deste trabalho. As informações que serão apresentadas são referentes a metodologia de mapeamento

geológico clássica e de análise exploratória, que consiste na contextualização regional da área de estudo através de revisão bibliográfica, técnicas de geoprocessamento, interpretação de imagens geológicas e coleta de dados de campo como descrição de estruturas e feições de afloramentos, petrografia macroscópica e amostragem das unidades representativas, para análises exploratória, que contam com a descrição petrografia microscópica e química de elementos maiores e menores das unidades. Com isso, buscou-se a investigação e aquisição de dados base das unidades litológicas da área e dessa forma contribuir, significativamente, para estudos mais detalhados posteriores, visando compreensão da gênese e evolução do magmatismo associado ao Orógeno Araçuaí.

LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

Na América do Sul, a região Sudeste do Brasil é arquetizada por diversos corpos ígneos intrusivos pré-sin-tardi a pós-colisional. O estado do Espírito Santo é muito conhecido pelo seu relevo montanhoso e sua geomorfologia, na parte centro-sul do estado aflora o CIVN situado entre os municípios de Venda Nova do Imigrante, Afonso Cláudio e Castelo, contemplando uma área aflorante maior que 75km², a principal rodovia que dá acesso a essa área, partindo da capital Vitória, é a Br-262 onde se percorre aproximadamente 106 km até chegar no município sede e depois segue-se por estradas urbanas e rurais até o acesso a borda do corpo (Figura 1.).

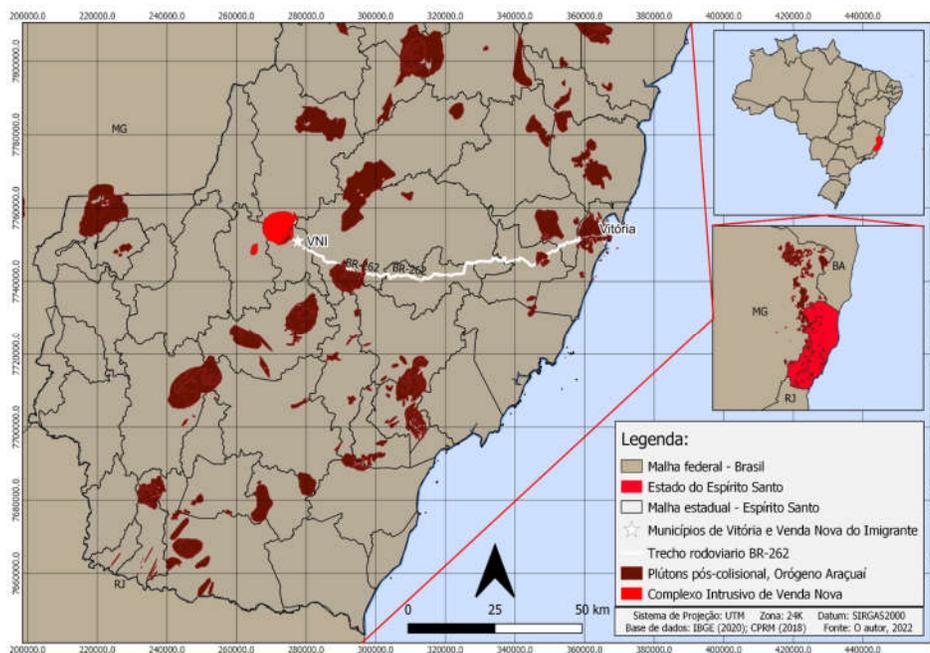


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo (IBGE, 2010; CPRM, 2018).

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuai, Espírito Santo

Em destaque vermelho a localização da área de estudo e, nas proximidades, os corpos ígneos vizinhos que compõem o contexto pós-colisional do OA. Com isso, uma breve revisão bibliográfica a seguir tem o intuito de contextualizar a geologia regional e local.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão será apresentada neste capítulo para contextualização geológica da área de estudo, contemplando parte de trabalhos anteriores relacionados ao contexto geotectônico do Orógeno Araçuai e o seu magmatismo associado, com ênfase ao estágio pós-colisional do orógeno. Em conjunto, será apresentado uma síntese de trabalhos que tiveram como foco a área de estudo, o Complexo Intrusivo de Venda Nova.

A Província Mantiqueira é uma faixa de arco continental que se estende-se por mais de 3000km sentido NNE-SSW, ao longo da costa atlântica, envolvendo parte do Uruguai até o sul da Bahia no Brasil, totalizando uma área de cerca de 700.000km², caracterizado por uma série de sistemas orogênicos Neoproterozóico-Cambriano (880-480Ma), onde estão incorporados os conjuntos de orógenos conhecidos como Araçuai, Ribeira, Dom Feliciano e São Gabriel. A configuração atual para a Faixa Araçuai está próxima ao paralelo 21°S, na ponta sudeste do Cráton São Francisco com vergências de *trends* de estruturas lineares para NNE ao norte e para NE ao sul com transição para a Faixa Ribeira (Figura 2.) (PEDROSA-SOARES e WIEDEMANN-LEONARDOS, 2000; HEILBRON et al., 2004).

O Orógeno Araçuai foi inicialmente denominado de Faixa Araçuai por Almeida (1977), e posteriormente foi atribuída a denominação de Orógeno Araçuai-Congo Ocidental, sendo que englobava parte da faixa do Congo Ocidental na África. A porção brasileira compreende aproximadamente 65% da área desmembrada. O conjunto se dispõe na forma de ferradura, com ramificações que bordejam as zonas cratônicas ao seu interior, e com estruturas marcando um caminho de fechamento, que resultaram em um processo de confinamento lateral e superior causada pela colisão dos crátons São Francisco e Congo, onde a formação de uma ponte cratônica proporcionou o confinamento nas proximidades do contato entre as regiões da Bahia e Gabão durante a tafrogênese Toniana até a abertura do Atlântico Sul (PEDROSA-SOARES et al.. 2007; ALKIMIN et al. 2007).

Diante deste contexto, o Orógeno Araçuai expõe uma conjuntura de aspectos tectônicos que podem ser divididos em dois grandes domínios principais: externo e interno. O domínio externo foi caracterizado pelo regime de empurrão tectônico contra o cráton São Francisco, com

metamorfismo das rochas supracrustais nas fácies xisto verde a anfíbolito inferior e ausência de magmatismo orogênico. Já o domínio interno, representa o núcleo metamórfico anatético do orógeno que produziu extensas faixas de magmatismo, dando origem as suítes graníticas e complexos paragneisses, sendo subdividido em dois subdomínios principais, a norte onde a zona anatética é pouco expressiva e a sul em transição com a Faixa Ribeira onde são expostas extensas zonas de cisalhamentos que proporcionaram o alojamento de uma variedade de rochas na fácies granulito e os plútons graníticos inversamente zonados (PEDROSA-SOARES e WIEDEMANN-LEONARDOS, 2000; HEILBRON et al. 2004; ALKIMIN et al. 2006).

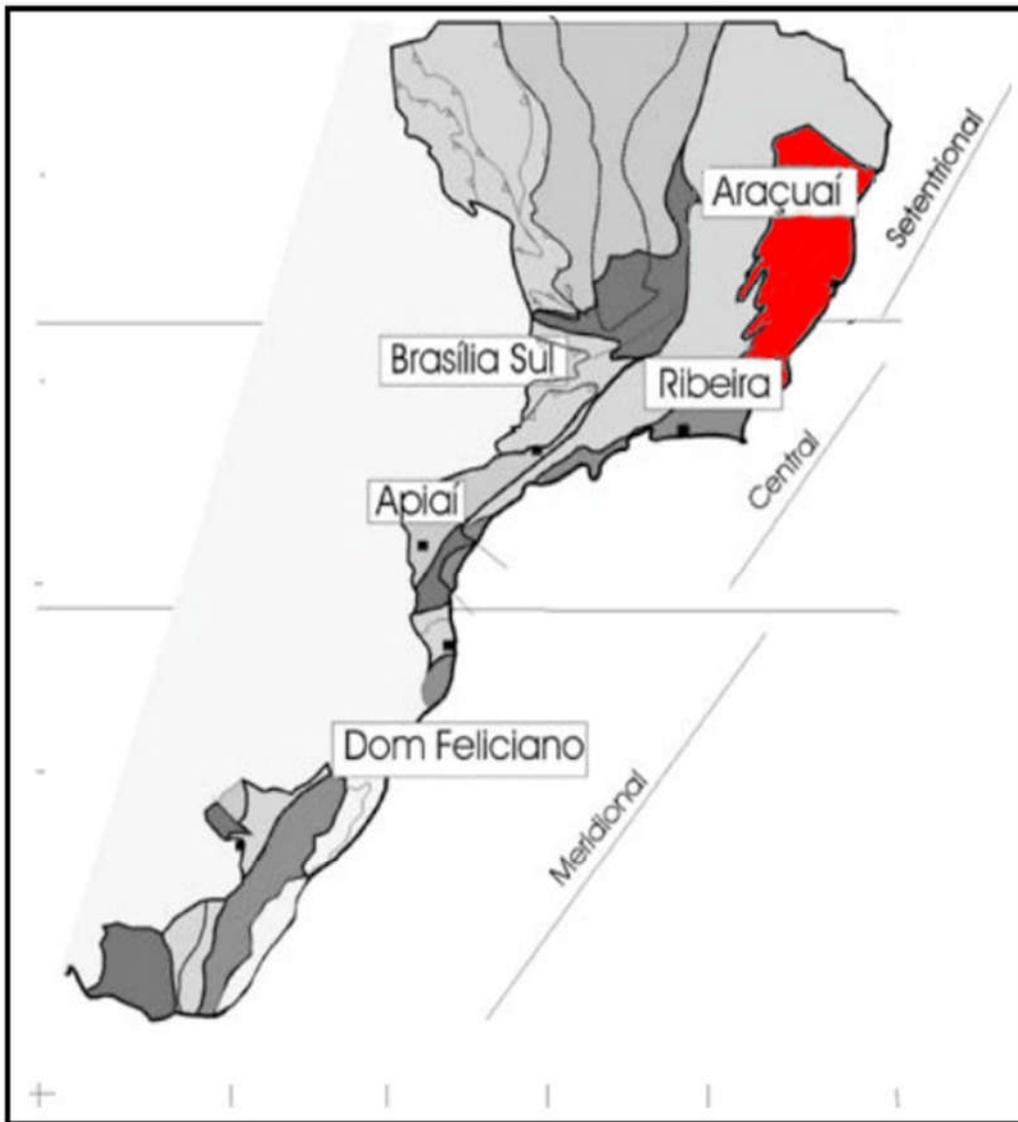


Figura 2. Província Mantiqueira e seus principais constituintes. Em destaque o Orógeno Araçuai (Modificado de Heilbron et al., (2004).

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuai, Espírito Santo

Os episódios magmáticos que acompanham a evolução do orógeno foram responsáveis pelas famosas granitogêneses Neoproterozóicas-Cambrianas, definidos de acordo com correlações de características crono-espacial, geoquímica, petrografia e estrutural, assinaturas de elementos e isótopos, em: magmatismo pré-colisional (~ 630-580 Ma), sin-colisional (~ 580-560 Ma), tardi-colisional (560-530 Ma) e pós-colisional (530-490 Ma) que deram origem às associações ígneas aflorantes no estado do Espírito Santo, denominadas em Supersuítas G1, G2, G3, G4 e G5 e todo o conjunto associado (ALKMIN et al. 2006, 2017; DE CAMPOS et al. 2004, 2016; PEDROSA-SOARES et al. 2007; WIEDEMANN-LEONARDOS et al. 2000, 2002).

Os momentos iniciais dessa produção dos magmas nos estágios pré-colisional a sin-colisional, está relacionado tectonicamente a um período acrescionário registrado durante a transição de margem continental passiva para margem continental ativa, resultando no processo de subducção forçada da litosfera oceânica formando o arco magmático cálcio-alcalino conhecido como Rio Doce. Esse magmatismo foi definido como Supersuíte G1 (~ 630-580 Ma), e sua ocorrência se deu em formas de batólitos e *stocks* do tipo I, onde afloram rochas de composição que variam de tonalitos a granodioritos e, em menor quantidade, granitos e dioritos, geralmente com matriz orientada marcada por cristais de biotita, às vezes milonitizada com augens de k-feldspato. A origem é dada pela fusão parcial de várias fontes misturadas (DE CAMPOS et al. 2004; PEDROSA-SOARES et al. 2007).

Estendendo esse magmatismo por todas as partes, o estágio sin-colisional, também teve contribuições na geração da Supersuíte G2 (~ 580-560 Ma) que são magmas alojados na forma de batólitos e *stocks* com rochas do tipo S onde afloram granitos peraluminosos autóctones e para-autóctones produzidos durante a fusão parcial de empilhamentos de depósitos sedimentares, dando origem as granadas e biotitas presentes em sua estrutura, além de cordierita e sillimanita com acessórios comum. Podendo estar muito deformados, até migmatizados de forma in-situ que são a origem de grandes volumes dos famosos diatexitos (PEDROSA-SOARES e WIEDEMANN-LEONARDOS, 2000; ALKMIN et al., 2007)

Esses magmas sofrem um intenso aumento no gradiente de metamorfismo causando deformação e fusão parcial durante o estágio tardi-colisional, sendo os principais responsáveis pelo magmatismo da Supersuíte G3 (~ 560-530 Ma). Com o avanço dos estágios finais da colisão tem-se a diminuição dos gradiente de metamorfismo por uma mudança no regime tectônico tangencial e pela produção de magmatismo da Supersuíte G3, que foi dividido em dois grandes grupos: 1) G3-S que são representados por rochas associadas a Supersuíte G2 encontradas na forma de pequenos plutons compostos por leucogranitos e granitos subalcalinos a peraluminosos

e; o grupo 2) G3-I que também é representado por plútons elípticos intrudidos sobre zonas de cisalhamentos oblíquas que afloram rochas de composição granítica a granodiorítica do tipo I, cálcio alcalinas de alto K gerados no final do estágio sin-colisional. (PEDROSA-SOARES et al., 2001; WIEDEMANN-LEONARDO et al., 2000, 2002)

Os resultados finais deste evento, como uma mudança drástica no regime tectônico, tem-se com o colapso extensional do orógeno, estágio pós colisional (~530-490 Ma), responsável pela produção magmática característica das Supersuítes G4 e G5. As rochas da Supersuíte G4 afloram, principalmente, na forma de plutons zonados com núcleo e raiz composto por biotita granito, e leucogranitos hospedeiros de pegmatitos portadores de minerais-gema. Esses corpos são caracterizados por serem descritos como uma parte contemporânea e alóctone ao magmatismo G3, que teria se alojado em níveis de crosta superiores (DE CAMPOS et al. 2004, 2016; PEDROSA-SOARES et al. 2001, 2007, 2011; WIEDEMANN-LEONARDOS et al. 2000).

Na porção sul do orógeno Araçuaí (Figura 4), a Supersuíte G5 é representada por pequenos plútons de zoneamento inverso, compostos principalmente de rochas graníticas a charnockíticas nas bordas e rochas gabro-noríticas nos núcleos, e extensas feições de mistura de magma entre eles (DE CAMPOS et al., 2004, 2016). Esse tipo de magmatismo é evidenciado em vários corpos ígneos aflorantes na região Sul e Centro Sul do Espírito Santo, como exemplo estão: Venda Nova, Afonso Claudio, Forno Grande, Pedra Azul, Santa Angélica, Mimoso do Sul, Conceição de Muqui, Rio Novo do Sul e outros. Apesar de apresentarem características gerais muito semelhantes, esses corpos possuem aspectos diferentes e peculiares (WIEDEMANN-LEONARDOS et al.2000; DE CAMPOS et al. 2016).

Corpos com zoneamentos composicionais concêntricos são comuns em regime pós-colisional e foram caracterizados por séries de processos magmáticos de diferenciação, contaminação e mistura. O transporte desses magmas foi na forma de diápiros ou intrusões, ocorrendo por meio de falhas dúcteis ou rúpteis e zonas de cisalhamentos servindo de canal de transporte para esses corpos recorrentes ao Orógeno Araçuaí. (WIEDEMANN-LEONARDOS et al. 2000; PEDROSA-SOARES et al. 2007).

O Complexo Intrusivo de Venda Nova (Figura 5) é um exemplo peculiar, localizado na porção centro-sul do Espírito Santo, com uma área aflorante maior que 75km², representado por uma estrutura de forma elíptica alojada sobre rochas encaixantes paraderivadas e ortognaisses, é caracterizado pelo magmatismo bimodal com zonamento inverso, composto por um núcleo arrasado de composição gabro-norito envolvido por rochas de composição sieno- a monzonitos com altos topográficos nas bordas, com charnockitos e noritos nas bordas oeste, sul, sudeste e *stocks* de granitos distribuídos pela área. O contato entre as litologias do corpo é

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuai, Espírito Santo

predominantemente dúctil e gradacional, sugerindo a intrusão contemporânea de diferentes magmas. (PETRICK, 1987; MENDES, 1996; LUDKA et al. 1998; MENDES e CAMPOS, 2012; BELLON, 2021).

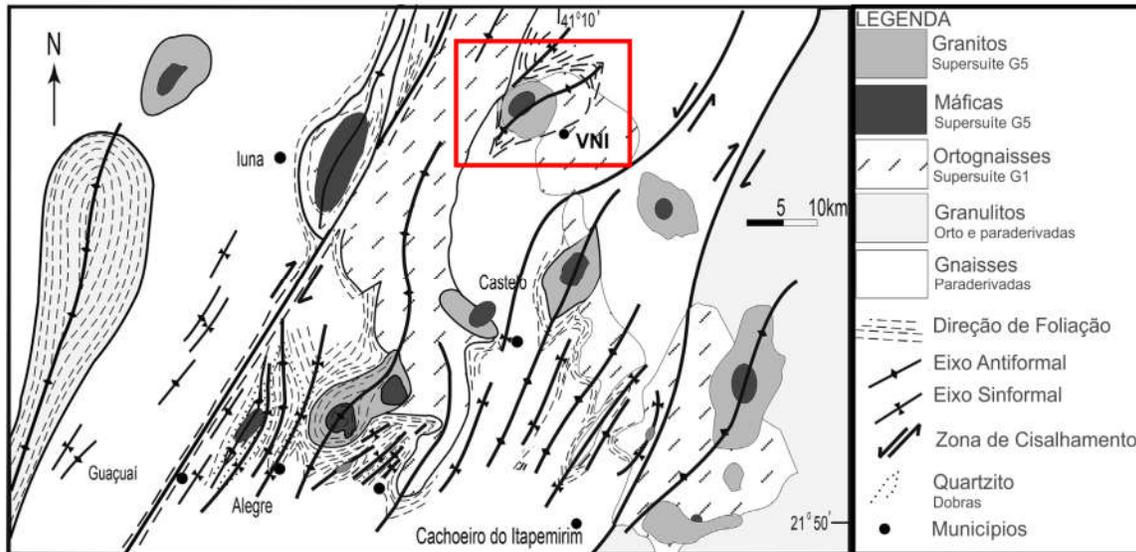


Figura 4. Disposição das Suítes Graníticas e unidades associadas no estado do Espírito Santo (Modificado de Wiedemann et al., 2002; De Campos et al., 2016).

O Complexo Intrusivo de Venda Nova (Figura 5) é um exemplo peculiar, localizado na porção centro-sul do Espírito Santo, com uma área aflorante maior que 75km², representado por uma estrutura de forma elíptica alojada sobre rochas encaixantes paraderivadas e ortognaisses, é caracterizado pelo magmatismo bimodal com zonamento inverso, composto por um núcleo arrasado de composição gabro-norito envolvido por rochas de composição sieno- a monzonitos com altos topográficos nas bordas, com charnockitos e noritos nas bordas oeste, sul, sudeste e *stocks* de granitos distribuídos pela área. O contato entre as litologias do corpo é predominantemente dúctil e gradacional, sugerindo a intrusão contemporânea de diferentes magmas. (PETRICK, 1987; MENDES, 1996; LUDKA et al. 1998; MENDES e CAMPOS, 2012; BELLON, 2021).

O CIVN foi escolhido como propósito de estudo por expor características estruturais e associações de rochas correlatas aos estágios orogênicos. As informações poderão servir de base para a futura aquisição de dados mais detalhados envolvendo temas petrográficos, físico-químicos e de isótopos de todas as unidades presentes dentro da área, a fim de um melhor

entendimento dos aspectos pertinentes aos mecanismos de geração e alojamento desses corpos intrusivos na história do Orógeno Araçuáí.

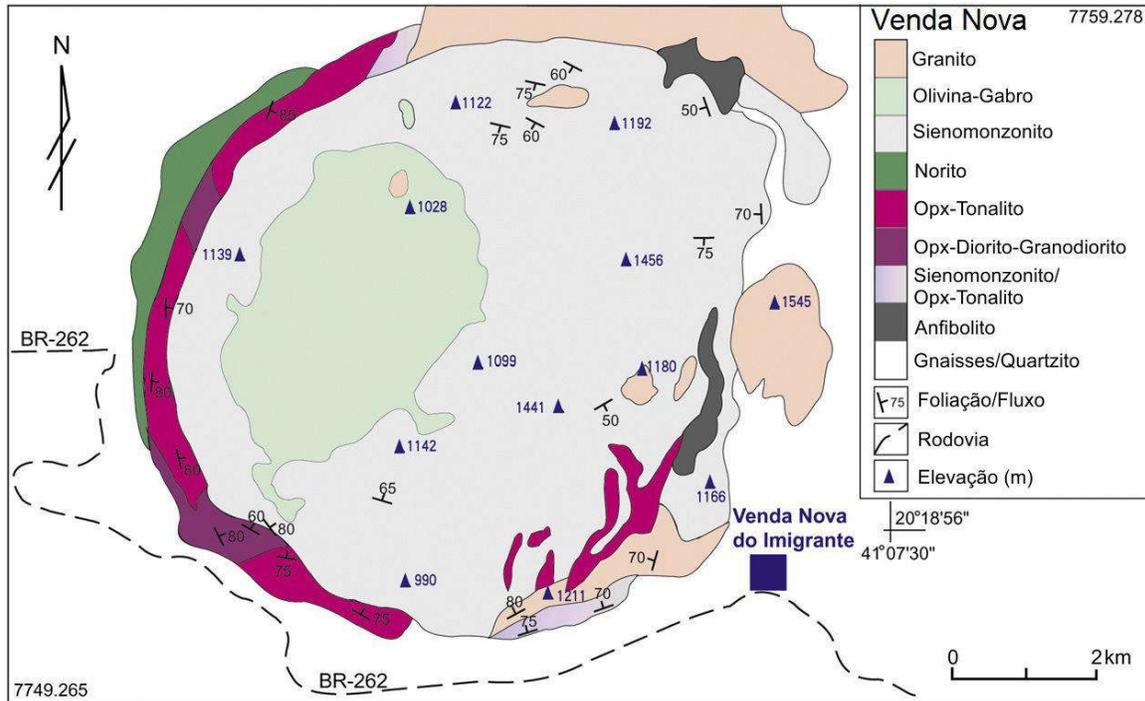


Figura 5. Mapa geológico do Complexo Intrusivo de Venda Nova (Modificado de Mendes et al., 2012).

METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho seguiu a metodologia de mapeamento geológico clássica, que consiste em, contextualização regional e local da área de estudo através de revisão bibliográfica e interpretação geológica de imagens com o intuito de sintetizar as informações de trabalhos anteriores para o conhecimento prévio da região. Posteriormente, durante as atividades de campo, foi realizada a descrição petrográfica macroscópica das litologias, feições estruturais e magmáticas dos afloramentos, seguido da amostragem das unidades representantes em pontos de coleta específicos. Com a amostragem das unidades que representam o CIVN e suas encaixantes, iniciou-se as análises exploratória que contou com a descrição de lâminas delgadas e análise química de elementos maiores das principais unidades litológicas.

Neste trabalho foram visitados 100 afloramentos (Figura 6) distribuídas pela área, onde os pontos indicados em vermelhos são que integram a coleta amostral de campo para a análises petrográficas e geoquímica, compreendendo as análises exploratórias que tem o intuito de investigar e afirmar as informações de campo, como parte final da etapa de campo, essas análises

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuai, Espírito Santo

compreendem o uso de microscópios ópticos eletrônicos para descrição de lâminas delgadas das amostras e análises químicas de elementos maiores e menores.

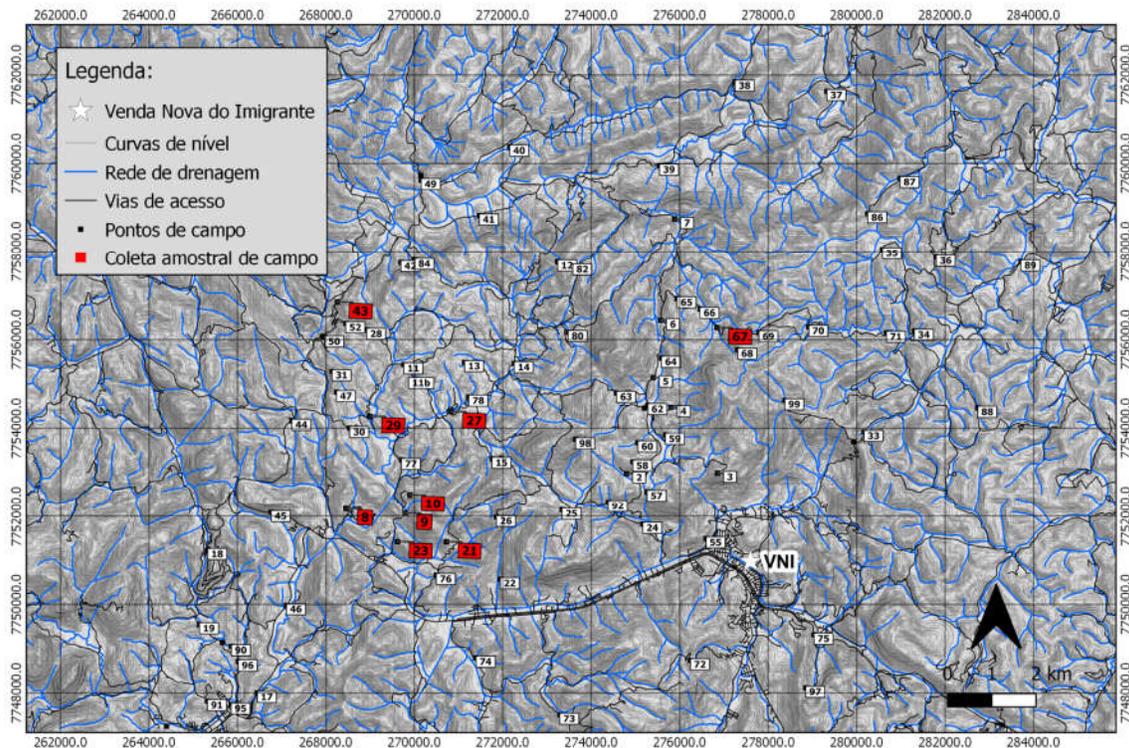


Figura 6. Mapa base de campo, com os pontos visitados, amostrados e analisados nesta edição de pesquisa (Google Terrain, 2022).

A química de elementos maiores e menores das unidades representantes analisadas sobre FLUORESCÊNCIA DE RAIOS - X teve o intuito de análise exploratória para apresentação dos dados de campo e direcionamento para os pontos de coleta amostral para análises futuras. A metodologia de preparação amostral é feita pela transformação do material moído e reduzido de granulometria no moinho de panela e homogêneas com ligantes ($\frac{1}{4}$ de proporção de ligantes por amostra), depois colocadas na prensa para a confecção das pastilhas. Posteriormente, para a análise das amostras, foi utilizado o equipamento de Espectrômetro de Fluorescência de Raios X (FRX), por dispersão de comprimento de onda, modelo S8 Tiger da Bruker, composição do ânodo Rh (ródio), potência máx. 1kW, tensão 20-50 kV corrente: 5-50mA, disponível no laboratório da UFES, para obtenção de dados de química da rocha. As informações foram processadas no *software* gratuito GDCKit 6.0 para a interpretação dos dados nos diagramas binários, ternários e gráficos específicos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O conhecimento prévio da área foi feito através técnicas de fotointerpretação aplicada ao mapeamento geológico em corpos ígneos intrusivos e posteriormente realizadas as atividades de campo, coleta amostral e a análise exploratória que conta com dados de descrição de lâminas delgadas (micropetrografia) e química de elementos maiores e menores.

INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA DE IMAGENS

As técnicas de cartografia geológica aplicada a rochas ígneas plutônicas desenvolvidas neste trabalho tem o intuito de apresentar as informações relevantes que podem ser observadas sob diversos tipos de imagens aéreas, e como esses métodos de fotointerpretação geológica podem contribuir na obtenção de dados preliminares.

A área de estudo está inserida na Região das Montanhas Capixabas, onde o relevo dominante é de serras, escarpas rochosas, morrotes, mares de morros, formas de meia laranja e picos, constituindo a paisagem do sistema montanhoso de parte do Espírito Santo, segmento oriental da Serra da Mantiqueira, onde a região apresenta uma configuração geomorfológica de relevo de patamares escalonados, que são configurados por sucessões de eventos erosivos e intempéricos.

Analisando as imagens (Figura 7) é possível visualizar o formato elíptico do relevo, a área ocupada pelas bordas do corpo de Venda Nova apresenta os maiores picos altimétricos, serras e relevos escarpados onde afloram rochas de composição graníticas e sienomonzoníticas. Os bordos nordeste e noroeste formam a Serra da Mata Fria em contato com gnaisses da Serra do Pinga Fogo a Noroeste e a Nordeste com a Serra do Boi, e a borda sudeste onde encontra a Serra da Pedra do Rego. Em contraparte, o núcleo central e o núcleo a Sudoeste, onde são encontrados os vales, de composição gabroica, apresentam as menores cotas, formas ovaladas e relevo muito arrasado em que predominam extensões de coberturas de colúvios e aluviões que formam morros e morrotes meia laranja. Ambos estão dispostos orientados de acordo com o trend regional dominante NE-SW, sobre a zona de cisalhamento de Piracema nas proximidades com a zona de cisalhamento Guaçuí, além de outros lineamentos que cortam ou bordejam o corpo que ainda não foram definidos na literatura. A rede de drenagem é constituída por um conjunto de córregos encachoeirados que abastecem o Rio Castelo correndo sentindo Conceição de Castelo constituindo os rios de bacia hidrográfica de Itapemirim.

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuai, Espírito Santo

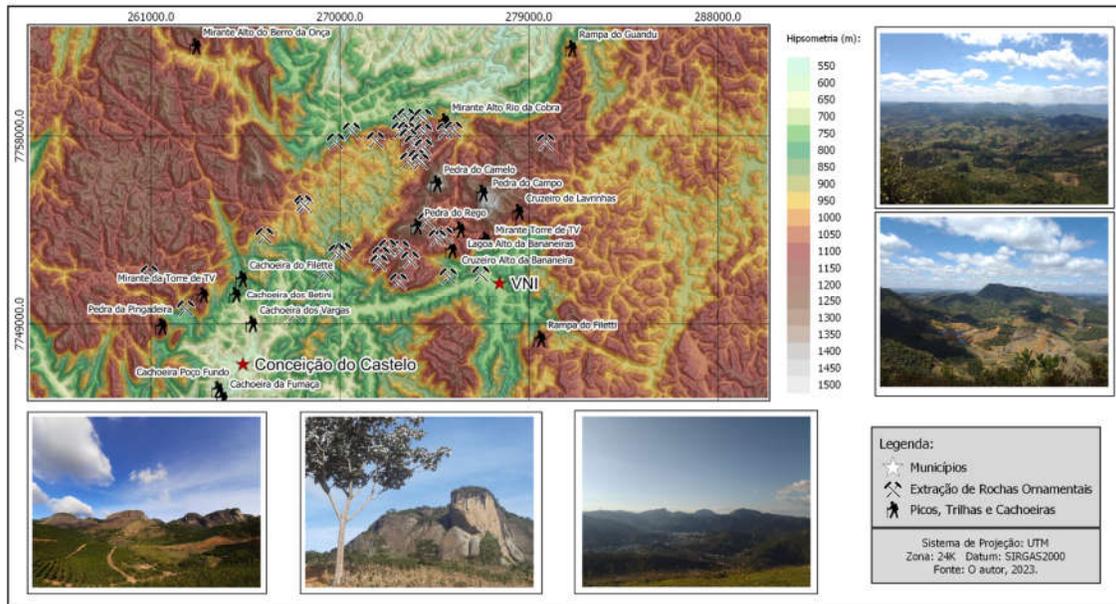


Figura 7. MDE e fotografias representativas dos aspectos geomorfológicos e geoturísticos associados à área. Base de dados: MDE - Alos Palsar.

Na compartimentação do relevo ou geomorfológica (Figura 8) se organizam feições derivadas de diferentes eventos geológicos como os elementos geotectônicos, arranjos estruturais e, eventualmente, a predominância de um determinado contexto geológico. Esses fatores geram arranjos que permitem a divisão de domínios. Para a geração do Mapa de Compartimentação Morfotectônica da área, foi realizada a análise e interpretação das estruturas lineares presentes nos domínios e a análise da rede de drenagem. Com esses dados foi possível a integração com o Mapa de Compartimentação Geomorfológica (Figura 8).

Na Compartimentação Geomorfológica (Figura 8. C) a forma elíptica do corpo é representada pelas ZH - 03, ZH - 04 e ZH - 07 que definem o corpo. A ZH - 04 apresenta os maiores altos topográficos e um relevo muito rugoso e pouco dissecado. A ZH - 03 é representada por um núcleo mais dissecado e com baixos topográficos. A ZH - 07 também apresenta-se sobre um terreno mais dissecado e arredondado. Essas zonas homólogas representam parte do corpo intrusivo, e com isso, as demais, foram consideradas como as encaixantes e unidades associadas por apresentarem aspectos texturais e padrões diferentes. No mapa de estruturas lineares (Figura 8. D) é possível observar lineamentos que cortam ou ao redor do corpo. Na análise da rede de drenagem (Figura 8. E) é possível observar que as anomalias mais comuns identificadas são feições como trechos de padrão dendrítico com influências de padrões radial e treliça, canais retilíneos, meandramento local do trecho, meandros comprimidos ou abandonados, alargamentos

e curvas de trechos anômalos. As capturas de drenagem identificadas são, em geral, em forma de cotovelo, extensão de cabeceiras e migração lateral do canal. As informações que mais se destacam na Figura 8, são: 1) A forma circunscrita marcada por altos topográficos na bordas; 2) Núcleos arredondados com baixos topográficos e bem dissecados na parte interna; 3) Grandes lineamentos, de tamanhos de até quilômetros e pequenos lineamentos, que cortam ou bordejam o corpo (indicativo de estruturas prévias e estruturas deformacionais sin- e pós a colocação dos magmas).

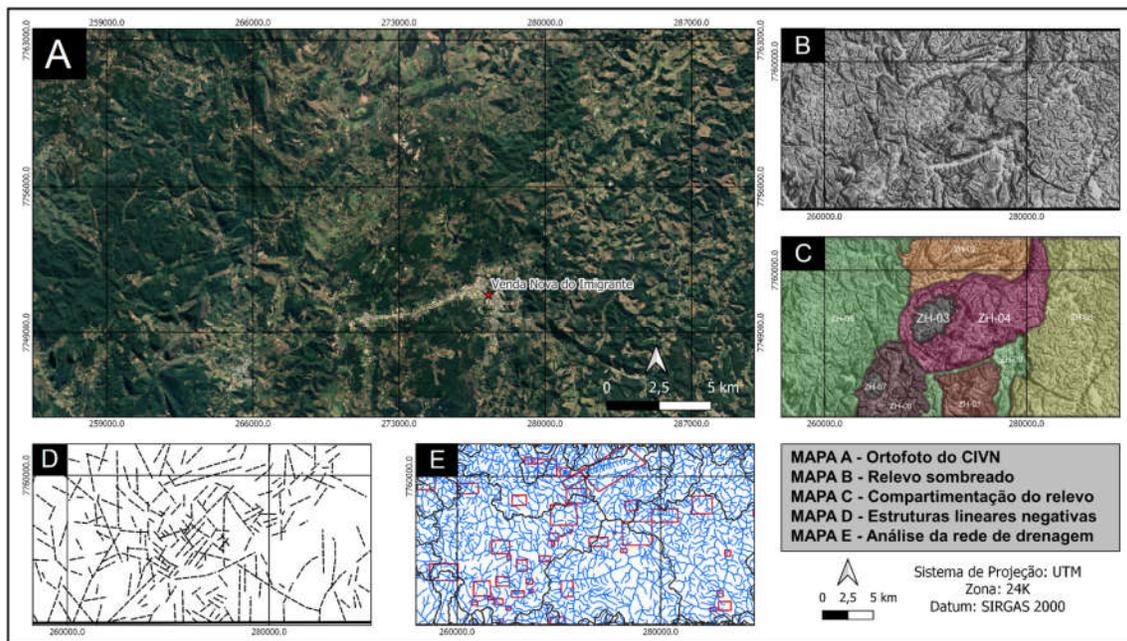


Figura 8. Mapas usados na fotointerpretação: A) Ortofoto de satélite; B) Imagem de relevo sombreado; C) Compartimentação do relevo em domínios; D) Extração de diversos lineamentos estruturais via GIS; E) Rede de drenagem, em destaque capturas e anomalias recorrentes dentro da área. Base de dados: Google Satélite (Ortofoto); Alos Palsar (Relevo Sombreado); CPRM, 2018 (Rede de drenagem).

As técnicas envolvendo aspectos aerogeofísicos como gamaespectrometria e radiometria aplicadas a complexos ígneos intrusivos (Figura 9) apresentam relevantes informações para observação de diferenças litológicas e de estruturas que ocorrem na área de estudo, principalmente para divisão de unidades dentro deste corpo magmático, se tornando ferramentas indispensáveis para este mapeamento. As imagens de aerogeofísica que serão apresentadas foram extraídas do banco de dados disponibilizado pela CPRM. Os componentes que integram essa montagem de informações são: A) Mapa do Sinal Analítico aplicado para identificar a

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuai, Espírito Santo

localização do CIVN e limitar as estruturas responsáveis pelas anomalias magnéticas presentes na área; Os mapas de teor médio dos radioelementos e seus correspondentes, B) Mapa do Canal de Contagem Total, Mapa Radiométrico da Concentração C) de Potássio (em %), D) de Urânio (em ppm) e E) de Tório (em ppm) em rochas ígneas mostra que há uma tendência de aumento da quantidade destes em função do teor de sílica, ou seja, rochas félsicas possuem um teor mais elevado de radioelementos do que rochas máficas ou ultrabásicas.

A localização do corpo intrusivo é bem evidenciada no Sinal Analítico, a individualização e definição das unidades do corpo, bem como suas principais características físico-química são bem representadas nos mapas de Contagem Total, do Potássio, Urânio e Tório onde são definidos teores anômalos para as diferentes litologias do corpo em relação às suas encaixantes. Os dados de gamaespectrometria e radiometria mais expressivos para as unidades do CIVN representados nos Domínios Litogeofísicos, são: as bordas do corpo (ZL-02), em geral, os valores estão no intervalo de 8.42 a 21.42 μ R/h no mapa de CT, 1.1 a 4% para o canal de K, 1.41 a 2.48ppm para o canal de eU, e 17.23 a 65.2ppm para o canal de eTh; no núcleo (ZL-04) os valores estão no intervalo de 1.06 a 3.65 μ R/h no mapa de CT, 0.09% a 0.46% no canal de K, 0.30 a 1.12ppm para o canal de eU, e 1.93 a 9.56ppm para o canal eTh; os valores encontrados nas rochas das encaixantes para o domínio das a leste e oeste (ZL - 07, 08 e 10), estão no intervalo de 5.44 a 12.36 μ R/h no mapa de CT, 0.69% a 2.86 no canal de K, 0.30 a 4.87ppm para o canal de eU e 11.34 a 17.95ppm para o canal de eTh; no domínio das encaixantes nos limites norte e sul os valores encontrados, estão no intervalo de 2.4 a 4.89 μ R/h no mapa de CT, 0.09% a 0.69% no canal de K, 0.30 a 1.89ppm no canal de eU e 1.93 a 12.14ppm para o canal de eTh. Para uma observação prévia dos aspectos físico-químicos que ficam mais explícitos podemos destacar: 1)

Um divisão contrastante das unidades que ocorrem dentro da área; 2) Localização do CIVN e limites de contato com as respectivas encaixantes; 3) Forma circunscrita das diferentes unidades; 4) Altas anomalias positivas dentro do corpo de VN; 5) Diversos pontos localizados com anomalias; 6) Algumas zonas de contatos entre as unidades mostram uma mudança gradual nas cores das escalas nos mapas, o que pode ser indicativo zonas de contato; 7) Visto os contrastes entre as características das unidades, pode-se se dizer que pelo varias fontes magmáticas atuou na área, e que existem zonas com características intermediárias; 8) Alguns limites de unidades aflorantes e suas respectivas encaixantes, além da inclusão do corpo de Conceição de Castelo podem ser os temas para uma próxima edição de pesquisa.

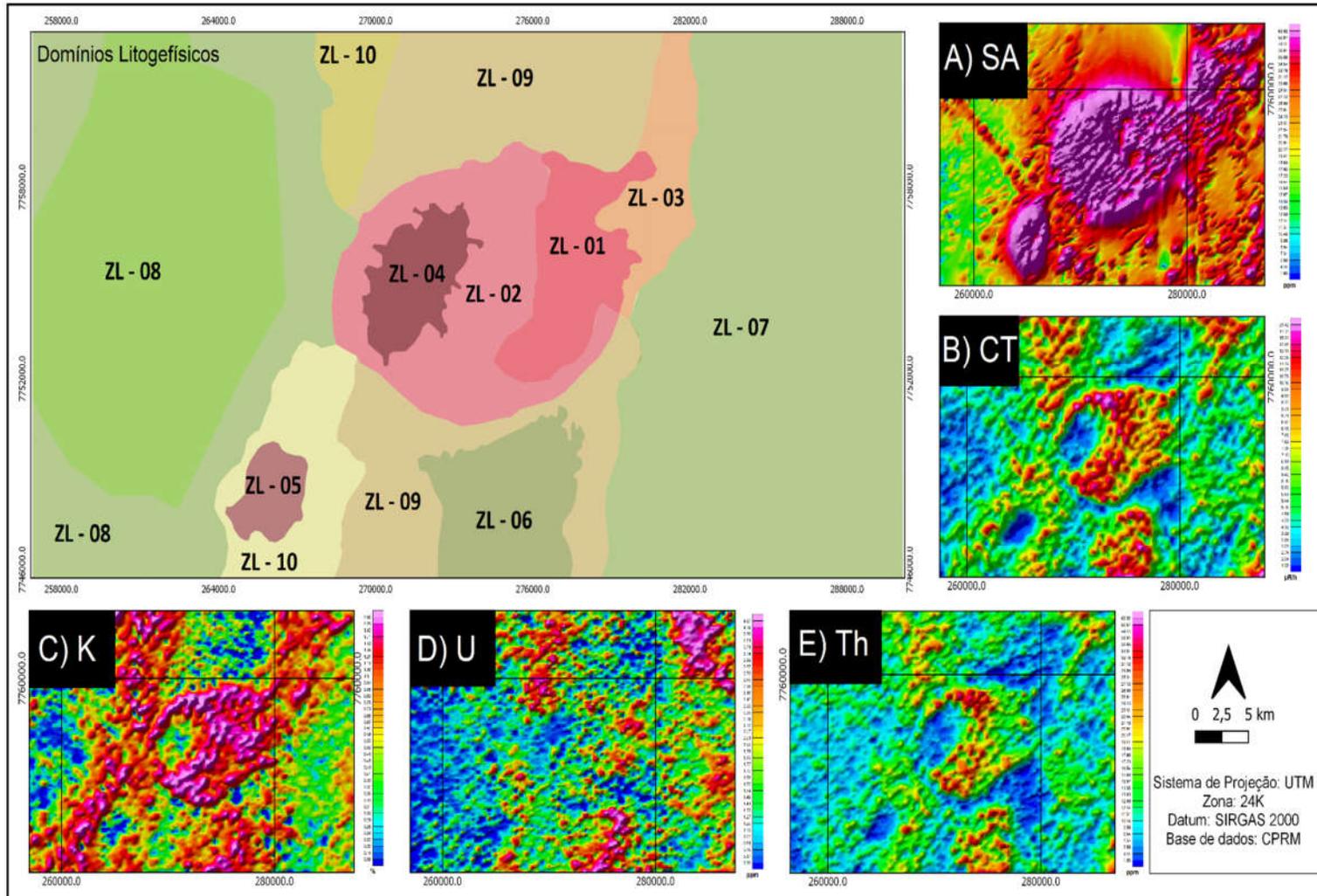


Figura 9. Domínios Litofísicos com os seus componentes de análise: A) Mapa do Sinal Analítico; B) Mapa do Canal de Contagem Total, Mapa Radiométrico da Concentração de C) Potássio (em %), D) Urânio (em ppm) e E) Tório (em ppm) (CPRM, 2010).

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuai, Espírito Santo

O desenvolvimento dos mapas de compartimentação geomorfológica, compartimentação morfotectônica e o litogeofísico permitiu a obtenção de informações importantes através de interpretação e análise geológica de imagens. O produto final, e de maior interesse nesta etapa, é a geração do mapa base de campo, posteriormente com a exploração da área e a caracterização de afloramentos e rochas pode-se ter uma mapa geológico para área na tentativa de reproduzir cartograficamente os grupos de dados. Nos tópicos seguintes será discutido detalhadamente as informações que integram este mapa geológico do CIVN.

PETROGRAFIA MACRO E MICROSCÓPICA

Os grupos litológicos que ocorrem com maior frequência em afloramentos de campo, foram divididos neste trabalho de acordo com variações texturais, composicionais e aspectos estruturais semelhantes, sendo das classificações das rochas. Para o conjunto de encaixantes que envolvem o corpo, podemos relatar dois grandes grupos, um composto por rochas paraderivadas e outro por ortognaisses. A associação ígnea que representa a área é composta por domínios de: 1) Granitos e leucogranitos, 2) Gabros e Noritos, 3) Charnockitoídes, 4) Sienomonzonitos e, 5) Dioritos. Existem rochas com variações composicionais e texturais que podem ocorrer dentro destes grandes grupos, até comuns em algumas partes do corpo, mas que em geral estão relacionados a processos de fracionamento ou misturas de magmas.

As rochas identificadas como **encaixantes** que são observadas de norte a sul (Figura 10. D, E e F) nas proximidades do corpo intrusivo, são reconhecidas principalmente pelo bandamento do tipo gnaiss e aspecto migmático. As encaixantes encontradas a oeste e leste (Figura 10. A, B e C) aspecto ígneo, essas são diferentes das encontradas de norte a sul, por apresentarem aspecto ígneo, características texturais, composicionais e estruturais diferentes. Em geral essas rochas são mesocráticas, maciças, com bandamento gnaiss de variados tamanhos, coloração cinza a cinza clara, holocristalina, fanerítica, inequigranular, de granulação fina, média e grossa, podendo aparecer porfiroblastos.

Os **Granitos** são encontrados em pequenas porções localizadas, na forma de *stocks* e diques, principalmente na borda Nordeste, e também, no limite Oeste com a unidade Gabroica do núcleo. São representados por granitos finos, grossos e leucogranitos (Figura 11. A, B e C) que, em geral, são rochas leucocráticas, maciças, de coloração branca-cinza-amarelada, levemente alterada, com foliação incipiente. Texturalmente são holocristalinas, faneríticas, de granulação fina, média e grossa, inequigranular a porfírica, com grãos idiomórficos a

xenomórficos. A mineralogia é constituída por plagioclásio, quartzo, microclina, mimerquita, biotita, muscovita, opacos, goethita, apatita e zircão

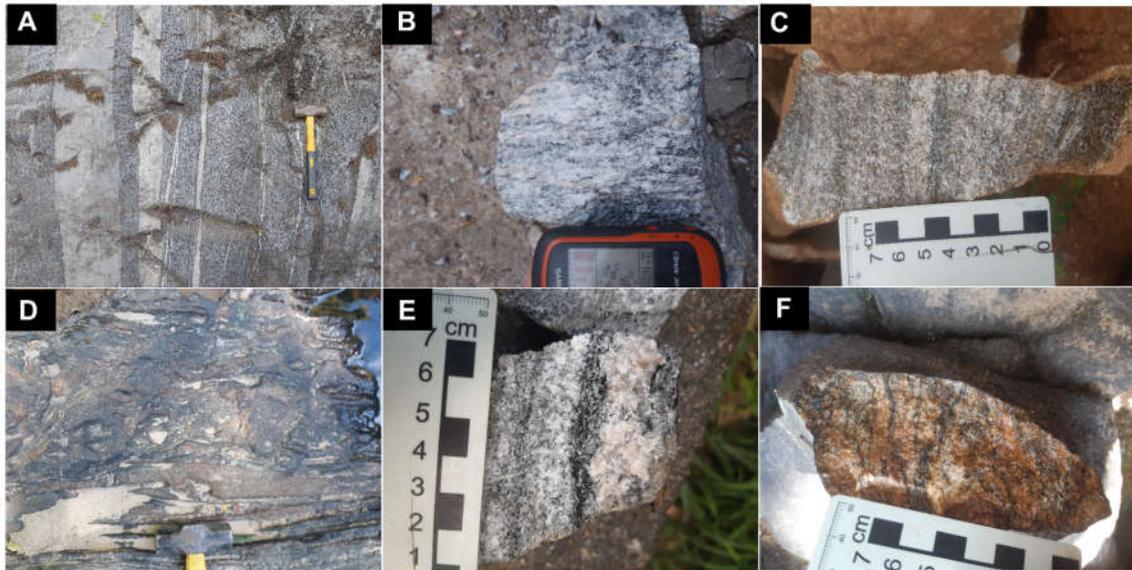


Figura 10. Representação das encaixantes em A, B e C encontradas no leste e oeste, e D, E, e F a norte e sul da área.

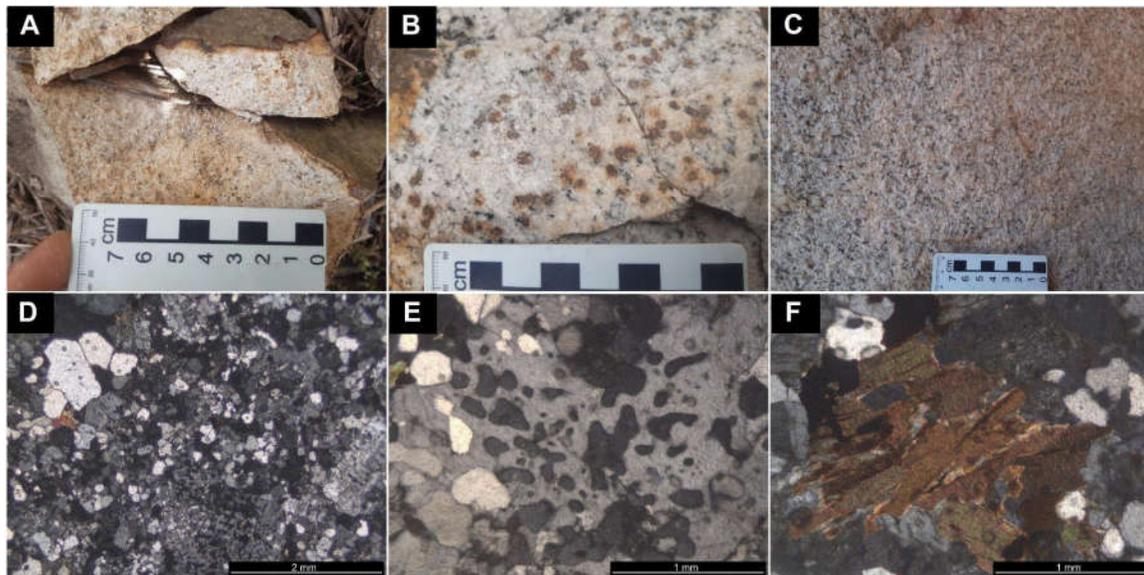


Figura 11. Representação das amostras de campo em e sua variação composicional em A, B, e C. As microfotografias das lâminas delgadas D) assembleia mineralógica geral, E) relação entre o quartzo e feldspatos e F) biotita.

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuaí, Espírito Santo

Em lâmina delgada (Figura 11. D, E e F) as características gerais de cada mineral, são: o plagioclásio em maior parte se encontra disperso, com grãos xenomórficos, alongados, com germinação polissintética, de coloração cinza-esbrequiçada, apresentando inclusões, associados, zonados ou alterados; os grãos de quartzo apresentam tamanhos variados e constituem parte da matriz recristalizada, são sempre xenomórficos, de relevo baixo, coloração que pode variar a tons de cinza-branco-amarelo, contatos retilíneos a angulosos, bordas serrilhadas ou corridas, apresenta sub-grãos, extinção ondulante, aspecto poiquilitico ou verminoso como texturas de intercrescimento; a biotita pode ser encontrada com frequência na matriz ou associada a aglomerados máficos, coloração marrom, extinção mosqueada, uma direção de clivagem, e hábito lamelar, com grãos idiomórficos e inclusões de hornblenda; muscovita é menos frequente, ocorre dispersa em pontos aleatórios, com tamanhos variados, hábito lamelar de birrefringência moderada; a apatita apresenta-se como pequenos cristais incolores de granulação muito fina, idiomórfica, com hábito prismático curto ou levemente hexagonal a hipidiomórficos, incluso em plagioclásio, quartzo, mimerquita, microclina; o zircão apresenta como inclusão de alto relevo e forte birrefringência e em alguns casos halos pleocróicos, os grãos são em geral idiomórficos, de hábito prismático e de granulação muito fina; os opacos são granulares, encontrados como forma de inclusões nos outros minerais e dispersos pela rocha.

O grupo dos **Sienomonzonitos** (Figura 12. A, B e C) contempla a maior parte aflorante do CIVN e, são responsáveis pelos picos topográficos da área. São rochas que variam de composição sienítica a monzonítica, são encontradas com frequência em afloramentos de pedreiras. Texturalmente são rochas holocristalinas, faneríticas, de granulação média a grossa, inequigranular com feldspatos porfíricos, grãos que variam de idiomórficos e hipidiomórficos, apresentando variações texturais em diferentes partes do corpo intrusivo. Em lâmina (Figura 12. D, E e F), a mineralogia da rocha é constituída por plagioclásio, k-feldspato, biotita, hornblenda, mimerquita, quartzo, opacos, titanita e zircão.

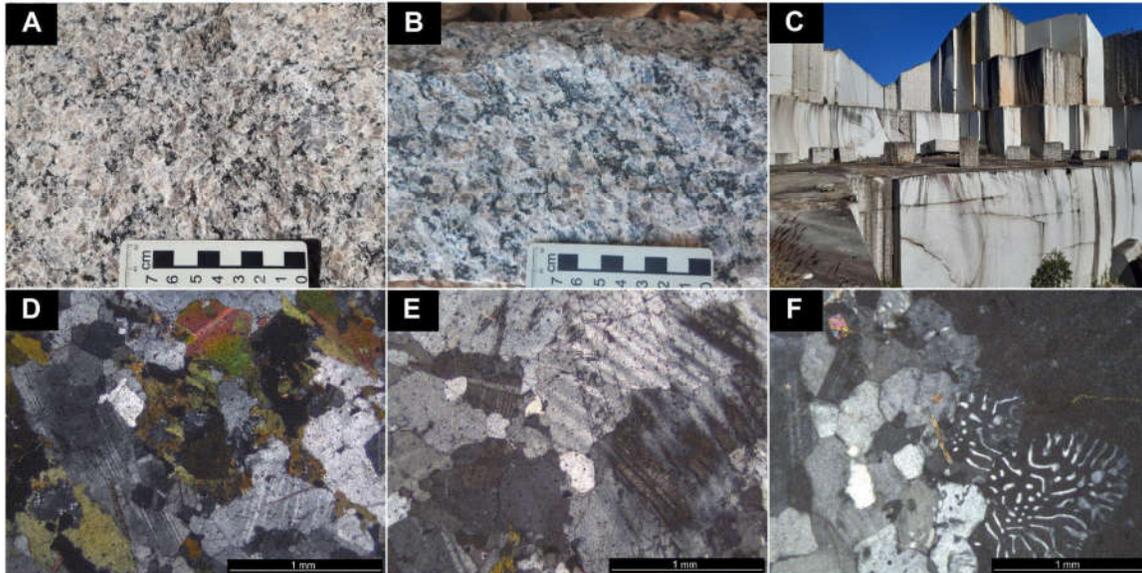


Figura 12. A unidade dos sienomonzonitos representadas em: A) e B) amostra de mão; C) afloramentos do tipo pedraira; microfotografias representativas da D) assembleia mineral constituinte da rocha, E) plagioclásio e extinção ondulante e F) mimerquita.

As características minerais observadas sob microscopia são: Plagioclásio subédrico de granulação fina a grossa e apresenta-se comumente zonado, com intercrescimento antipertítico, mimerquita e inclusões como titanita euédricas, biotita com formas irregulares e quartzo arredondados; os grãos de ortoclásio tem coloração acinzentada, relevo baixo, hábito tabular, idiomórficos a xenomórficos, de granulação fina a grossa; a biotita tem hábito lamelar, idiomórfica a hipidiomórfica com dimensões menores, granulação fina, com pleocroísmo variando de amarelo-verde-acastanhado, estando comumente associada com titanita, apatita e minerais opacos; os grãos hornblenda apresentam-se hipidiomórficos a xeromórficos, com hábito predominante granular e mais restrito prismático, pleocroísmo em tons de verde claro a escuro e castanho, encontra-se em aglomerados; o quartzo é quase inexistente, estando como mineral acessório; o zircão ocorre como grãos euédricos a subédrico de granulação muito fina estando incluso em biotita e disperso na matriz; a titanita é um mineral acessório, idiomórfico a xenomórfico, com cores acastanhadas, relevo alto, ocorre normalmente como inclusão ou próxima de cristais, sempre associada com minerais opacos e apatita.

As rochas encontradas no núcleo do corpo intrusivo de composição de **Gabro-Norito** (Figura 13. A, B e C), variando para Diorito em alguns pontos. Os afloramentos desta unidade são observados com maior frequência na rede de drenagem e em baixos topográficos bem arrasados, é comum ocorrência de estruturas de acamamento ígneo sub-horizontal nesses

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuaí, Espírito Santo

afloramentos. Em geral, essas rochas são melanocráticas, de coloração cinza escura, maciças, de densidade acima da média, sem foliação aparente, holocristalinas, fanerítica, inequigranular de granulação fina a média. Em lâmina (Figura 13. D, E e F) a mineralogia da rocha é constituída por plagioclásio, k-feldspato, piroxênios, hornblenda, biotita, quartzo, apatita, opacos e zircão.

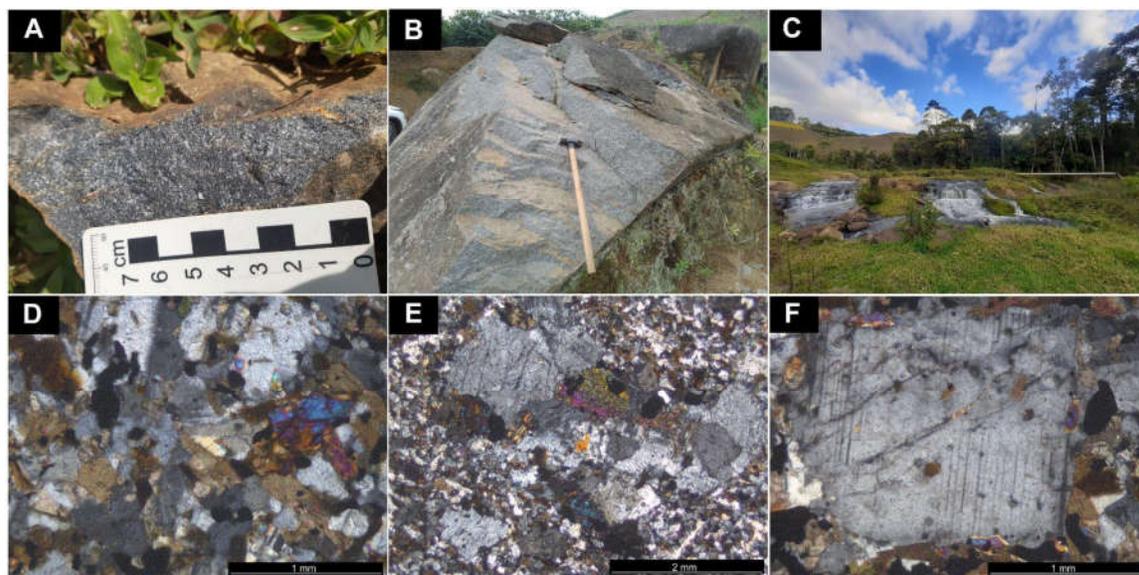


Figura 13. Unidade gabróica do núcleo sendo representada em A) amostra de mão, B) e C) registros de afloramentos. E em macrofotografia a A) assembleia mineral, B) matriz de granulação fina e grãos maiores, F) fenocristais de feldspatos com diversas inclusões.

Em microscópio as características minerais são: Os plagioclásios em maior parte se encontram dispersos, com grãos hipidomórficos xenomórficos, alongados, com geminação polissintética, de coloração cinza-esbranquiçada, apresentando inclusões, associados, zonados ou alterados; piroxênios estão dispersos pela matriz e às vezes associados a aglomerados máficos com tamanhos variados, de alto relevo, fraturado e alterado; as biotitas apresentam coloração marrom e pleocroísmo em diferentes tons de marrom/castanho dispersos pela matriz, com grãos tabulares, extinção mosqueada e relevo baixo, encontradas na forma agregados junto aos cristais de anfibólio, opacos e titanita; o quartzo apresenta-se xenomórfico e levemente arredondado, principalmente em seus contatos, encontra-se disperso pela matriz; o ortoclásio apresenta coloração cinza de primeira ordem e é reconhecido através da alteração para sericita e também por seu caráter pertítico; os grãos hornblenda apresentam-se hipidiomórficos a xeromórficos, com hábito majoritariamente granular e mais restrito prismático, pleocroísmo em

tons de verde claro a escuro e castanho, encontra-se em aglomerados com a biotita, titanita e opacos sendo menos frequentemente dispersos na matriz; os minerais opacos ocorrem das mais variadas formas podendo ser arredondados, tabulares e anédricos e é comum observá-los em aglomerados com os minerais máficos; as inclusões mais comuns a esses grãos são de apatita e zircão.

Rochas de composição **Charnockítica** (Figura 14. A, B e C) podem ser observadas principalmente nas proximidades dos bordos oeste e sul do corpo intrusivo e, também, na forma de blocos rolados e enclaves na unidade dos Sienomonzonitos. Essa unidade apresenta variações composicionais e texturais muito semelhantes a dioritos, monzodioritos e tonalitos. Em geral, essas rochas são mesocráticas, de coloração cinza escuro com tons esverdeados, maciça, e com foliação incipiente. Texturalmente são holocristalinas, faneríticas, de granulação média a grossa, inequigranular, com grãos xenomórficos a hipodicomórficos. A mineralogia é constituída principalmente por plagioclásio, piroxênios (opx - estantita e cpx), quartzo, k-feldspatos, anfibólio, biotita, apatita, zircão e opacos.

As características minerais em microscopia (Figura 14. D, E e F) são: Os plagioclásios em maior parte se encontram dispersos, com grãos xenomórficos, alongados, com geminação polissintética, de coloração cinza-esbranquiçada, contatos retos e arredondados, pouco fraturados, apresentando inclusões, associados e zonados ou alterados;. os grãos de quartzo são observados de duas formas, uma na matriz com grãos menores e outra em tamanhos maiores, em geral, são xenomórficos, com contatos retos e angulosos ou vermiculares, apresentam-se também extinção ondulante em alguns cristais; o ortopiroxênio ocorre principalmente dispersos na rocha ou associação aos agregados máficos, em geral, os cristais hipidiomórficos a xenomórficos, com contatos angulosos a arredondados, fraturados, pleocroísmo verde-castanho-rosa; o clinopiroxênio ocorre também de forma disseminada e associado a o opx ou a aglomerados máficos, em geral, exibem contatos angulosos a arredondados, são xenomórficos, pouco menos fraturados, pleocroísmo incolor a verde claro, com substituições de outros minerais nas bordas, clivagem ou fraturas; os k-feldspatos constituem parte da matriz e geralmente associados aos plagioclásios e até com feições mimerquita, exibem pouca ou quase nenhuma macla de geminação, os cristais são xenomórficos, com poucas inclusões; os cristais de biotita normalmente são vistos como substituição de minerais de piroxênios e anfibólios, com hábito lamelar e pleocroísmo a tons de marrom, podendo ocorrer cristais isolados ou dispersos com fraco pleocroísmo e xenomórficos; os anfibólios podem ser bem observados nos agregados máficos, frequentemente em relação ou substituição aos minerais de piroxênio, em geral, apresentam tamanhos variados, são hipidiomórficos a xenomórficos, com pleocroísmo a

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuai, Espírito Santo

tons de verde, contatos angulosos e retos, e com as bordas, fraturas e clivagens em processo de substituição para biotita, são xenomórficos, de tamanhos variados, e presença de exsolução e substituição por outros minerais; já as apatitas e zircão, que são os minerais acessórios mais comuns nessas amostras, ocorrem disseminadas pela rocha, como inclusões ou associadas aos aglomerados máficos; os minerais opacos são encontrados disseminados, associados aos aglomerados máficos ou como inclusões em outros minerais principais.

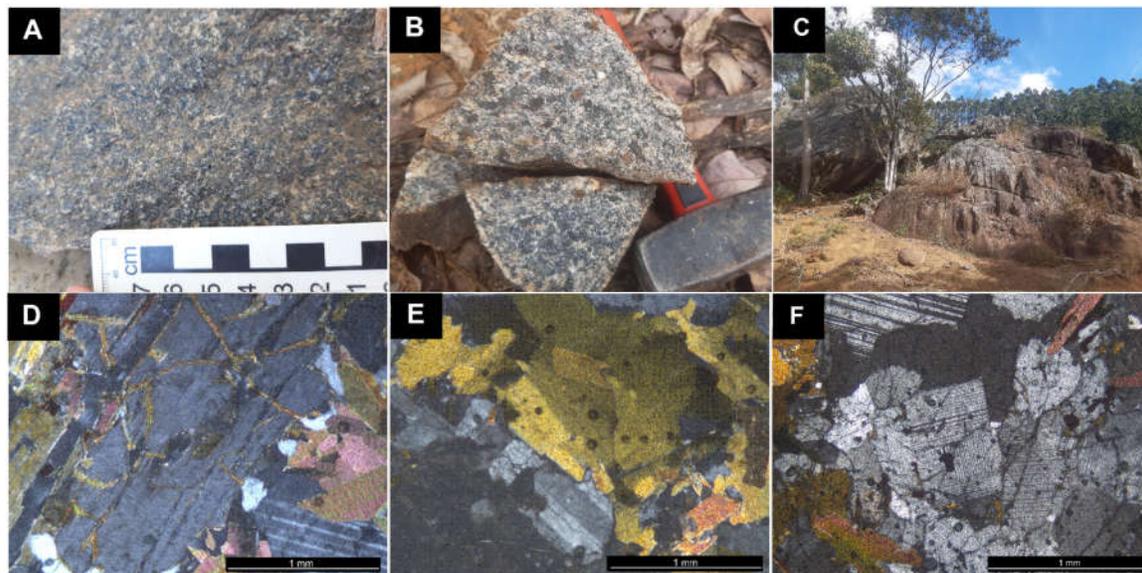


Figura 14. Registros de campo em: A) e B) amostras de mão representativa da variação composicional e textural recorrente; C) Tipo comum de afloramento da unidade; Microfotografias em D), E) e F) assembleia mineral representante.

Os **Noritos** da borda são encontrados em afloramentos na forma de blocos rolados ou corte de estrada na borda noroeste do corpo intrusivo (Figura 15. A, B e C). Trata-se de rochas melanocráticas, de coloração verde-escuro, maciça, com foliação incipiente. Texturalmente são holocristalina, fanerítica de granulação fina, inequigranular com grãos xenomórficos a hipidiomórficos. Sua mineralogia é observada na microscopia (Figura 15. D, E e F) constituída principalmente por plagioclásio, hornblenda, anfibólio, opx (enstatita e hiperstênio), apatita e opacos.

As características minerais são: Plagioclásios são hipidiomórficos a xenomórficos, de hábito tabular, contatos retos e sinuosos, alguns grãos apresentam geminação e zonação; a hornblenda/anfibólio predomina entre os minerais máficos, são idiomórficas a xenomórficas, com pleocroísmo castanho-verde podendo ser encontrada disseminada pela matriz, como

substituição de piroxênios ou associando-se a aglomerados máficos, apresenta também aspecto poiquilítico; os grãos de ortopiroxênios encontram-se disseminados ou associados aos aglomerados máficos, com pleocroísmo castanho-verde-rosa, são hipidiomórficos a xenomórficos, fraturas, arredondados com bordas corrosão e/ou substituição por hornblenda; os grãos de clinopiroxênios aparecem com menor frequência, estando intimamente associados aos opx, são hipidiomórficos a xenomórficos. e apresentam pleocroísmo incolor a verde claro; a biotita é pouco frequente, tem hábito lamelar, pleocroísmo castanho-marrom, muitas delas se encontram em substituição ao opx. As inclusões mais comuns são de: grãos de apatita, opacos e zircão.

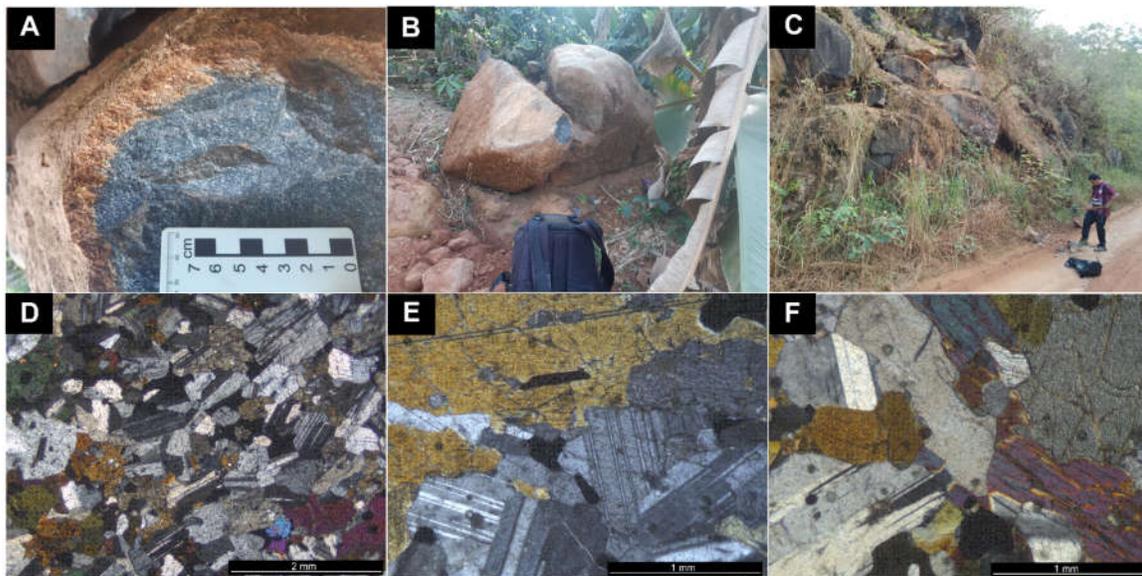


Figura 15. Representação da forma de ocorrência dos Noritos da borda em A) amostra de mão, afloramentos dos tipos B) bloco rolado e C) corte de estrada. As microfotografias representam em D) assembleia mineral principal, E) e F) plagioclásios, piroxênios e anfibólios.

Para a **classificação modal das rochas**, foram realizadas contagem modal em 10 lâminas petrográficas, além das definições de campo. O diagrama QAP (Figura 16. A) foi utilizado para classificar as rochas com porcentagem de máficos <90% (PV - 08, PV - 10, PV - 12, PV - 21, PV - 23 e PV - 29B) e para as rochas de composição gabroica utilizou-se o diagrama de plagioclásio e piroxênios (Figura 16. B).

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuai, Espírito Santo

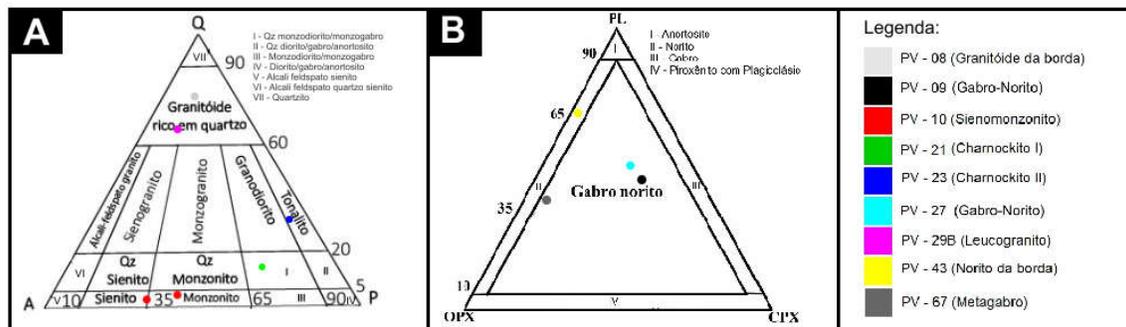


Figura 16. Diagramas de classificação de rochas plutônicas: A) QAP para rocha com $m < 90\%$; B) diagrama para as rochas gabróicas com máficos $>90\%$, plagioclásio + piroxênios (STRECKEISEN, 1967 e 1976).

As rochas que apresentam OPX como mineral máfico principal e estão presentes no diagrama QAP, como é o caso das amostras PV - 21 e PV - 23 correspondentes aos Charnockitos I e II, é classificado como Charno-enderbita e Enderbita respectivamente. O restante das amostras correspondem com as classificações macroscópicas realizadas em afloramentos de campo. Na tentativa de reproduzir cartograficamente a disposição dos grupos litológicos dentro da área de estudo para este trabalho, o desenho do **Mapa Geológico do CIVN** (Figura 17) compreende as informações de mapeamento geológico e descrições petrográficas das unidades. Foram visitados 100 afloramentos dispersos pela área e ainda há necessidade de mapeamento de maior detalhe de todo o corpo e suas respectivas encaixantes. Contudo, para este trabalho as informações contidas no desenho cartográfico das unidades e seus limites com as encaixantes são suficientes para o foco do estudo.

A disposição dos grupos litológicos que foram abordados nas descrições petrográficas e que estão sendo representados na Figura 17., encontram-se: dois núcleos máficos com rochas que variam na composição de gabroica, um na parte central e outro na porção sudeste da área; no corpo principal, rochas graníticas e sienomonzonitos formam os maiores picos e bordas nas porções nordeste e sudeste; faixas de rochas noríticas e charnockíticas formam um anel que envolvem os bordos noroeste e sudeste do corpo principal; dois grupos principais de encaixantes, norte-sul e leste-oeste; diversos lineamentos também foram colocados na ilustração, alguns de grandes extensões e outros menores, de vários tamanhos, lineamentos que cortam a área e os que são encontrados nas proximidades também foram extraídos principalmente em ambiente GIS. As estruturas deformacionais e magmáticas que envolvem as

rochas do CIVN e suas encaixantes, a relação de contato entre as litologias, bem como estruturas deformacionais e magmáticas serão apresentadas a seguir.

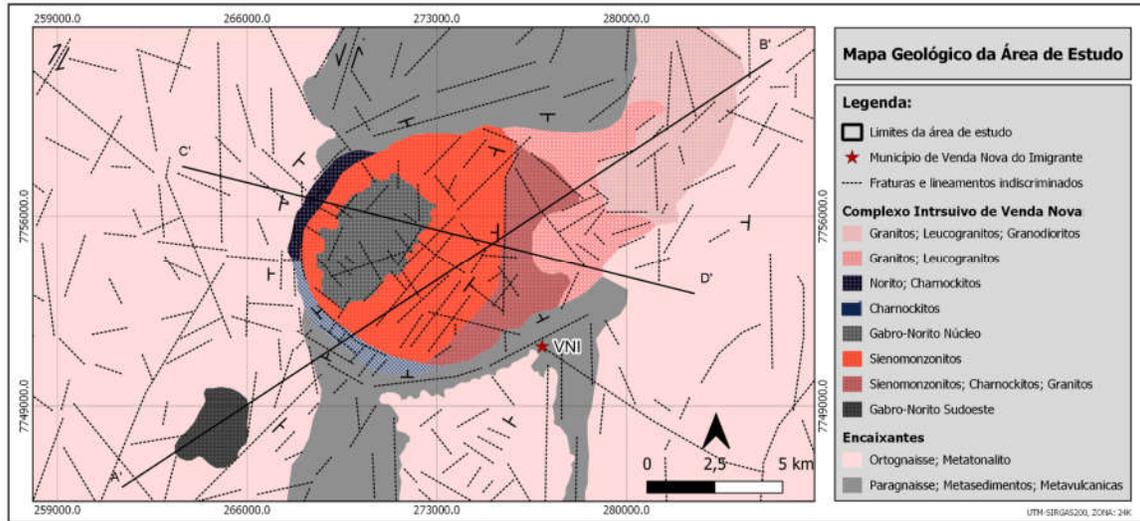


Figura 17. Mapa geológico da área de estudo.

ESTRUTURAS MAGMÁTICAS

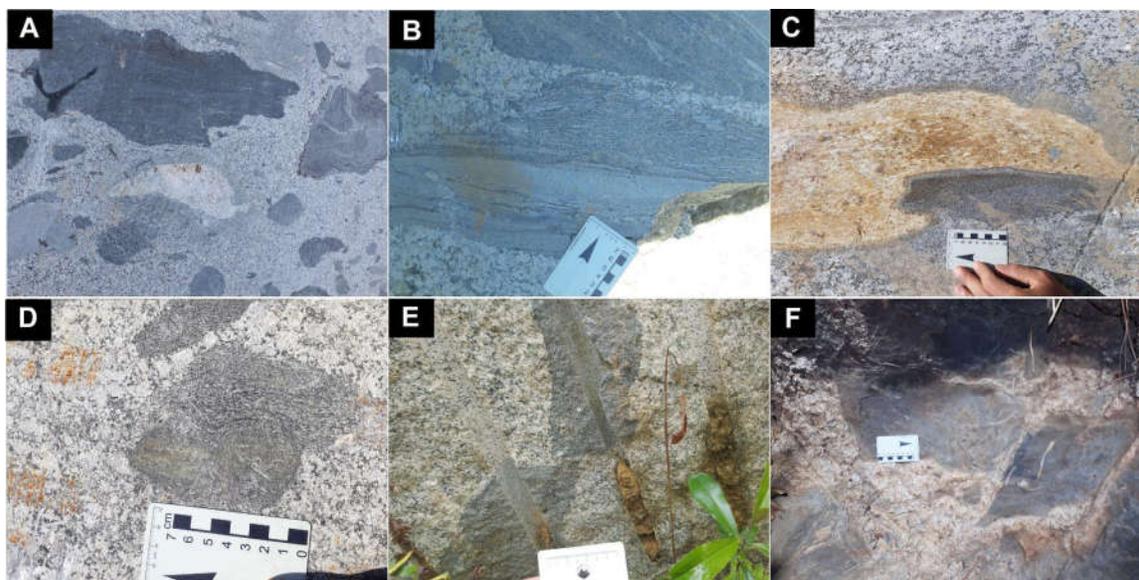
Com maior frequência pode-se observar em afloramentos estruturas como acamamento ígneo, fluxos magmáticos, xenólitos, enclaves, estruturas em rede, xenocristais, veios, diques, aplitos e pegmatitos. O acamamento ígneo (Figura 18. A, B e C) é um tipo de estrutura bem frequente nesta área, e pode-se ser observada principalmente nos núcleos do corpo geralmente nas redes de drenagem, apresentando espessuras variadas. Conjuntos de xenólitos e enclaves podem ser vistos principalmente na unidade dos Sienomonzonitos, onde afloram uma grande variedade desses fragmentos, por vez estes se encontram dispersos na matriz, em fluxos ou associados a outros fragmentos (Figura 18. D, E e F). Em geral, esses fluxos de direção N-S e NE-SW, com variados tipos de xenólitos e enclaves, de diferentes origens, composições, tamanhos, formas e contatos. Existem fluxos também são encontrados com fragmentos homogêneos, de mesma composição, apresentam-se com formas arredondadas ou retas, e às vezes com bordas de reação com diferentes graus de assimilação.

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuaí, Espírito Santo



Figuras 18. Estruturas de A, B e C representantes do acamamento magmático que ocorre nos núcleos. Em D, E e F a representação dos fluxos de fragmentos, xenólitos ou enclaves registrados.

Fragmentos do tipo xenólito (Figura 19) são bem frequentes, principalmente nas bordas, em maior parte são pedaços das encaixantes englobados na rocha hospedeira por mecanismos de colocação do corpo. Esses fragmentos são encontrados em variadas formas, composição e tamanhos. Os xenólitos identificados são de gnaisses, quartzito, anfibolitos e granitóides.



Figuras 19. Representação de xenólitos das encaixantes do corpo.

Enclaves autólitos (Figura 20) são relacionados a pulsos magmático anteriores que fazem parte do corpo intrusivo, e ocorrem com maior frequência nos Sienomonzonitos, são fragmentos das unidades do Gabro-norito, Charnockitos e Leucogranito, que se apresentam de formas alongadas e ovaladas, com bordas de resfriamento ou reação, hibridização ou assimilação com o fluxo hospedeiro.

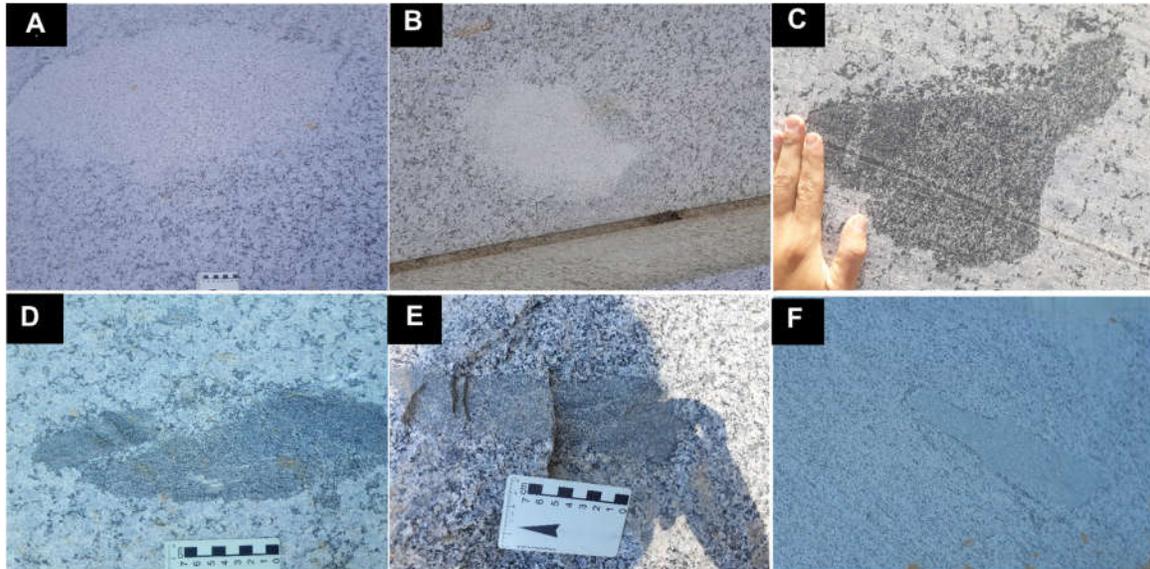


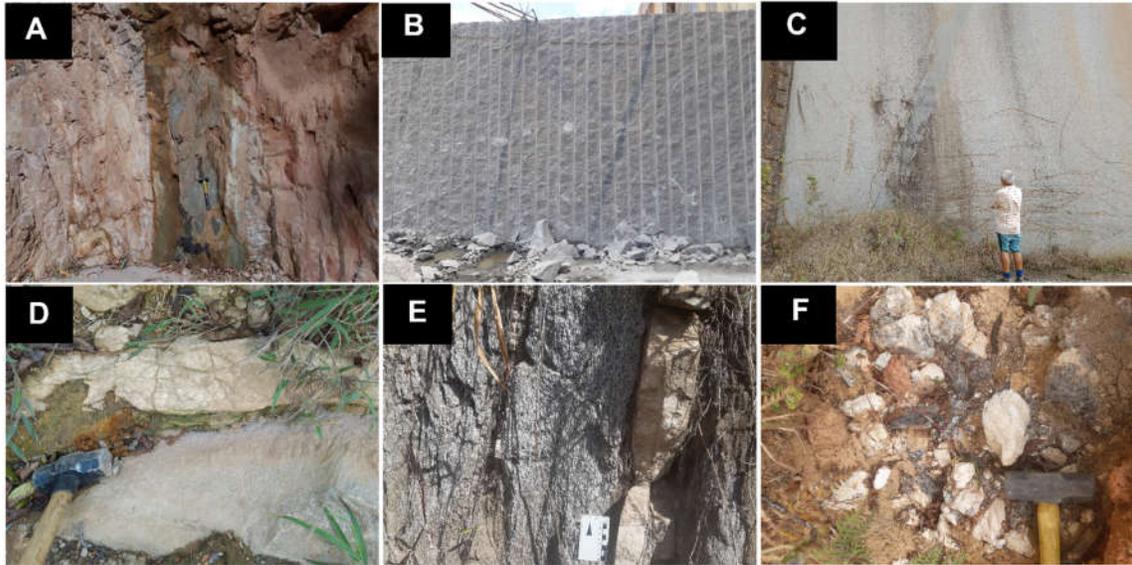
Figura 20. Representação dos enclaves autólitos A) e B) Leucogranitos, C) e D) Enclaves Máficos, E) Charnockito e F) Gabro-Norito.

Estruturas de pulsos tardios afloram em toda a área, e são representadas principalmente por diques graníticos e máficos, aplitos, venulações quartzo-feldspato e corpos pegmatíticos (Figura 21). Em geral, apresentam tamanhos variados, em relação a composição e textura os diques podem variar de composições ácidas, básicas e intermediárias, os diques pegmatíticos são de composição granítica e granulação grosseira, sendo associados aos últimos estágios das intrusões magmáticas, já os diques apliticos apresentam composição granítica e também máfica de granulação muito fina.

Evidências diretas da coexistência de dois magmatismos contemporâneo podem ser vistas em algumas partes do corpo através de estruturas em rede, zonas híbridas, xenocrystal e afloramentos com variações composicionais de fracionamento. Enclaves microgranular máficos são bem observados na unidade dos sienomonzonitos, comumente com contatos bem definidos ou irregulares com bordas de reação, gerando por vezes pequenas faixas de mixing

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuai, Espírito Santo

evidenciando o contraste textural, composicional e das fontes magmáticas (Figura 22. A, B, C e D). Por vezes esses enclaves formam trilhas quando são erodidos formando marmitas comumente observadas em diversas escarpas, lajedos e grandes blocos.



Figuras 21. Estruturas de fluxo tardio, A) e B) Diques Máficos; C) e D) Diques intermediários e félsicos; E) Veios Quartzo-Feldspato e F) Pegmatito.



Figuras 22. Registros de campo de estruturas magmáticas que evidenciam a relação de contato entre as unidades do CIVN. Em: A) e B) transição de sienomonzonito para

charnockito, C) e D) enclaves microgranulares máficos e suas formas de ocorrência; E) e F) estruturas em rede.

As estruturas que ocorrem estão sempre relacionadas a processos magmáticos e deformacionais recorrentes da evolução, geração, transporte e colocação dos corpos que resultam em diferentes estruturas de deformação em estado sólido, sub-sólido e até em estado líquido do magma que dominam em determinadas zonas do corpo.

GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS MAIORES E MENORES

A análise química de elementos maiores e menores teve como objetivo exploratório como complemento às descrições petrográficas de campo, a fim de se obter dados e informações sobre a classificação, gênese das unidades litológicas e processos magmáticos associados ao corpo intrusivo. Para esse estudo, foram selecionadas nove amostras das unidades mais representativas e de litologias associadas. Sendo elas: PV - 08 (Granito); PV - 09 (Gabro-Norito); PV - 10 (Sienomonzonito); PV - 21 e PV - 23 (Charnockitos I e II); PV - 27 (Gabro-Norito); PV - 29B (Leucogranito); PV - 43 (Norito da borda) e PV - 67 (Gabro-Norito).

Para a classificação dos litotipos foram utilizados dois diagramas, um do total de álcalis-sílica (TAS, DE COX et al., 1979) (Figura 23. A) e o R1-R2 (DE LA ROCHE et al., 1980) (Figura 23. B) para comparação do comportamento dados em ambos. Para o índice de alumínio, as amostras foram classificadas no diagrama A/CNK - A/NK (SHAND 1943) (Figura 23. C). A distinção das afinidades magmáticas das amostras são apresentadas nos diagramas AFM (IRVINE E BARAGAR, 1971) (Figura 23. E) e no de SiO₂ - K₂O (PECCERILLO E TAYLOR, 1976) (Figura 23. D).

De acordo com o diagrama TAS, temos amostras com afinidade Alcalina (PV - 10 e PV - 27), Subalcalinas (PV - 21, PV - 23, PV - 29B e PV - 43) e, as que se encontram no limite desses (PV - 09 e PV - 67). As amostras também são discriminadas conforme sua composição, podendo ser ultrabásica (PV - 67 e PV - 43), básicas (PV - 09 e PV - 27), intermediárias (PV - 10, PV - 21 e PV - 23) e ácidas (PV - 08 e PV - 67), e a nomenclatura apresentadas para os litotipos são semelhantes com as utilizadas em campo, nas amostras definidas como Gabros (PV - 08, PV - 27 e PV - 67), Granitos (PV - 08 e PV - 29B), Sienito (PV - 10), as amostras dos Charnockitos (PV - 21 e PV - 23) são de composição Diorítica.

O diagrama R1-R2 (DE LA ROCHE et al., 1980) é também utilizado para classificação de rochas ígneas plutônicas onde são considerados as proporções de cátions expressos sob a forma de milicátions, o que favorece os dados de elementos maiores. Nele as amostras são

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuai, Espírito Santo

classificadas como: Gabro (PV - 09), Gabro-Diorito (PV - 21) e no limite com o Monzo-Gabro (PV - 23), Sieno-Gabro (PV - 27); Sieno-Diorito (PV - 10); os Granitos (PV - 08 e PV - 29B) e rochas de composição ultramáficas (PV - 43 e PV - 67). O diagrama de Shand (1943) classifica as amostras em função do teor de alumínio presente, a maior parte das amostras são apresentadas como metaluminosas, apresentando membros com índices elevados de alumínio PV - 43 e PV - 67, e outros com valores aproximados, uma amostra, PV - 29B, é classificada como Peraluminosa, e outra PV - 08 se encontra no limite com a zona metaluminosa. O diagrama AFM permite identificar a evolução de magmas na diferença dos *trends* toleítico e cálcio-alcalino na série magmática subalcalina, a maior parte das amostras se encontram no campo das calcio-alcalinas e outras duas amostras PV - 43 e PV - 67, apresentam afinidades toleíticas. O diagrama SiO₂ - K₂O (PECCERILLO e TAYLOR, 1976), considera a proporção de peso em percentagem dos óxidos referentes, para a distinção das séries magmáticas em toleíticas, calcioalcalina de alto-K e shoshonítica, as amostras mais representativas para esse diagrama, são PV - 09, PV - 21 e PV - 23, que possuem afinidade calcio-alcalina e PV - 27 que cai no campo da série shoshonítica, as demais amostras não são representativas na classificação desse diagrama.

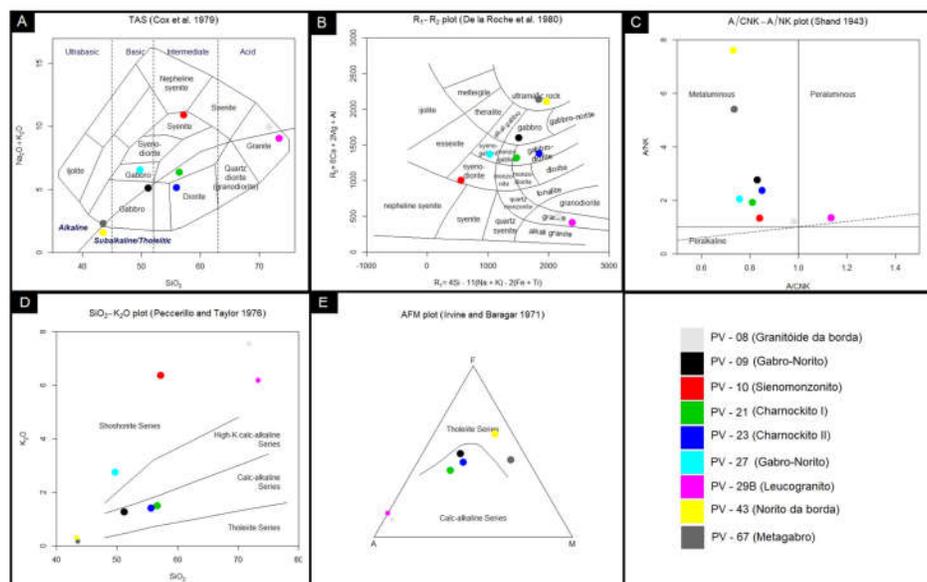


Figura 23. A) Diagrama TAS (COX et al., 1979) para rochas plutônicas para a discriminação das amostras em relação SiO₂ vs (Na₂O + K₂O) no diagrama binário; B) Diagrama binário R1 - R2 (DE LA ROCHE et al., 1980) para rochas plutônicas, onde as amostras discriminadas R1: 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti); e R2: 6Ca + 2Mg + Al); C) Classificação das amostras de acordo com o índice de alumínio do diagrama A/CNK - A/NK (SHAND 1943) para

classificação em metaluminosos, peraluminosos e peralcalinos; D) Diagrama SiO_2 - K_2O (PECCERILLO e TAYLOR, 1976); E) Diagrama AFM (IRVINE e BARAGAR, 1971).

Um dos diagramas de variação mais amplamente usados são os diagramas de Harker (Figura 24), onde o óxido de silício (SiO_2) é plotado no eixo x do diagrama e os outros óxidos são plotados no eixo y. Este diagrama é usado como um indicador da evolução do magma e pode também indicar a cogeneticidade dos magmas na suíte estudada. As correlações ou tendências (*trends*) nos diagramas de Harker indicam, ao menos, três famílias, o que pode estar relacionado a vários processos ígneos em séries magmáticas.

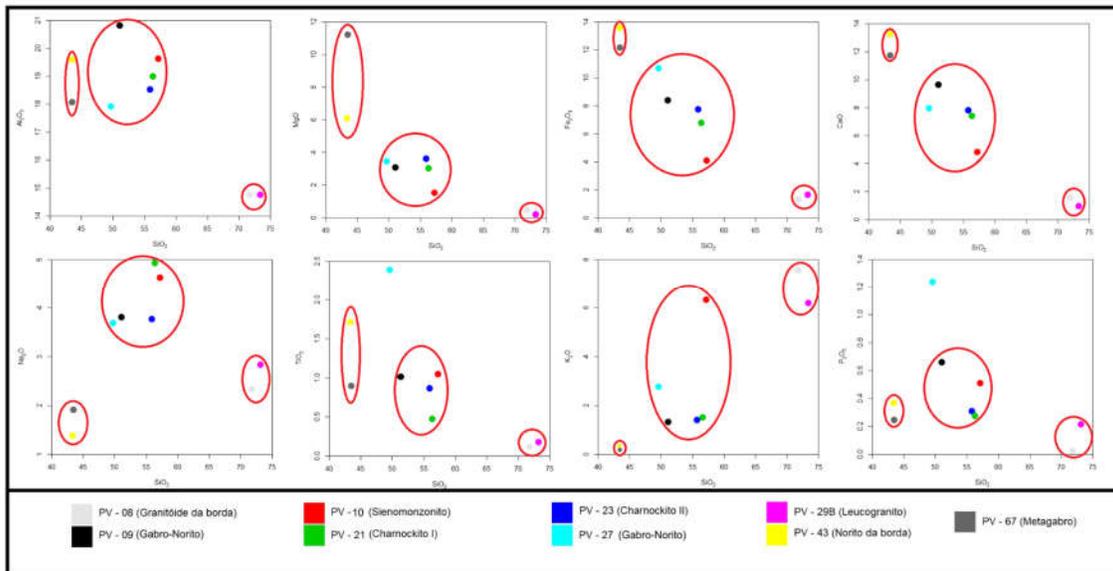


Figura 24. Diagramas de variação binários, utilizando SiO_2 como índice de diferenciação no eixo x em comparação ao eixo y e representados pelos óxidos Al_2O_3 , MgO , FeO , CaO , Na_2O , TiO_2 , K_2O e P_2O_5 .

Correlações negativas mais evidentes entre as amostras são discriminados por *trends* retilíneos, inversamente proporcional para os diagramas de MgO , Fe_2O_3 e CaO principalmente, onde as rochas PV - 43 e PV - 43 e PV - 67 são os extremos mais altos do eixo y em relação às amostras PV - 29B e PV - 08 que apresentam maiores valores de SiO_2 em relação aos outros elementos. Correlações positivas ou diretamente proporcionais podem ser observadas nos diagramas K_2O e Na_2O porém não apresentam *trends* específicos. As rochas PV - 29B e PV - 08 apresentam uma correlação negativa em relação às outras amostras, onde, nos diagramas Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , TiO_2 , P_2O_5 , as amostras estão localizadas sempre na parte inferior esquerda do eixo x representado por altos valores de SiO_2 . Apenas no diagramas K_2O e N_2O

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuai, Espírito Santo

elas se apresentam com valores mais elevados no eixo y. Outras duas amostras, PV - 43 e PV - 67, apresentam afinidade entre si e discrepância das demais rochas no diagramas, estão sempre nas proximidades do eixo y apresentando baixos valores de SiO₂ em relação aos demais elementos. As amostras PV - 10, PV - 27 e PV - 09 apresentam uma correlação, evidenciada principalmente nos diagramas MgO, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O e P₂O₅ onde PV - 09 sempre se encontra entre as amostras PV - 10 e PV - 27, e nos diagramas CaO, K₂O, e P₂O₅ também são discriminados *trends* mas não tão retilíneos e com variação na posição das amostras. O que sugere que as unidades amostradas, PV - 10 e PV - 27, apresentam uma relação de mistura ou assimilação magmática. As amostras PV - 21 e PV - 23, mostram uma estreita afinidade em quase todos diagramas de harker.

DISCUSSÕES

Os aspectos de campo, petrográficos, estruturais e de química apresentados neste trabalho são condizentes com os da literatura, enquadrando as características gerais do CIVN na categoria da Supersuíte G5 do estágio pós-colisional do Orógeno Araçuai (PEDROSA-SOARES e WIEDEMANN-LEONARDOS, 2000; HEILBRON et al., 2004; DE CAMPOS et al. 2016). As maiores evidências desse contexto podem ser bem visualizadas na geomorfologia do corpo e na presença de rochas félsicas nas bordas e máficas no núcleo com ocorrência localizadas de rochas de composição intermediária marcando a associação de rochas granito-sienomonzonito-charnockitos-diorito-gabro-norito predominante na área de estudo (MENDES, 1996; LUDKA et al. 1998; MENDES e CAMPOS, 2012).

O registro de estruturas que mostram a correlação temporal entre as rochas félsicas das bordas e as máficas do núcleo é muito bem evidencia em campo e em micro petrográfica marcando a coexistência contemporânea de diferentes pulsos magmáticos, concordante ao contexto evolutivo do Orógeno Araçuai (WIEDEMANN-LEONARDOS et al. 2000; DE CAMPOS et al. 2016). Isso condiz também com a ideia da ocorrência de diferentes zonas que caracterizam a diferença na intensidade atuante do processo de mistura entre magmas, representados através do conjunto de estruturas de campo e microestruturas relacionados a mingling e mixing. (HIBBARD, 1995).

Os mecanismos de colocação dos corpos magmáticos durante o estágio pós-colisional foi marcado pela injeção de vários pulsos de magmas e pela ascensão principalmente na forma diapiros que usaram falhas dúcteis, rúpteis e grandes zonas de cisalhamentos como conduto até

atingirem o seu nível de alojamento na crosta (PEDROSA-SOARES e WIEDEMANN-LEONARDOS, 2000; HEILBRON et al. 2004; DE CAMPOS et al. 2016). As maiores evidências apresentadas que podem representar essa ideia é a forma concêntrica do corpo e a relação entre a foliação das encaixantes nas bordas com o formato do corpo, grande variedade de xenólitos e enclaves, e a presença de estruturas de fluxo magmático tanto na parte interna quanto na externa do corpo.

A quantidade, diversidade e proximidade de corpos ígneos intrusivos pré-sin-tardi a pós-colisionais presente no estado do Espírito Santo é um contexto bastante peculiar e específico por apresentar características semelhantes, sendo os contextos mais próximos ao Venda Nova: os Complexos Intrusivos de Castelo, Pedra Azul, Afonso Cláudio, Santa Angélica, Mimoso do Sul, Conceição de Muqui e outros que expõem a mesma conjuntura de associação de rochas correlatas ao ambiente tectônico. (WIEDEMANN-LEONARDOS et al., 2000; CAMPOS et al., 2016). Com isso, podemos entender que esse parte do Espírito Santo, dentro do contexto do Orógeno Araçuaí, foi marcado pela injeção de múltiplos lotes magmáticos correlatos a associações ígneas de composições variáveis, contaminadas ou misturadas, de diferentes fontes crustais e mantélica correspondentes às taxas de mudanças no regime tectônico atuante.

Existem outros trabalhos que aqui não foram citados e tiveram o mesmo contexto de estudo focando em outras temáticas ou áreas, também pesquisas mais detalhadas que ainda estão em desenvolvimento. Contudo, para melhorar a nossa compreensão sobre essas associações ígneas aflorantes na região, pretende-se com base nesse trabalho, realizar estudos futuros de maior detalhe e comparativos para investigação dessas questões dentro do contexto temporal e espacial da configuração tectônica do Orógeno Araçuaí.

CONCLUSÃO

Para uma abordagem simplificada sobre o acervo de dados gerados para o Complexo Intrusivo de Venda Nova neste trabalho, as informações que atendem aos objetivos desta pesquisa são:

- 1) A geomorfologia é representada por um formato elíptico de zonamento inverso com bordas exibindo altos picos altimétricos, serras e relevos escarpados onde afloram rochas de composição graníticas e sienomonzoníticas, em contraparte, o núcleo central e o núcleo a sudoeste, onde vão encontrados os vales, de composição gabraica

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuaí, Espírito Santo

apresentam as menores cotas, formas ovaladas e relevo muito arrasado onde predominam extensões de coberturas de colúvios e aluviões que formam morros e morrotes meia laranja.

- 2) A associação de rochas que melhor pode ser observada que se torna mais representativa para esta área são granito-sienomonzonito-charnockitos-diorito-gabro-norito, e toda a variação composicional de membros intermediários. A assembleia mineral constituinte comum as rochas félsicas são feldspatos, biotita, quartzo e nas máficas plagioclásio, piroxênio, anfibólio, hornblenda e biotita, além de inclusões de apatita, zircão e alguns opacos que são comuns a todos.
- 3) As estruturas registradas são acamamento, foliação e segregação magmática, enclaves autólitos, xenólitos, estruturas em rede, septos de encaixantes, xenocristal, fraturas, veios, diques e pegmatitos. Microtexturas minerais que ocorrem com maior frequência são: feições de deformação em estado sólido como extinção ondulante em alguns minerais como quartzo, biotita e feldspato, deformação/alteração em plagioclásios, texturas de corona, aglomerados máficos, mimerquita, aspecto poiquilitico, inclusões de apatita acicular, subgrãos e novos grãos.
- 4) Os dados de química de elementos maiores demonstram caráter meta a peraluminoso e, maior número de unidade se caracteriza como rochas alcalinas, embora haja unidades subalcalinas. Além de indicar a existência de pelo menos três fontes magmáticas contribuintes ao CIVN.

Os extensos volumes de magmas produzidos, principalmente no período pós-colisional do Orógeno Araçuaí, deram origem às associações marcada uma variedade de granitos, charnockitos e sienomonzonitos, até membros de composição extrema máfica como gabros e noritos, e toda a linhagem de rochas intermediários. Essas características indicam a injeção de múltiplos pulsos, mistura de magmas e magmatismo bimodal, condizente com a evolução geológica dos corpos pós-colisional do Espírito Santo.

REFERÊNCIAS

ALKMIM, F.F., MARSHAK, S., PEDROSA-SOARES, A.C., PERES, G.G., CRUZ, S.C.P., WHITTINGTON, A. **Kinematic evolution of the Araçuaí–West Congo orogen in Brazil**

and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research*, 149:43 – 63, 2006.

ALKMIM, F.F., KUCHENBECKER, M., REIS, H.L.S., PEDROSA-SOARES, A.C. The Araçuaí belt. In: Heilbron, M., Cordani, U.G, Alkmim F.F. (Eds.), **São Francisco Craton, Eastern Brazil**. *Regional Geology Reviews*, Springer International Publishing Co., pp. 255–276, 2017.

ARANDA, R.O., CHAVES, A.O., MEDEIROS JUNIOR, E.B., VENTURINI, JUNIOR, R. **Petrology of the Afonso Cláudio intrusive complex: new insights for the Cambro Ordovician post-collisional magmatism in the Araçuaí-West Congo orogen, southeast Brazil**. *Journal of South America Earth Science*. 98, 2020a.

BELLON, U.D., D'AGRELLA-FILHO, M.S., TEMPORIM, F.A., SOUZA JUNIOR, G.F., SOARES, C.C.V., AMARAL, C.A.D., GOUVEA, L.P., TRINDADE, R.I.F. **Building an inversely zoned post-orogenic intrusion in the Neoproterozoic-Cambrian Araçuaí orogen (Brazil)**. 2021.

CHAPPELL, B.W. **Magma Mixing and the production of compositional variation within granite suites: Evidence from the granites of Southeastern Australia**. *Journal of Petrology*, 37(3): 449-470, 1996.

DE CAMPOS, C., MENDES, J. C., LUDKA, I. P., MEDEIROS, S. R., COSTA-DE-MOURA, J., WALFASS, C.M. **A review of the brasiliano magmatism in southern Espírito Santo, Brazil, with emphasis on post-collisional magmatismo**. *Journal of the Virtual Explorer*, 17: 1-39, 2004.

DE CAMPOS C. P., MEDEIROS S.R., MENDES J.C., PEDROSA-SOARES A.C., DUSSIN I., LUDKA I.P., DANTAS E.L. **Cambro-Ordovician magmatism in the Araçuaí Belt (SE Brazil): snapshots from a post-collisional event**. *Journal of South American Earth Sciences*, 68:248-268, 2016.

HEILBRON M., PEDROSA-SOARES A.C., CAMPOS-NETO M.C., SILVA L.C., TROUW R., JANASI V.A. *Província Mantiqueira*. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro,

Petrografia e geoquímica (elementos maiores) do Complexo Intrusivo de Venda Nova, Orógeno Araçuaí, Espírito Santo

B.B. Brito-Neves (eds.). **Geologia do Continente Sul-Americano**. Editora Beca, São Paulo, p.: 203 – 234, 2004.

HIBBARD, M.J. **Petrography to Petrogenesis**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey: 587p, 1995.

HORN, H.A. AND WEBER-DIEFENBACH, K., 1987. **Geochemical and genetic studies of three inverse zoned intrusive bodies of both alkaline and subalkaline composition in the Araçuaí-Ribeira Mobile Belt (Espírito Santo, Brazil)**. Rev. Brasileira de Geociências, 17 (4): 488-497, 1987.

LOPES DE MACÊDO, I.M., GERALDES, M.C., DE ABREU MARQUES, R., GONZAGA DE MELO, M., TAVARES, A.D., ALVES MARTINS, MARIA.VIRGÍ., OLIVEIRA, H.C., RODRIGUES, R.D. **New clues for magma-mixing processes using petrological and geochronological evidence from the Castelo Intrusive Complex, Araçuaí Orogen (SE Brazil)**, Journal of South American Earth Sciences. 2022.

LOPES DE MACÊDO, I.M., GERALDES, M.C., DE ABREU MARQUES, R., GONZAGA DE MELO, OLIVEIRA, H.C., RODRIGUES, R.D.. **Evidências De Mistura De Magmas No Complexo Intrusivo Pedra Azul, Orógeno Araçuaí, Sul Do Estado Do Espírito Santo**. In: Anais do Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Anais...Diamantina(MG) Online, 2022.

LUDKA, I.P. **Geologia, petrografia e geoquímica do Complexo intrusivo Jacutinga-Torre, Mimoso do Sul, Es**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1991.

LUDKA, I.P., WIEDEMANN, C.M., TOPFNER, C. **On the origin of incompatible element enrichment in the Venda Nova pluton, State of Espírito Santo, southeast Brazil**. J. S. Am. Earth Sci. 11, 473–486, 1998.

MEDEIROS, S.R., WIEDEMANN, C.M., MENDES, J.C. **Post-collisional magmatism in the Araçuaí-Ribeira Mobile belt: geochemical and isotopic study of the Várzea Alegre intrusive complex (VAIC), ES, Brazil**. Rev. Bras. Geociências. 30 (1), 30 e 34, 2000.

MENDES, J.C. & DE CAMPOS, C.M.P. **Norite and charnockites from the Venda Nova Pluton, SE Brazil: Intensive parameters and some petrogenetic constraints.** *Geoscience Frontiers*, 3: 789-800, 2012.

PEDROSA-SOARES A.C., NOCE C.M., ALKMIM F.F., SILVA L.C., BABINSKI M., CORDANI U., CASTAÑEDA, C. **Orógeno Araçuaí: Síntese do conhecimento 30 anos após Almeida.** *Geonomos*, 15(1): 01 – 16, 2007.

PEDROSA-SOARES A. C., NOCE C. M., WIEDEMANN-1057 LEONARDOS C. M., PINTO C. P. **The Araçuaí– West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly.** *Precambrian Research*, 110: 307 – 323, 2001.

PETRICK, F. **Der Venda Nova Pluton im sudlichen Espírito Santo, Brasilien. Geologisch Kartierung des nordostlichen Teilgebietes sowie geochemisch-petrographische Brearbeitung der Mischgesteinszone von Syenomonzonit und Gabbro.** Relatório de Graduação, Universidade de Munique, 79 p., 1987.

SIGNORELLI, NICOLA. Folha Afonso Cláudio SF.24-V-A-II. Mapeamento Geológico. Geologia Regional SF.24-V-A-II. Escala 1:100.000, Brasil, Espírito Santo.

VIEIRA, Valter Salino et al. **Mapa geológico do estado do Espírito Santo.** Belo Horizonte: CPRM, 2018.

WIEDEMANN, C. M.; PENHA, H. M.; SCHMIDT-THOMÉ, R. Granitoids of Espírito Santo and Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geociências*, 17(4): 674-689, 1987.

WIEDEMANN-LEONARDOS, C.M., LUDKA, I.P., MEDEIROS, S.R., MENDES, J.C.; MOURA, J.C. **Architecture of Late Orogenic Plutons in the Araçuaí-Ribeira Folded Belt, Southeast Brazil.** *Gondwana Research*, 5(2): 381 – 399, 2002.

Capítulo 2

Isótopos Estáveis nas Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim - ES

*Mariana da Silva Trigo¹; Matheus Serri Moulim de Oliveira¹; Renato Ferreira Miranda¹;
Mirna Aparecida Neves¹*

RESUMO. Os isótopos estáveis de hidrogênio (^2H ou deutério) e oxigênio (^{18}O) têm sido utilizados como traçadores naturais que podem ajudar no entendimento da proveniência, recarga e sistema de fluxo das águas subterrâneas. Em estudos do Sistema Aquífero Cristalino, cujo comportamento é heterogêneo e anisotrópico, essa ferramenta pode se tornar uma importante aliada. A Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI), localizada no sul do estado do Espírito Santo, tem a maior parte de seu território sobre rochas cristalinas, que compõem o Sistema Aquífero Cristalino. A região possui relevo acidentado, com altitudes que variam de zero a 2.890 metros acima do nível do mar ao longo de apenas 120 km desde o litoral. Tais fatos estimularam a realização desta pesquisa, em busca de relações entre a assinatura isotópica das águas pluviais, fluviais e subterrâneas. A partir desse trabalho de reconhecimento, foram definidas as assinaturas isotópicas das diversas matrizes hídricas, suas relações com a precipitação e continentalidade e foram investigadas, de maneira preliminar, algumas variações locais, abrindo caminhos para futuros trabalhos em escala de detalhe.

PALAVRAS-CHAVE. Isótopos Ambientais, Aquíferos Fraturados, Recarga.

INTRODUÇÃO

O estudo de isótopos estáveis de Hidrogênio (^2H , ou deutério - D) e Oxigênio (^{18}O) nas águas tem sido utilizado como ferramenta para entender os processos de recarga e fluxo em aquíferos fraturados (e.g. TWEE et al., 2005; SUKHIJA et al., 2005). Além dos mecanismos de recarga e circulação, medidas da assinatura isotópica das águas permitem traçar os processos hidrológicos naturais, bem como possíveis interferências antrópicas (e.g. YANG e HAN, 2020).

¹Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo/UFES, Alegre, ES

Isótopos Estáveis nas Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim - ES

A Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI), situada no sul do Estado do Espírito Santo, possui grande parte do território constituído por rochas ígneas e metamórficas que compõem o Sistema Aquífero Cristalino, onde o armazenamento e a percolação da água subterrânea são controlados principalmente por fraturas e outras descontinuidades presentes nas rochas. A proximidade do litoral e as variações topográficas, com relevo predominantemente acidentado e altitudes que variam de zero até 2.890 metros acima do nível do mar ao longo de uma distância horizontal de menos de 120 km, tornam a bacia uma área interessante para o estudo do comportamento dos isótopos estáveis ^{18}O e ^2H (ou deutério - D) e os controles do meio físico sobre a assinatura isotópica das águas.

O conteúdo aqui apresentado foi gerado ao longo de vários anos de pesquisa, fruto do trabalho de professora(e)s e aluna(o)s do curso de Geologia do CCENS/UFES, durante o desenvolvimento do projeto HIDROFRAT - Hidrogeologia de Aquíferos Fraturados: entendimento da circulação da água e de contaminantes para uma melhor gestão dos recursos hídricos, financiado pela FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos; o qual foi realizado em parceria com a USP, UnB e UFRGS. O objetivo desse capítulo é apresentar os dados de isótopos estáveis em águas pluviais, superficiais e subterrâneas da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI) e investigar as relações com a precipitação, continentalidade, além de realizar um estudo preliminar de variações e inter-relações locais das diversas matrizes em áreas selecionadas.

ÁREA DE ESTUDOS

A BHRI envolve a área de drenagem do rio Itapemirim e de seus afluentes, que drenam as águas desde a região serrana do sul do Espírito Santo, até o litoral (Figura 1). O rio Itapemirim é formado pela confluência dos rios Braço Norte Direito e Braço Norte Esquerdo no município de Alegre, a partir de onde percorre cerca de 135 km até sua foz, em Marataízes. As nascentes localizam-se na região do Parque Nacional do Caparaó e na Serra de São Domingos, próximas à divisa com o Estado de Minas Gerais. Os principais afluentes do Rio Itapemirim são os rios Castelo, em sua margem esquerda, e o Muqui do Norte, em sua margem direita.

Segundo a classificação climática de Köppen, ocorrem na região as zonas climáticas Cw (subtropical de altitude), com inverno seco e verão ameno (Cwb) e subtropical (Cwa) com inverno seco (temperaturas inferiores a 18°C) e verões quentes (temperaturas superiores a 22°C); além da zona Aw (clima tropical com inverno seco) (ALVARES et al., 2013). Há influência da massa de ar Tropical Atlântica, quente e úmida, formada no Atlântico Sul,

próximo ao Trópico de Capricórnio, e da massa de ar Polar Atlântica (SENE e MOREIRA, 1998). Essa massa de ar fria, também conhecida como “vento sul”, atinge a região durante o inverno, quando ganha maior força e se torna seca, devido ao resfriamento do hemisfério sul nessa época.

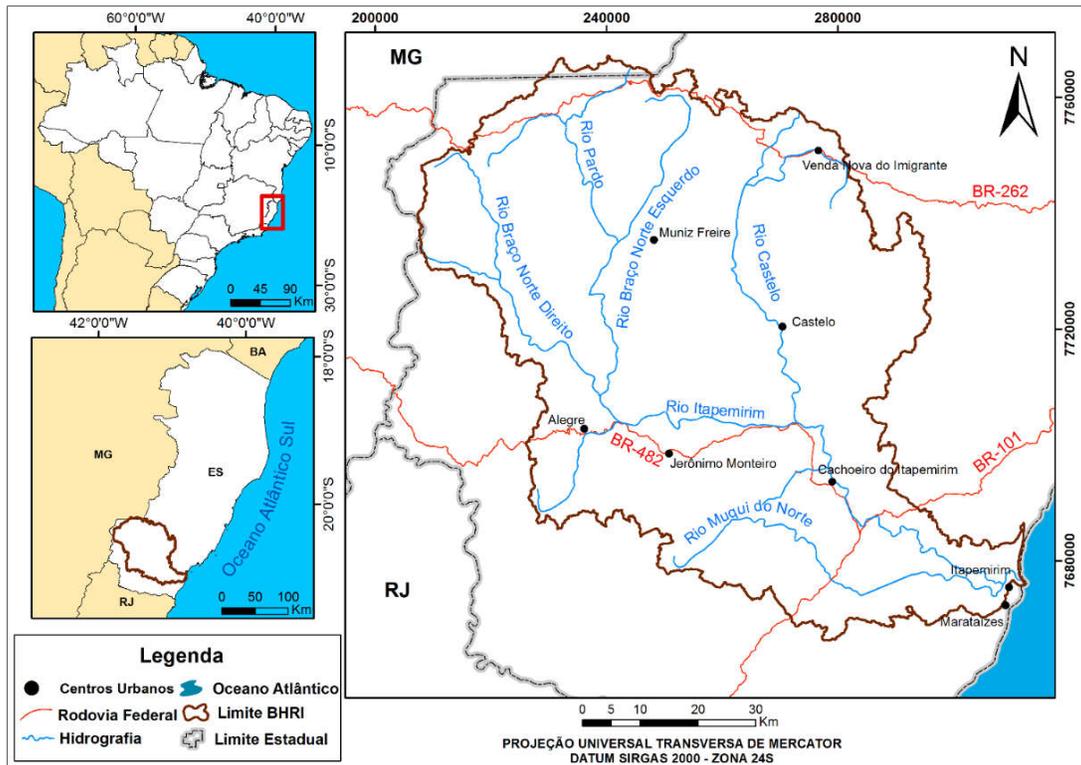


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI) com os principais rios e centros urbanos. Fonte dos dados (GEOBASES, 2002).

ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE HIDROGÊNIO (^2H) E OXIGÊNIO (^{18}O) NA ÁGUA

Isótopos são átomos com o mesmo número de prótons e diferentes números de nêutrons. Essa diferença no número de nêutrons significa que um mesmo elemento químico, com o mesmo número atômico, possua massas diferentes e ocupe a mesma posição na tabela periódica. Eles podem ser divididos em dois tipos fundamentais: isótopos estáveis e instáveis, também chamados radioativos (KENDALL e CALDWELL, 1998). Isótopos estáveis são definidos como núclídeos (átomo específico de isótopos) que aparentemente não decaem para outros isótopos na escala do tempo geológico, mas que podem ser produzidos pelo decaimento de isótopos radioativos (ALLEGRE, 2008). O termo “estável” é relativo e depende dos limites de detecção dos tempos de decaimento radioativo (HOEFS, 2009). Isótopos radioativos ou

Isótopos Estáveis nas Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim - ES

instáveis são nuclídeos que se desintegram espontaneamente ao longo do tempo para formar outros isótopos; durante esse processo, emitem partículas alfa ou beta e, às vezes, raios gama (ALLEGRE, 2008).

Os isótopos estáveis de um átomo contêm o mesmo número de elétrons na eletrosfera, portanto, suas propriedades químicas não se alteram substancialmente. Porém, as variações no número de nêutrons promovem diferenças na massa atômica e causam comportamento distinto dos isótopos. A abundância relativa entre os vários isótopos na natureza ocorre em função de um processo denominado fracionamento isotópico. O fracionamento pode ocorrer por mudança de fase ou estado, diferenças na taxa de reação química e diferenças na velocidade de difusão molecular (CLARK e FRITZ, 1997).

Na natureza, as razões isotópicas podem ser alteradas por processos de difusão, evaporação, condensação, cristalização, sublimação, dissolução, precipitação e por reações químicas de substituição (SUGUIO, 2006). Quanto maior a diferença de massa entre os isótopos de um elemento, maior o fracionamento. A força das ligações químicas envolvendo diferentes espécies isotópicas geralmente é diferente, sendo que as moléculas que contêm os isótopos pesados, ou seja, de maior massa, são mais estáveis (têm uma energia de dissociação maior) e têm a tendência de sofrer precipitação ou condensação com maior facilidade do que as moléculas com isótopos mais leves, os quais, pelo contrário, são mais facilmente evaporados e mobilizados (KENDALL e CALDWELL, 1998; SUGUIO, 2006).

Para os elementos com números atômicos baixos, estas diferenças de massa são grandes o suficiente para que as reações fracionem ou alterem as proporções relativas dos diferentes isótopos do mesmo elemento em vários compostos. Como resultado dos processos de fracionamento, águas e solutos frequentemente desenvolvem composições isotópicas únicas, que podem ser usadas como indicativos de sua fonte ou dos processos em que foram formados (KENDALL e CALDWELL, 1998). Estas variações na composição isotópica são extremamente sutis e são geralmente expressas em uma unidade específica, denominada δ (Equação 1).

$$\delta = \frac{\text{razão isotópica da amostra} - \text{razão isotópica padrão}}{\text{razão isotópica padrão}} \times 10^3 \quad \text{Equação 1}$$

Em última análise, δ é um desvio padrão relativo expresso como o número de partes por mil (‰). Relações isotópicas são expressas com o isótopo mais pesado no numerador (ALLEGRE, 2008). Se δ for positiva, então a amostra é mais enriquecida em isótopos pesados

do que o valor padrão; se δ for negativa, então a amostra é mais empobrecida em isótopos pesados do que o valor padrão.

Como as variações isotópicas são pequenas na natureza, mede-se os desvios das razões isotópicas absolutas de $\delta^{18}\text{O}$ e δD (ou ^2H) em relação à água oceânica média padrão (*Viena Standard Mean Ocean Water* ou V-SMOW), calculado para representar a composições isotópicas das águas pluviais no mundo. Como exemplo, apresenta-se a Equação 2.

$$^{18}\text{O}(\text{ouD}) = \left\{ \frac{\left[\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{amostra}} - \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{VSMOW}} \right]}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{VSMOW}}} \right\} \times 10^3 \quad \text{Equação 2}$$

Os isótopos que têm ocorrência natural e que acompanham os ciclos naturais do meio ambiente (ciclo hidrológico, do carbono e outros) são denominados isótopos ambientais. A maioria dos estudos com isótopos ambientais tem sido centrada na utilização dos isótopos de hidrogênio (^1H , ^2H , ^3H), carbono (^{12}C , ^{13}C , ^{14}C), nitrogênio (^{14}N , ^{15}N), oxigênio (^{16}O , ^{18}O) e enxofre (^{32}S , ^{34}S). Em particular, os isótopos ^{16}O , ^{18}O e ^1H , ^2H (ou D) e ^3H são parte integrante das moléculas de água (CLARK e FRITZ, 1997).

No contexto hidrológico e hidrogeológico, os isótopos ambientais são utilizados como traçadores (de águas superficiais e subterrâneas), em estudos de proveniência, de recarga e de idade da água em um aquífero. Utiliza-se um padrão de referência conhecido como *Global Meteoric Water Line* (GMWL) ou Reta Meteórica Global, que se baseia em dados isotópicos de precipitação de várias partes do mundo. Descrita na Equação 3, a V-SMOW apresenta um coeficiente de correlação (R^2) maior que 0,95 refletindo o fato de que os isótopos de oxigênio e hidrogênio estão intimamente associados em moléculas de água; por conseguinte, as relações isotópicas e do fracionamento dos dois elementos são normalmente discutidos em conjunto (CRAIG, 1961).

$$D = 8^{18}\text{O} + 10 \quad \text{Equação 3}$$

O fator 10, que corresponde ao coeficiente linear da reta, é denominado excesso de deutério ($d = \delta\text{D} - 8 \delta^{18}\text{O}$) e é definido por DANSGAARD (1964) como desvio na reta meteórica. O seu valor reflete o fracionamento que acontece durante processos de não-equilíbrio como a evaporação sobre a superfície do oceano e por massas de ar que passaram por episódios consecutivos de condensação e evaporação. Ele também fornece informação sobre as

Isótopos Estáveis nas Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim - ES

condições meteorológicas e sobre a distância das fontes evaporativas que deram origem às chuvas de um determinado local.

Durante a infiltração das águas pluviais e mesmo depois de elas se estabelecerem como águas subterrâneas, o fracionamento isotópico ocasionado principalmente pelos processos de evaporação, biológicos, mudanças climáticas e reações com o solo/rocha alteram a assinatura isotópica da água (CLARK e FRITZ, 1997). Nesse contexto, a caracterização isotópica da precipitação permite compreender os processos atuantes na subsuperfície, sendo que em estudos localizados o ideal é o uso de uma reta meteórica local.

A precipitação é a principal fonte de água subterrânea em praticamente todos os sistemas hidrológicos. Assim, o conhecimento dos fatores que controlam as composições isotópicas da precipitação antes e depois da recarga permite o uso de isótopos de hidrogênio e de oxigênio como marcadores de fontes e de processos hidrogeológicos.

Numa escala regional, as distribuições das composições isotópicas são controladas por vários fatores como: latitude (efeito latitudinal), altitude (efeito de altitude), distância da costa (efeito continental) e efeito de quantidade de precipitação (MOOK, 2001).

- Efeito da Latitude: A principal fonte de vapor de água para a atmosfera é a região aquecida do oceano representada pelo equador térmico. As nuvens possuem valores enriquecidos de ^{16}O em relação ao mar e depletadas de ^{18}O em relação à precipitação. Como a migração das nuvens ocorre a partir do Equador para latitudes maiores, quanto maior a latitude mais afastado do Equador térmico, mais depletadas em isótopos pesados se torna a precipitação.
- Efeito da Altitude: Na precipitação, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD decrescem com o aumento da altitude. Esse efeito está relacionado com a diminuição da pressão de vapor conforme aumenta a altitude; pois quanto menor a pressão de vapor, maior a dificuldade de formar chuvas, tornando necessária a redução da temperatura para a formação de chuvas, o que acaba por promover esse efeito de fracionamento.
- Efeito da Continentalidade: A partir do progressivo afastamento da linha de costa, o conteúdo de $\delta^{18}\text{O}$ e δD diminui, tornando a precipitação cada vez mais depletada em isótopos pesados (Figura 2).
- Efeito da Quantidade de Precipitação: É a relação entre a quantidade de precipitação e $\delta^{18}\text{O}$ e δD . Quanto maior a quantidade de precipitação maior a depleção em $\delta^{18}\text{O}$ e δD , podendo ocorrer em escala de horas em uma grande tempestade.

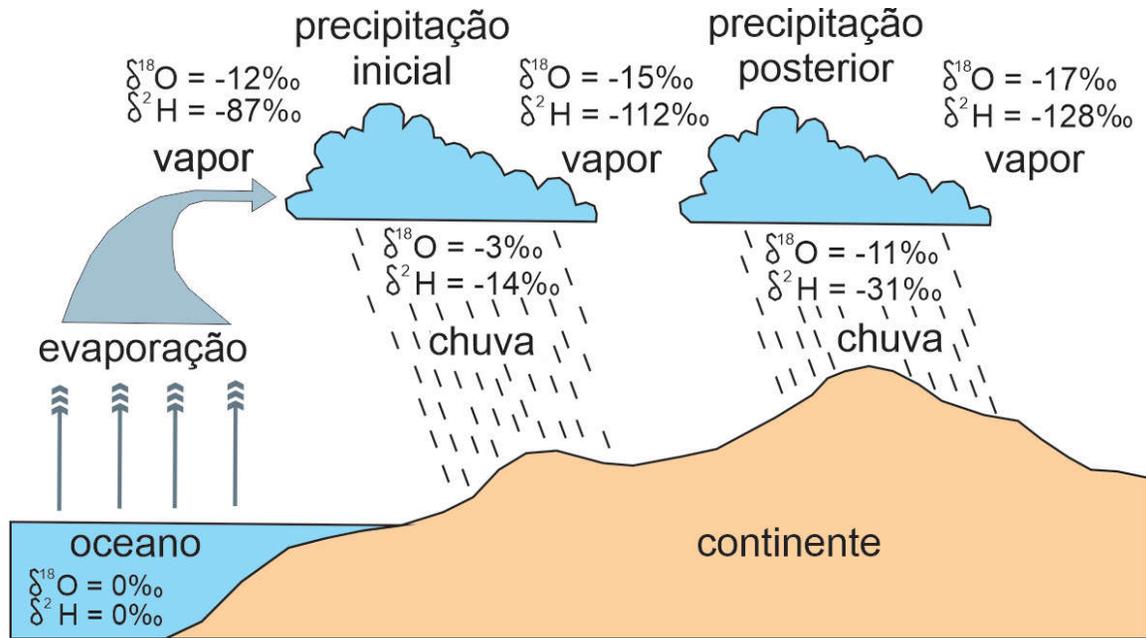


Figura 2. Efeito da continentalidade na variação isotópica dos vapores d'água e da precipitação ($\delta^2\text{H}$ também é chamado $\delta^2\text{D}$) (Modificado de Allegre, 2008).

METODOLOGIA

Levantamento de dados de precipitação pluviométrica

Foram coletados e organizados dados de pluviometria (precipitação mensal) de 10 estações pluviométricas existentes na BHRI, disponíveis na plataforma HidroWeb da Agência Nacional de Águas (BRASIL, 2018). Foi calculada a média aritmética de todas as estações e, a partir desses dados, foi traçada uma curva de precipitação que representa o padrão de chuvas na bacia durante os meses de setembro de 2013 a fevereiro de 2015.

Coleta de amostras e análise isotópica das águas

Foram coletadas amostras de águas pluviais, fluviais e subterrâneas, em pontos distribuídos ao longo da BHRI (Figura 3). Os pontos incluem 18 estações de coleta de águas pluviais, 37 poços para coleta de águas subterrâneas e 10 pontos de coleta de águas superficiais.

As coletas de água de chuva foram realizadas mensalmente entre novembro de 2013 a dezembro de 2014, quando foram gerados 234 dados amostrais. Posteriormente, foram

Isótopos Estáveis nas Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim - ES

conduzidas campanhas de coleta entre novembro de 2015 e julho de 2016, gerando mais 239 dados amostrais. Essas duas fases geraram, portanto, 473 medidas de isótopos estáveis na água de chuva.

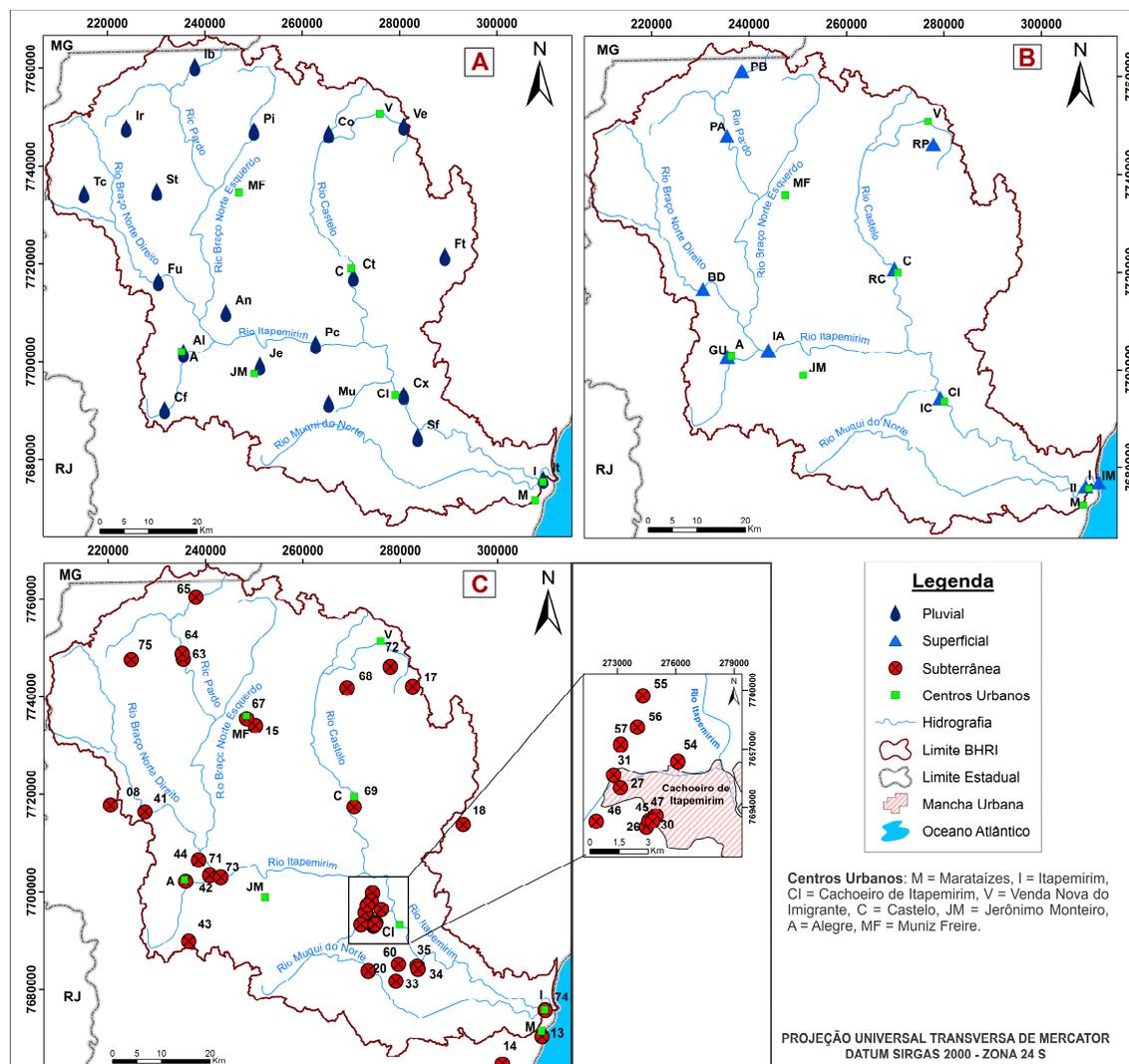


Figura 3. Pontos de coleta de águas (a) pluviais, (b) superficiais e (c) subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim, no sul do Estado do Espírito Santo.

As estações de coleta de águas pluviais foram construídas conforme sugestão da *International Atomic Energy Agency* (IAEA, 2002) (Figura 4A). O aparato de coleta minimiza as trocas gasosas com o ar e, para evitar aquecimento por exposição solar, foi utilizada uma tela de proteção do tipo sombrite (Figura 4B).

No momento da coleta, as amostras foram imediatamente armazenadas em frascos de vidro âmbar de 30 mL com batoque e tampa com rosca de plástico, sendo completamente

preenchido com água até a boca. O batoque deve ser colocado de forma que não permita a formação de bolha de ar dentro do frasco, o que se consegue facilmente pressionando-se o plástico do batoque em sua porção lateral para expulsar a água em excesso e ceder lugar ao batoque. Os frascos foram cuidadosamente identificados por meio da fixação de fita crepe com a inscrição do código do ponto e da data de coleta com caneta à prova d'água. Os frascos foram armazenados em caixas de isopor em temperatura ambiente e levados para o laboratório.

As águas superficiais foram coletadas nos meses de fevereiro, maio e julho de 2016. Foram selecionados locais onde se pudesse ter acesso à porção central do rio, por meio de pontes, a partir de onde foi introduzido um recipiente preso a uma corda, até a profundidade de pelo menos 2 metros na lâmina d'água. A amostra foi armazenada no frasco de vidro âmbar o mais rápido possível para evitar trocas gasosas com o ar atmosférico, seguindo o mesmo procedimento adotado para as águas pluviais.



Figura 4. (A) Esquema de recipiente para coleta de água pluvial conforme sugerido pela IAEA (2002) e (B) recipiente utilizado nessa pesquisa, montado dentro de um isopor e sob tela de sombrite para proteção da insolação.

As coletas de água subterrânea foram realizadas em poços previamente cadastrados no banco de dados montado pela equipe do projeto, nos meses de fevereiro, maio, julho e dezembro de 2016. O armazenamento das amostras de água subterrânea para análise isotópica seguiu o mesmo procedimento adotado nas demais matrizes, em frasco de vidro âmbar com tampa e batoque, evitando contato com o gás atmosférico. A coleta foi realizada diretamente ou o mais próximo possível da boca do poço.

As amostras de águas pluviais, fluviais e subterrâneas foram analisadas no Laboratório de Estudos Geocronológicos, Geodinâmicos e Ambientais do Instituto de Geociências da

Isótopos Estáveis nas Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim - ES

Universidade de Brasília - UnB. O equipamento utilizado foi o Picarro *Ultra High-Precision Isotopic Water Analysis*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Assinatura isotópica da água da chuva

A linha meteórica local (LML) foi construída com dados de todas as estações de coleta da BHRI (Figura 5). Ela é representada pela equação $y = 8,28x + 19,70$ com coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,88. Relacionando a linha meteórica global (LMG) ou V-SMOW e a LML, observa-se que o coeficiente angular da LML (8,28) apresenta valor próximo ao da V-SMOW (8). Por outro lado, os valores do coeficiente linear das equações das retas (LML = 19,70; LMG = 10,00) são significativamente diferentes.

As águas superficiais e subterrâneas compõem linhas similares expressas, respectivamente, pelas equações $y = 5,44x + 0,78$ ($R^2 = 0,96$) e $y = 5,62 + 1,78$ ($R^2 = 0,95$). Essa semelhança na assinatura isotópica indica a intercomunicação entre águas superficiais e subterrâneas e, provavelmente, processos de recarga rápida.

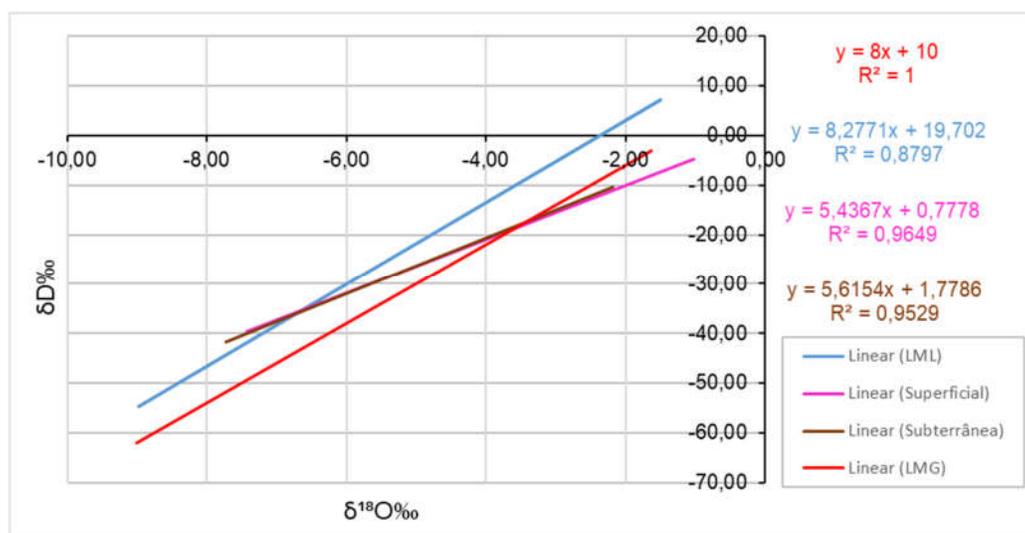


Figura 5. Assinatura isotópica de Oxigênio (^{18}O) e Hidrogênio (^2H , ou deutério - D) das águas na BHRI, expressa por meio da Linha Meteórica Local (LML) (em azul), linha da água superficial coletada nos rios principais (em rosa) e da água subterrânea (em marrom); em vermelho, a Linha Meteórica Global (LMG) ou V-SMOW.

Variações no conteúdo isotópico da água da chuva

O conteúdo isotópico da água da chuva na BHRI varia em função da precipitação média mensal medida entre novembro de 2013 e dezembro de 2014 (Figura 6). Nota-se um padrão sazonal de amplitudes, com uma tendência de empobrecimento de isótopos pesados durante os meses chuvosos (verão) e enriquecimento nos períodos de seca (inverno). O mês de dezembro de 2013 foi duas vezes chuvoso que o mesmo mês do ano seguinte, enquanto o mês de janeiro de 2013 também apresentou valores anômalos de precipitação, semelhante aos meses de seca, como julho. Esse comportamento está claramente refletido no conteúdo isotópico, que mostra depleção acentuada nos meses seguintes aos meses de maior pluviosidade. Importante destacar que as medidas se referem aos valores isotópicos do total acumulado nos coletores durante o mês anterior ao da coleta.

Esse é o chamado efeito da quantidade de precipitação, que é relatado na literatura e observado na área de estudos. Quanto maior o volume precipitado, mais depletado em isótopos pesados se torna a água pluvial, indicando uma correlação entre o empobrecimento de isótopos pesados com a quantidade de chuva. A sazonalidade observada na assinatura isotópica também pode estar sendo influenciada pela entrada de diferentes massas de ar em cada época do ano. Essa relação pode ser explicada pelos processos de evaporação e condensação no ciclo hidrológico (SUGUIO, 2006). Quando a água sofre mudanças na composição isotópica durante a evaporação, o isótopo leve se concentra preferencialmente no vapor d'água, enquanto o isótopo pesado tem teores mais altos nas águas residuais, isto é, naquelas que não evaporaram. Os vapores d'água originados são transportados para a atmosfera, e a condensação apresenta um comportamento oposto ao fenômeno de evaporação, sendo assim tende a enriquecer a água condensada em isótopos pesados. Com períodos de alta pluviosidade observa-se valores menores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD , enquanto em períodos secos ocorrem os maiores valores desses isótopos. Esse efeito é conhecido como efeito de quantidade de precipitação (MOOK, 2001).

Isótopos Estáveis nas Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim - ES

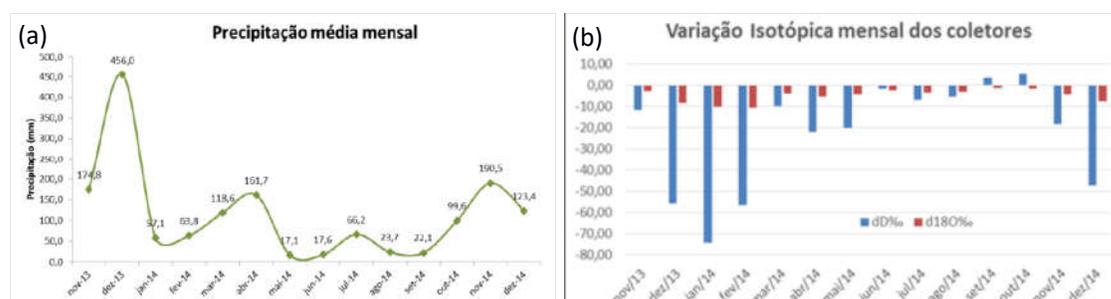


Figura 6. (a) Variação da precipitação e (b) do conteúdo isotópico da água da chuva na BHRI entre novembro de 2013 e dezembro de 2014.

O efeito da continentalidade na assinatura isotópica das águas pluviais da BHRI também pode ser observado, pois há uma tendência de maior depleção em $\delta^{18}\text{O}$ nas águas pluviais a medida em que aumenta a distância da linha de costa (Figura 7).

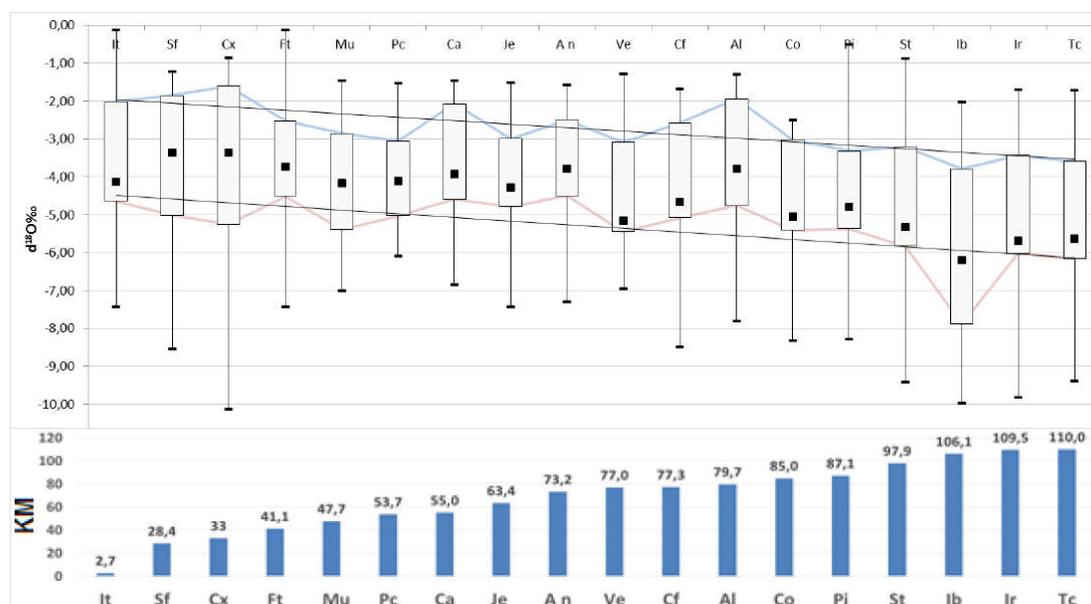


Figura 7. (a) Distribuição de valores de $\delta^{18}\text{O}$ medidos em cada estação pluviométrica montada na BHRI (b) em distância crescente em relação ao litoral (chuvas coletadas entre novembro de 2013 e dezembro de 2014).

Variações regionais no conteúdo isotópico das águas superficiais e subterrâneas

A Figura 8 mostra uma setorização da área de estudos em faixas paralelas ao litoral (linhas pretas tracejadas) buscando relacionar a assinatura isotópica das águas superficiais e

subterrâneas em função da distância da linha de costa. Assim como foi observado acima nas águas pluviais, também nas águas superficiais e subterrâneas há tendência de diminuição do conteúdo de isótopos pesados conforme aumenta a distância do litoral, portanto, o efeito da continentalidade também é observado nessas matrizes.

Variações locais no conteúdo isotópico das águas

Para o estudo de variações locais foram selecionadas áreas na bacia com possibilidade de coletar, em pontos próximos, amostras das três matrizes estudadas (água pluvial, superficial e subterrânea). As áreas escolhidas foram visitadas para coletas concomitantes (das três matrizes em uma mesma campanha de coleta, independentes das coletas que abrangiam toda a bacia). Os meses de coleta (fevereiro, maio e julho) possuem diferentes volumes de precipitação pluviométrica, com médias mensais decrescentes. Os resultados (Figura 9) mostram que as variações sazonais encontradas nas águas pluviais não são observadas nas águas superficiais e subterrâneas. Por outro lado, a assinatura isotópica das águas superficiais e subterrâneas variam de forma semelhante, evidenciando a intercomunicação entre os dois mananciais.

CONCLUSÕES

A linha meteórica local (LML) que descreve a assinatura de isótopos estáveis na BHRI segue a equação $y = 8,28 x + 19,70$ com coeficiente de correlação 0,88. Há efeito da precipitação na assinatura isotópica das águas pluviais, pois, quanto maior o volume precipitado, mais depletada em isótopos pesados se torna a água da chuva. O efeito da continentalidade também pode ser observado na tendência de maior depleção isotópica nas águas pluviais a medida em que aumenta a distância da linha de costa.

A assinatura isotópica das águas superficiais e subterrâneas também mostra depleção de isótopos pesados rumo ao interior continental, mas o efeito da precipitação não é observado nessas matrizes. Por outro lado, há comportamento similar nas variações isotópicas sazonais das águas superficiais e subterrâneas, indicando intercomunicação entre esses mananciais, com presença de rios efluentes nas áreas monitoradas, e um papel crucial dos aquíferos para a manutenção do fluxo de base regional.

Isótopos Estáveis nas Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim - ES

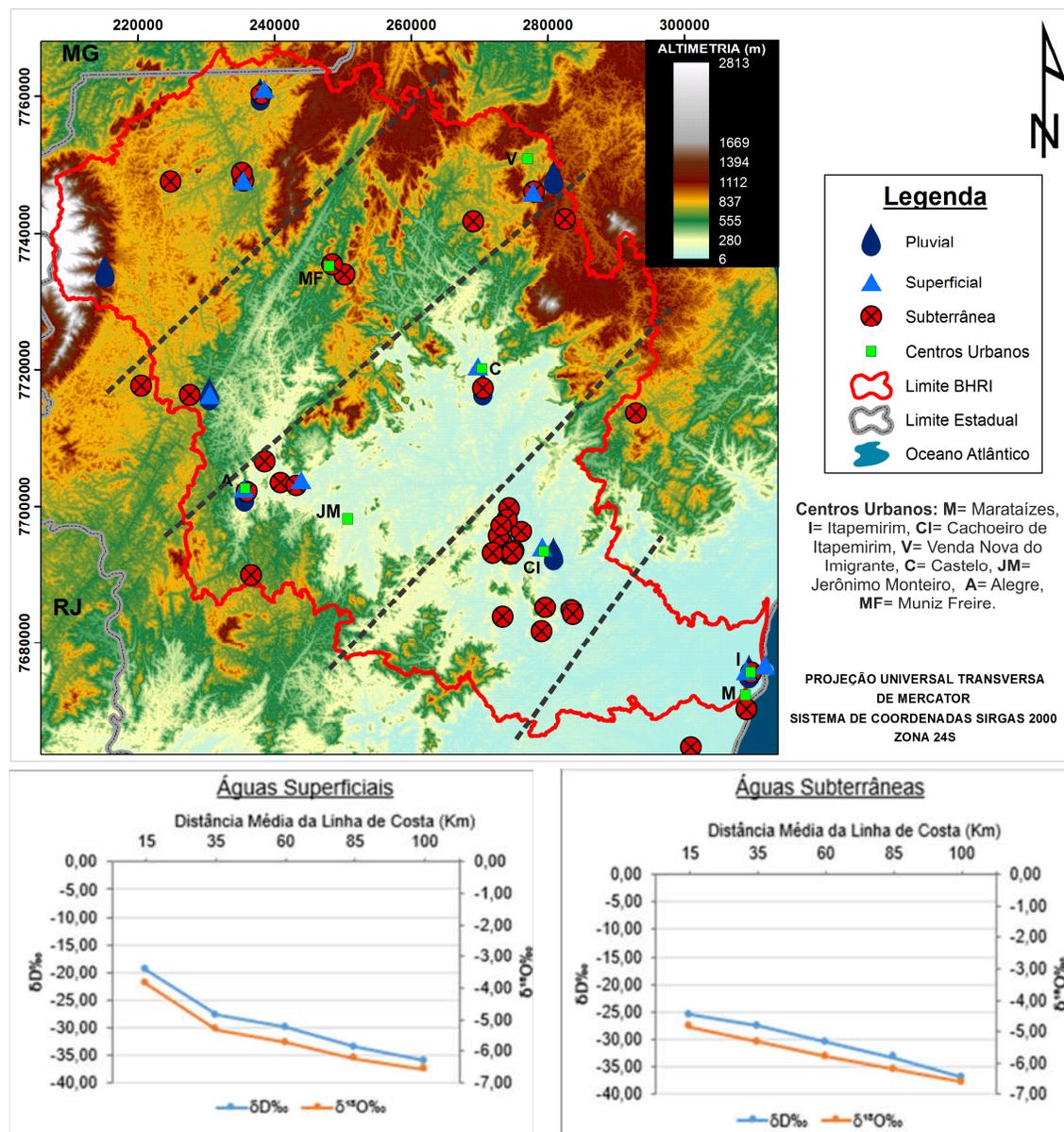


Figura 8. Variação no conteúdo de $\delta^{18}O$ e δ^2H nas águas pluviais, superficiais e subterrâneas coletadas na BHRI em locais com distância crescente desde o litoral rumo ao interior continental em direção aproximadamente perpendicular à linha de costa.

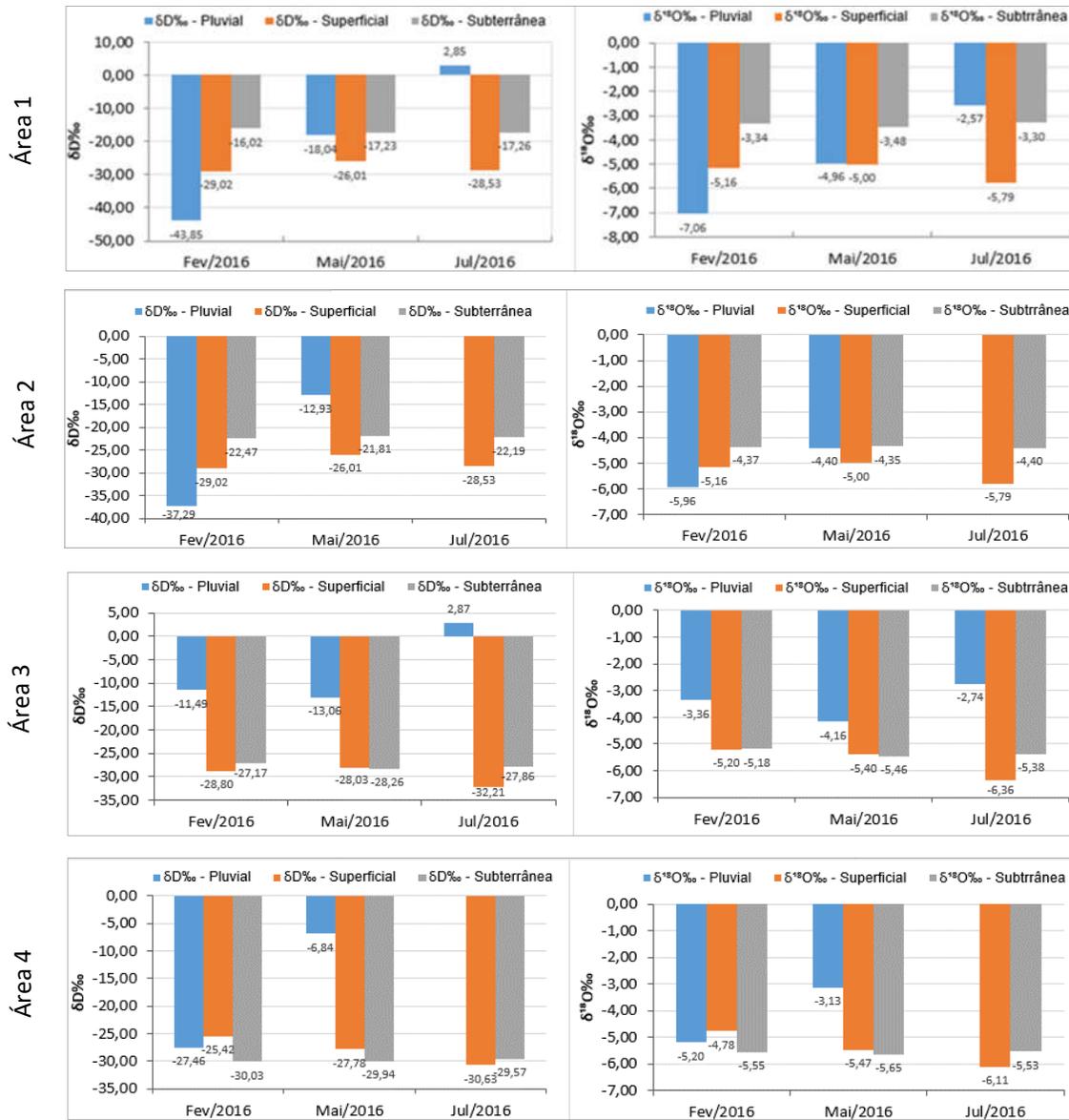


Figura 9: Variações locais no conteúdo isotópico das águas pluviais, superficiais e subterrâneas em áreas selecionadas, em meses com diferentes volumes de precipitação (Área 1 = Itapemirim, Área 2 = Cachoeiro de Itapemirim, Área 3 = Castelo, Área 4 = Alegre).

REFERÊNCIAS

ALLÈGRE, C. J. **Isotope Geology**. 1. ed. New York. Cambridge University Press. 2008. 512 pp.

Isótopos Estáveis nas Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim - ES

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Portal HidroWeb**. Brasília – DF, 2018. Disponível em <https://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em 07 ago. 2021.

CLARK, I.; FRITZ, P. **Environmental Isotopes in Hydrogeology**. Lewis, Boca Raton. 1997. 342 pp.

CRAIG, H. **Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural water**. Science, v. 133, p. 1833-1834. 1961.

DANSGAARD, W. **Stable isotopes in precipitation**. Tellus, v. 16, p. 436-468, 1964.

GEOBASES. **Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo**. 2002. Disponível em: <<http://www.geobases.es.gov.br/portal/>>. Acesso em: 26 de junho de 2021.

HOEFS, J. **Stable Isotope Geochemistry**. 6. ed. Berlin, Springer-Verlag. 2009.

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **A new device for monthly rainfall sampling for GNIP**. Water & Environment News. 16. IAEA, 2002.

KENDALL, C.; CALDWELL, E.A. Fundamentals of Isotope Geochemistry. In: KENDALL, C.; MCDONNELL, J.J. (Eds). **Isotope Tracers in Catchment Hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 1998. p: 51-86.

MOOK, W. G. **Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: principles and applications**. IHP-V I Technical Documents in Hydrology I, n. 39, v. II. UNESCO, Paris, 2001. 113 pp.

SENE, E.; MOREIRA, J. C. **Geografia Geral e do Brasil**. São Paulo: Scipione, 1998.

SUGUIO, K. **Água**. Ribeirão Preto. Holos. 2006.

SUKHIJA, B.S.; REDDY, D.V.; NAGABHUSHANAM, P.; BHATTACHARYA, S.K.; JANI, R.A.; KUMAR, D. **Characterization of recharge processes and groundwater flow mechanisms in weathered-fractured granites of Hyderabad (India) using isotopes**. Hydrogeology Journal, v. 14, p. 663 – 674, 2005.

TWEED, S.O.; WEAVER, T.R.; CARTWRIGHT, I. **Distinguishing groundwater flow paths in different fractured-rock aquifers using groundwater chemistry: Dandenong Ranges, Southeast Australia**. Hydrogeology Journal, v.13, n. 5/6, p. 771-786. 2005.

YANG, K.; HAN, G. **Controls over hydrogen and oxygen isotopes of surface water and groundwater in the Mun River catchment, northeast Thailand: implications for the water cycle**. Hydrogeology Journal, v. 28, p. 1021–1036, 2020.

Capítulo 3

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

Willian Marcos Pinto¹; Jenesca Florêncio Vicente de Lima²

RESUMO. O objetivo desta pesquisa visa a caracterização e avaliação da vulnerabilidade e os perigos de contaminantes na região de Guaratiba-RJ. A caracterização da Vulnerabilidade foi realizada com a aplicação do método GOD {G – *Groundwater hydraulic confinement* (Confinamento hidráulico de água subterrâneo); O – *Overlaying strata* (sobreposição de estrato); D – *Depth to groundwater table* (profundidade até o aquífero)} (Foster e Hirata, 1988), que indica o perigo de contaminação dos aquíferos, sendo avaliado, mediante a interpolação da vulnerabilidade natural, com as fontes potenciais de contaminação, identificadas e classificadas quanto o seu potencial de gerar carga contaminante. Os procedimentos de geoprocessamento foram realizados com auxílio do SIG e dos programas ArcGis e SPRING. Os resultados demonstraram que vulnerabilidades de classificação varia de alta, na bacia de Guaratiba, a extrema, no Maciço de Pedra Branca. Suas correlações com as fontes potenciais de contaminação, demonstraram que a ocupação desordenada da área, a perfuração de poços de forma não organizada, e as práticas agrícolas, providenciam a principal preocupação com o aspecto de contaminação do aquífero. Assim, fica evidente a importância de se introduzir na gestão do território por parte dos municípios os conceitos apresentados, principalmente na gestão dos serviços de saneamento, pois os resultados demonstram que as carências em coleta de esgoto conferem em um grande perigo às águas subterrâneas. De forma geral, os resultados demonstraram que os procedimentos aplicados consistem em ferramentas importantes de avaliação estratégica de ocupação do território, com vistas à proteção das águas subterrâneas.

PALAVRAS-CHAVE. Água subterrânea; Contaminantes, Vulnerabilidade de aquífero.

¹Setor de Geologia da Hidropoços – Belo Horizonte, MG, Brasil

²Departamento de Geologia da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) – Alegre, ES, Brasil

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

INTRODUÇÃO

A necessidade de avaliação hidrogeológica é feita com o intuito de propor um melhor gerenciamento das águas subterrâneas, utilizando políticas que possam garantir o direito a todos de utilizar as águas de boa qualidade sem que seja afetado, de forma negativa, sua circulação natural.

Gerenciar a utilização de águas subterrâneas significa propor políticas que garantam que os aquíferos sejam fontes seguras e confiáveis de abastecimento de água. Esse fato implica em especial preocupação com a proteção dos aquíferos devido à dificuldade e a impraticabilidade de se promover à remoção de poluentes de fontes pontuais de captação, poços e nascentes, em decorrência de que a reabilitação de um aquífero poluído requer custos muito elevados (FOSTER; HIRATA, 1998).

Nesse trabalho foi utilizado os métodos de GOD {G – *Groundwater hydraulic confinement* (Confinamento hidráulico de água subterrâneo); O – *Overlaying strata* (sobreposição de estrato); D – *Depth to groundwater table* (profundidade até o aquífero)}, porém existem diferentes métodos de avaliação de vulnerabilidade de aquíferos, sendo três conjuntos mais utilizados: Métodos que empregam modelos de simulação; Métodos estatísticos ou de monitoramento; Métodos de índices e superposição. Os métodos de simulação avaliam a vulnerabilidade por meio da solução de equações do escoamento em meio subterrâneo e transporte de soluto, quantificando a concentração do contaminante no tempo e espaço. Os métodos estatísticos são usados para quantificar a vulnerabilidade pela determinação da relação estatística entre a poluição e as condições ambientais observadas, sendo expresso como uma probabilidade de contaminação (LINDSTROM, 2005). Os métodos de índices baseiam-se na análise de alguns parâmetros do aquífero, classificando cada característica de acordo com faixas de valores (índices) e distribuídos espacialmente. Os parâmetros individualmente classificados são sobrepostos para compor o mapa geral de vulnerabilidade. Pode-se citar os seguintes métodos de índices: GOD (FOSTER, 1987), DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987), SINTACS (CIVITIA, 1994) E EPIK (DOERFLIGER *et al.*, 1999).

Assim, tem-se uma necessidade de avaliação hidrogeológica do Aquífero Guaratiba, pois se trata de uma fonte de abastecimento para a população e indústria da região, e por isso entender sua forma de fluxo e saber a qualidade de suas águas são essenciais. Utilizando a metodologia de GOD, que considera o tipo de aquífero, a litologia e a profundidade do lençol freático, e sua necessária avaliação geológica, aqui utilizando sistemas de informações

geográficas (SIG), se confeccionou mapas de diversas formas para a análise e interpretação. Os resultados desse estudo podem vir a permitir que autoridades municipais e estaduais gerenciem de forma adequada e mais eficiente os recursos hídricos.

Alguns trabalhos já foram realizados na região de Guaratiba-RJ e áreas adjacentes, que evidenciavam características geológicas, hídricas e geomorfológicas (DANTAS, 2000; MONSORES, 2003; CARVALHO, 2009). O trabalho de Carvalho (2009), faz uma avaliação hidrogeológica e de qualidade das águas subterrâneas nas regiões administrativas de Campo Grande e Guaratiba – Município do Rio de Janeiro. A partir de dados relacionados a esse relatório, e da análise através de mapas de SIG, com a utilização de programas como ArcGis 10.3 DEMON, SPRING e ArcView, objetivamos a análise de possíveis áreas mais sensíveis a contaminações.

O mapa de vulnerabilidade é de suma importância para que sejam diagnosticadas as suscetibilidades das áreas da região de Guaratiba-RJ à poluição, possibilitando a proposição de estudos detalhados para regiões com índices de elevada vulnerabilidade.

Através de dados obtidos em relatórios da Petrobrás que caracterizam o aquífero e a geologia local, pretende-se confeccionar mapas de vulnerabilidade (utilizando as técnicas de GOD) que indicará as áreas que são mais vulneráveis as contaminações de diferentes fontes.

Além do estudo das estruturas geológicas, a elaboração de um mapa geológico simplificado, delineado com base nos grupos litológicos principais que compõem o arcabouço geológico da bacia hidrográfica, representa uma importante ferramenta que poderá ser utilizada em diversas áreas do conhecimento.

LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A região de Guaratiba localiza-se no estado do Rio de Janeiro, no município do Rio de Janeiro e abrange uma área total aproximada de 315 km², contida parcialmente em duas folhas topográficas 1:50.000 pertencente à Diretoria de Serviço Geográfico. A principal é a Folha Santa Cruz-Restinga de Marambaia, englobando 95% da área, incluindo toda a porção central, norte, sul e oeste. A Folha Vila Militar cobre a porção leste da área. A área está envolvida pelas coordenadas 22°48' e 23°04' de latitude sul e 43°28' e 43°40' de longitude oeste (Figura 1).

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

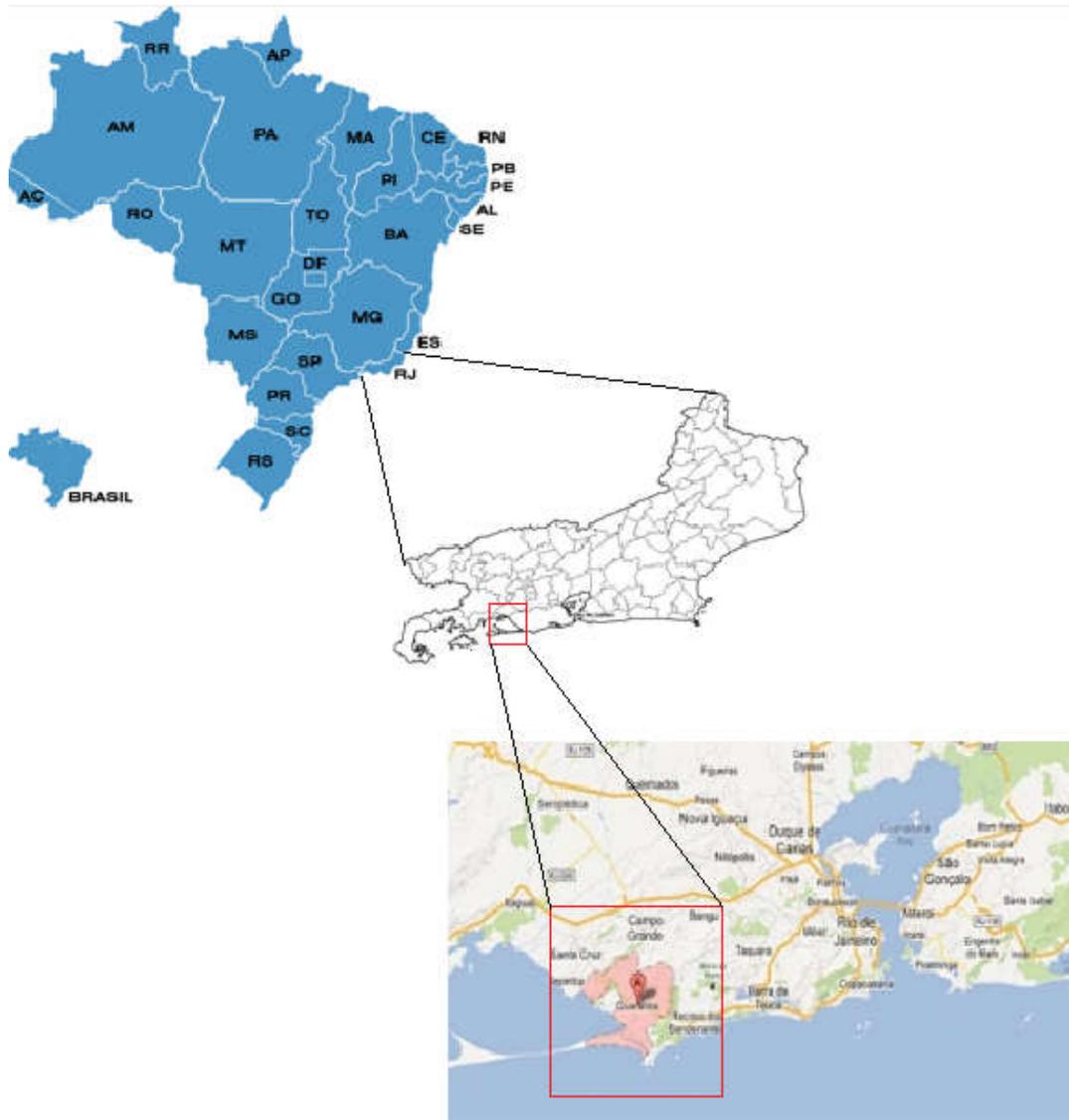


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo em Guaratiba-RJ (Google Maps, 2016).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA/GEOLOGIA REGIONAL

Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico, ou ciclo da água, é o movimento contínuo da água presente nos oceanos, continentes (superfície, solo e rocha) e na atmosfera. Esse movimento é alimentado pela força da gravidade e pela energia do Sol, que provocam a evaporação das águas dos oceanos e dos continentes (MME, 2003).

Nos continentes, a água precipitada pode seguir os diferentes caminhos: a) infiltra e percola (passagem lenta de um líquido através de um meio) no solo ou nas rochas, podendo formar aquíferos, ressurgir na superfície na forma de nascentes, fontes, pântanos, ou alimentar rios e lagos. c) flui lentamente entre as partículas e espaços vazios dos solos e das rochas, podendo ficar armazenada por um período muito variável, formando os aquíferos. d) escoar sobre a superfície, nos casos em que a precipitação é maior do que a capacidade de absorção do solo. e) evapora retornando à atmosfera. Em adição a essa evaporação da água dos solos, rios e lagos, uma parte da água é absorvida pelas plantas. Essas, por sua vez, liberam a água para a atmosfera através da transpiração. A esse conjunto, evaporação mais transpiração, dá-se o nome de evapotranspiração. d) congela formando as camadas de gelo nos cumes de montanha e geleiras (MME, 2006)

A constante circulação da água na natureza tem sua origem solar, que provoca tanto a evaporação da água dos oceanos como a evapotranspiração (evaporação direta da água do meio e transpiração da vegetação) que, transporta pela circulação atmosférica, condensa-se sob condições apropriadas e precipita (BRANCO *et al*, 2001), Figura 2.

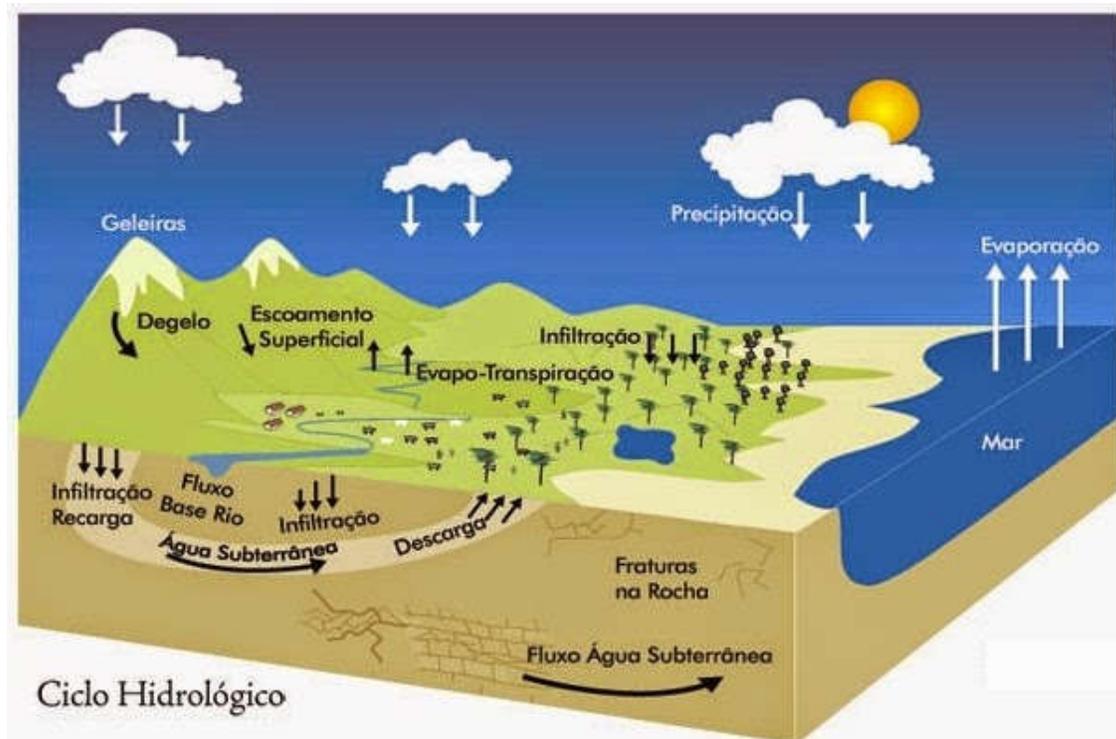


Figura 2. Ciclo hidrológico esquematizado (Adaptado de Furtado, 2007 e Teixeira et al., 2000).

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

Importância da Água Subterrânea

A quantidade total de água no Planeta Terra é fixa e sua distribuição não é uniforme, concentrando-se os maiores volumes nos oceanos (97,5%), restando uma pequena quantidade de água doce disponível (2,5%), da qual a maior parcela (68,9%) se encontra nas calotas polares e na forma de geleiras (ANA, 2000), como se pode observar na Figura 3.

Sendo assim, dos 2,5% da água doce em condições de ser explorada, física e economicamente pelo homem, as águas superficiais (rios e lagos), representam somente 0,3% do total das reservas, enquanto as águas subterrâneas, que se encontram armazenadas no subsolo, em rochas chamadas de aquíferos, totalizam cerca de 30% (ABAS, 2005). Verifica-se desta forma, que as águas subterrâneas assumem significativa importância no contexto de atendimento das demandas de todos os segmentos usuários.

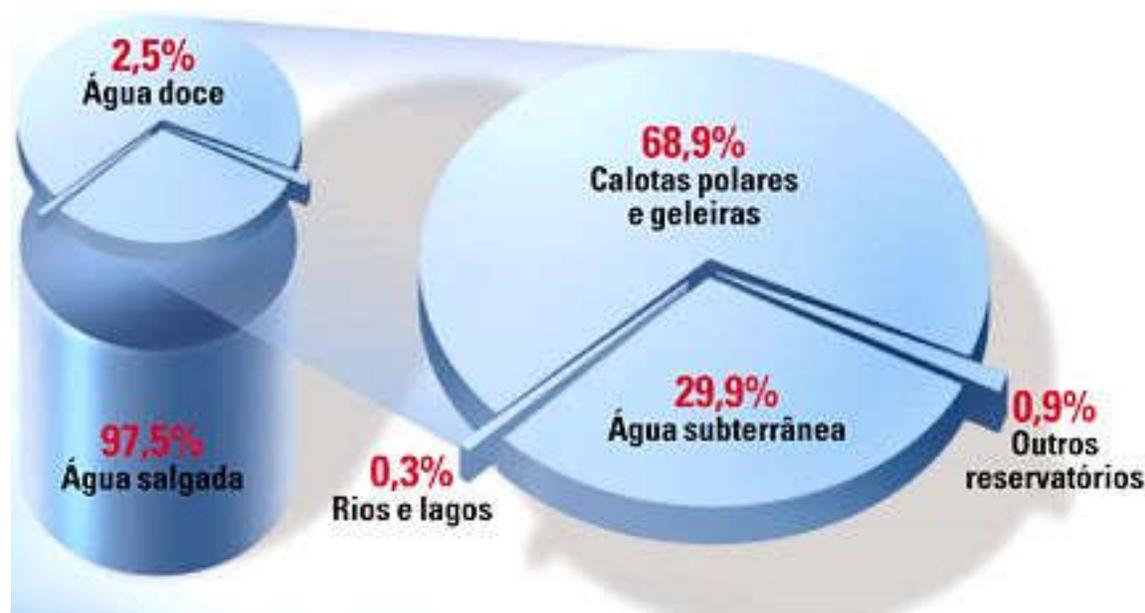


Figura 3. Disponibilidade de Água Doce (Adaptado de Shiklomanon, 1998).

No Brasil, a importância do monitoramento da água está conceituada na Política Nacional de Recursos Hídricos, que define, dentre seus objetivos, “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos” (Art. 2º, Cap. II, Tit. I, Lei nº 9.433).

As águas subterrâneas podem ser contaminadas mediante um manejo incorreto ao destinar os efluentes domésticos e industriais em fossas e tanques sépticos, pela distribuição

inadequada dos resíduos urbanos, industriais, de postos de combustíveis, e outros tipos de poluições pontuais causadas pelo homem (SILVA; ARAÚJO, 2003),

O perigo de contaminação das águas subterrâneas, por sua vez, consiste em um conceito que pretende associar as características naturais do aquífero em ser afetado adversamente, ou seja, a vulnerabilidade, com a existência, ou previsão de existência, de alguma atividade ou ação poluente desenvolvida em superfície. (MONTERO *et al*, 2014).

Aquífero

Segundo a ANA (2001), aquíferos são formações geológica que contém água e permite que quantidades significativas dessa água se movimentem no seu interior em condições naturais. Formações permeáveis, tais como os arenitos e areias, são exemplos de aquíferos.

Segundo o DNPM (2015) a três tipos principais de aquíferos (Figura 4): Aquífero livre, Aquífero Confinado e Aquífero Fraturado. São classificados em função da pressão das águas nas suas superfícies limítrofes: superior chamada topo e inferior chamada base, e também em função da capacidade de transmissão de água das respectivas camadas limítrofes.

Os aquíferos livres também chamado de freático ou não confinado, são aquele cujo limite superior é a superfície de saturação ou freático na qual todos os pontos se encontram à pressão atmosférica (ANA, 2001). O aquífero suspenso é um caso especial de aquífero livre formado sobre uma camada impermeável ou semipermeável que nem armazena nem transmite água (DNPM, 2015).

Os aquíferos confinados também chamado de aquífero sob pressão, são aquele onde a pressão da água em seu topo é maior do que a pressão atmosférica. Em função das camadas limítrofes pode ser definido como: confinado não drenante e confinado drenante. Os aquíferos confinado não drenante são aquele em que as camadas limítrofes, inferior e superior, são impermeáveis. Captação por sondagem nesse tipo de aquífero, a água jorra naturalmente sem necessidade de bombeamento e são os poços denominados “jorrantes” ou “artesianos”. Os aquíferos drenantes são aquele que pelo menos uma das camadas limítrofes é semipermeável, permitindo a entrada ou saída de fluxos.

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

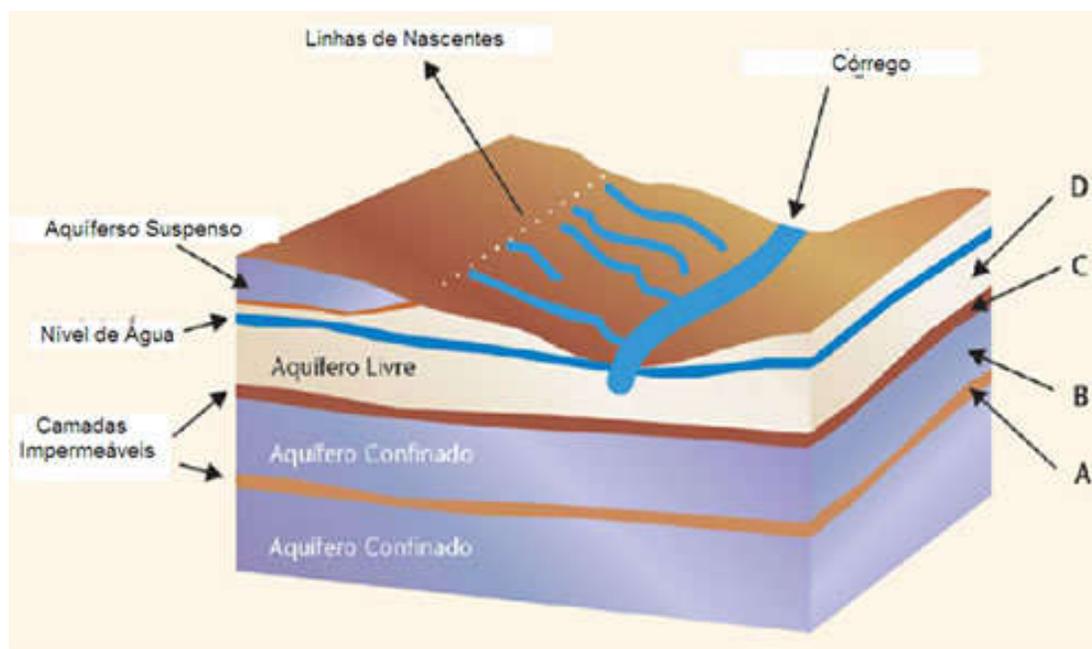


Figura 4. Tipos de aquíferos. Aquífero Livre, Aquífero Confinado e Aquífero Fraturado (DNPM, 2015).

Recarga de Aquíferos

Para a formação de um aquífero são necessárias condições ideais de solo, tipo de porosidade, clima, relevo, etc. A recarga é definida como o fluxo de água descendente que se infiltra e alcança o aquífero, resultando em um volume adicional ao reservatório subterrâneo, contribuindo para aumentar, dessa forma, as reservas renováveis e permanentes de um aquífero (INEA, 2014) (Figura 5).

A recarga ocorre quando a precipitação de água no solo, ou em rocha fraturada, e entra nos interstícios, promovendo o processo de recarga das águas subterrâneas. A recarga de aquíferos é de extrema importância, pois esses aquíferos são formadores de nascentes, fornecem água as bacias e sub-bacias, e é um reservatório natural para consumo humano e agrícola.

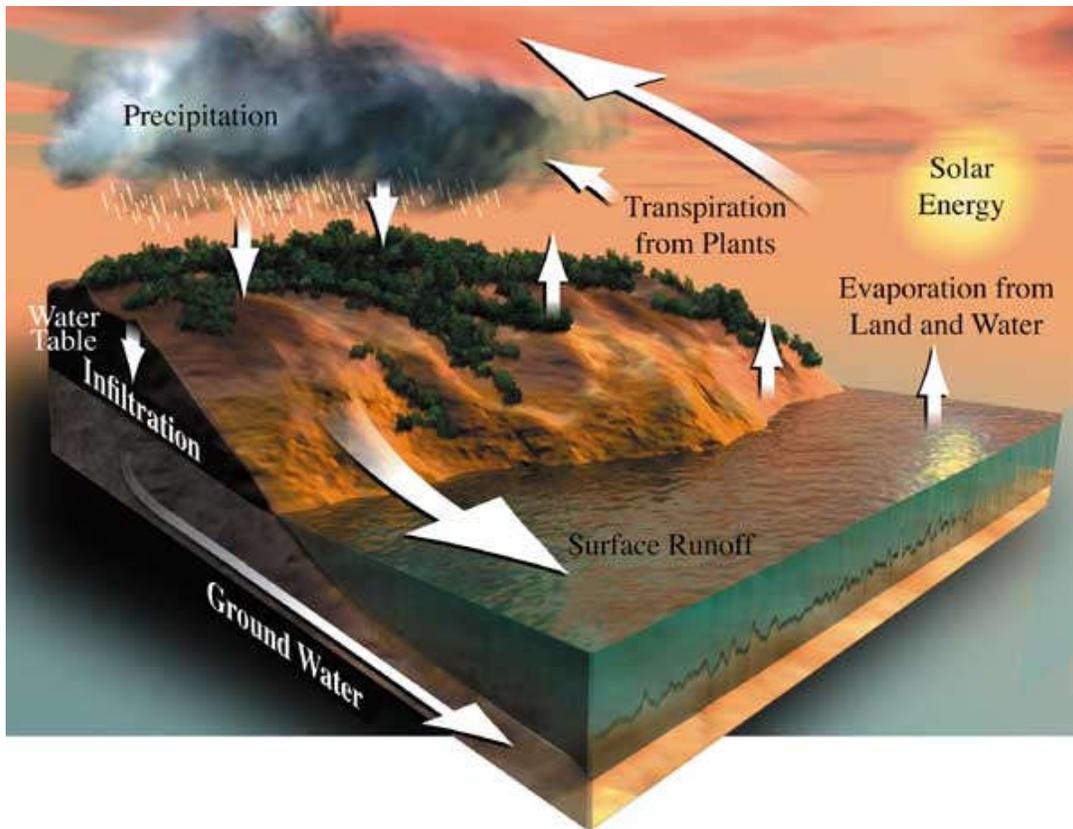


Figura 1. Ciclo das águas (ANA, 2000).

Contaminação de Aquíferos

Segundo MMA (2008), área contaminada é a área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de quaisquer substâncias ou resíduos em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger, que nela tenha sido depositado, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural.

Segundo Foster *et al.* (2006) “a água subterrânea é um recurso natural vital para o abastecimento econômico e seguro nos meios urbano e rural”. A água subterrânea é uma fonte segura de captação, e em muitos locais a única fonte, com isso é necessário conhecer o que temos nestas reservas e o que precisamos fazer para melhorá-la. Ainda segundo os autores “no mundo inteiro os aquíferos estão sob perigo de contaminação” isto se deve aos aumentos populacionais e conseqüente aumento da urbanização, intensificação da agricultura com uso de produtos tóxicos e muitas outras atividades poluidoras.

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

Há mais de duas décadas que o estudo da vulnerabilidade dos recursos hídricos tem ganho muita importância. Segundo Brollo *et al.* (2000), esta crescente preocupação da sociedade com a deterioração dos recursos hídricos subterrâneos, deve-se essencialmente ao “crescimento populacional e ao desenvolvimento econômico”, que tem aumentado nestes últimos anos, originando “maior consumo de água, mais geração de esgotos” e outras fontes poluidoras.

Todos os impactos ambientais causados às águas subterrâneas podem ser entendidos como contaminação, ou seja, qualquer introdução de substância indesejada na água, ou ainda, poluição que não diz exclusivamente sobre a alteração de suas propriedades físico-químicas, mas também da alteração das características do ambiente aquático (FOSTER *et al.*, 2003).

O que se observa é uma relação direta das áreas contaminadoras com a ocupação e o desenvolvimento industrial, agrícola, e o avanço das áreas urbanas, que possuem pouca ou nenhuma condição para suas instalações. Essas áreas promovem a contaminação do solo, conseqüentemente das águas subterrâneas, com a construção de lixões, lançamento de esgoto urbano e industrial sem o devido tratamento, e o desmatamento de áreas antes preservadas.

Várias são as causas que levam à ruína da qualidade da água dos aquíferos subterrâneos, mas todas elas sucedem relacionadas com o desenvolvimento econômico e o crescimento da população (CARDOSO, 2010). O risco de contaminação da água subterrânea depende da relação entre as “características naturais dos estratos que afastam o aquífero da superfície terrestre” (vulnerabilidade à contaminação), e a carga poluente. Deste modo, pode ter-se “alta vulnerabilidade, mas nenhum perigo de poluição, por causa da ausência de carga contaminante significativa, e vice-versa” (FOSTER *et al.*, 2006).

Existem dois tipos de problemas relativos à qualidade da água subterrânea: contaminação do aquífero e contaminação na captação. Quando a contaminação se dá no aquífero, esta acontece por meio de uma desajustada proteção deste, fica vulnerável a lixiviados e emissões derivadas de atividades urbanas, industriais e agrícolas. Por sua vez, quando o poço ou captação é contaminada, deve-se também à desajustada “construção/projeto, possibilitando o ingresso direto de água da superfície” (FOSTER *et al.*, 2006).

O excedente da chuva se infiltra no solo trazendo com sigo minerais contidos no solo e qualquer outro tipo de contaminante que possua mobilidade. Quando essa carga contaminante chega em águas subterrâneas ocorre a contaminação, e sua atenuação é muito cara e de difícil obtenção. Esses contaminantes podem ter diversas origens, como por exemplo: Aterro de resíduos sólidos, drenagem de áreas industriais e agrícolas, esgoto residual, etc (Figura 6).

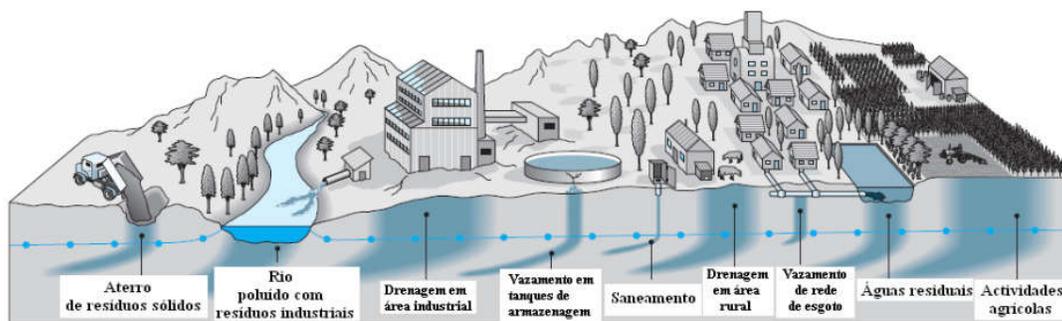


Figura 6. Processos poluentes mais frequentes de contaminação à água subterrânea (Foster et al., 2006).

Vulnerabilidade de Aquíferos

Para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação, realizam-se mapas, através da aplicação de metodologias, que ajudam a estimar qual o risco de contaminação do aquífero. Este risco pode ou não reverter numa ameaça à qualidade da água subterrânea. Na situação de captação de água potável, está primeiramente sujeito à zona de captação, seguindo-se só depois a mobilidade, a persistência e a dispersão dos poluentes dentro do aquífero (FOSTER *et al.*, 2006).

A realização de mapas através da aplicação de metodologias, nos quais se observam as áreas de maior ou menor vulnerabilidade à contaminação, tem o intuito de realizar estudos que possam avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas. Estes mapas, depois de analisados, contribuem para a elaboração do ordenamento territorial, tanto em termos do uso sustentável da água subterrânea, como da aptidão, ou não, de zonas para estabelecimento de diferentes ações a desenvolver em função do impacto que estas podem ter sobre os recursos hídricos subterrâneos (XAVIER *et al.*, 2004).

O deslocamento da água e o transporte de poluentes até aos aquíferos, pode ser, em muitos casos, um processamento lento, podendo demorar anos ou décadas até que o impacto de um caso de poluição se manifeste nas captações de água. Este fato tanto pode ser benéfico, caso se dê a decomposição dos poluentes degradáveis ao longo deste tempo, como prejudicial, pois permite a penetração dos poluentes persistentes (FOSTER *et al.*, 2006).

De acordo com *Environment Agency* (2004), os principais fatores que determinam a vulnerabilidade de um aquífero são:

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

- Tipo e natureza do solo, incluindo estrutura, potencial de lixiviação e vulnerabilidade do solo, com base nas propriedades físicas que afetam o fluxo vertical de água e a capacidade de depuração do solo;
- Presença e natureza de corrente de água, incluindo tipo e espessura;
- Profundidade do nível freático dado que a zona não saturada pode atenuar a contaminação por processos físicos, biológicos e químicos;
- Mecanismo de fluxo da água subterrânea (intergranular ou fissural);
- Vulnerabilidade da água subterrânea e tipo de aquífero;
- Extração de água;
- Zonas de proteção de águas subterrâneas;
- Proximidade de cursos de água, nascentes ou drenagens.

Os requisitos humanos para a sustentabilidade, características culturais da população, situação socioeconômica e as características biofísicas e climáticas da área determinam o nível de interação e contaminação das águas.

Métodos para determinar a vulnerabilidade de aquíferos

Existe uma grande variedade de métodos que podem ser utilizados para determinar a vulnerabilidade dos aquíferos, alguns como DRASTIC, GOD, SINTACS são os mais utilizados. No entanto, existem outros métodos que apresentam formas parecidas, mas exigem formas mais trabalhosas com os de EPIK, EKv, AVI, $\Delta hT'$.

Visto os métodos, vamos fazer uma breve análise sobre os três mais utilizados (DRASTIC, GOD, SINTACS) para enfatizar as diferenças entre eles.

- **DRASTIC**

Apoiado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, Aller *et al.*, desenvolveu em 1987 o método DRASTIC (BRACHO *et al.*, 2004). A principal finalidade deste método é estimar a vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea. Para determinar os índices de vulnerabilidade, o método DRASTIC analisa 7 características:

- D _ profundidade do nível da água subterrânea (depth);
- R _ recarga do aquífero (recharge);

- A _ tipo de aquífero (aquifer);
- S _ tipo de solo (soil);
- T _ topografia (topography);
- I _ impacto da zona não saturada (impact);
- C _ condutividade hidráulica (hydraulic conductivity).

Estes índices variam de 1 a 10, sendo que, à vulnerabilidade mínima corresponde ao índice 1, e à vulnerabilidade máxima ao índice 10 (AUGE, 2004). Além destas características, o método DRASTIC também tem em apreciação a ocorrência de atividades agrícolas.

- SINTACS

O método SINTACS, desenvolvido por Civita *et al.*, (1990), provém do método DRASTIC. Esta necessidade de modificar o método DRASTIC transformando-o em SINTACS, acontece devido às diversas características hidrogeológicas da Itália, e à necessidade de mapas de vulnerabilidade com maior rigor. Assim os fatores que este método considera são:

- S _ profundidade da água subterrânea
- I _ infiltração
- N _ zona não saturada
- T _ tipo de solo
- A _ características hidrogeológicas do aquífero
- C _ condutividade hidráulica
- S _ inclinação topográfica

A execução do método SINTACS realiza-se meio de um programa especialmente preparado para o efeito, isto porque tanto para os dados de entrada como para os dados de saída, este método mostra uma estrutura complexa. O uso do solo e a incidência da água de superfície são dois fatores a acrescentar aos referidos anteriormente (AUGE, 2004).

- GOD

“O método GOD consiste num método simples e sistemático, e foi desenvolvido em 1987 por Foster. Este método entende-se como o primeiro passo para a avaliação do perigo de poluição do aquífero com o propósito de criar prioridades, determina a vulnerabilidade intrínseca, logo não tem em consideração o tipo de contaminante” (BRACHO *et al.*, 2004).

A profundidade do nível de água, o tipo de substrato litológico e a ocorrência de água subterrânea no confinamento do aquífero, são os três fatores que o método GOD considera para

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

determinação da vulnerabilidade das águas subterrâneas. Este método denomina índices entre 0 e 1 às três variáveis que intitulam o acrônimo: G – tipo de aquífero (ground water occurrence), O – litologia do aquífero (overall aquifer class), D -profundidade da água do aquífero (depth) (BRACHO *et al.*, 2004).

Contexto Geotectônico Regional

A Região Sudeste do Brasil apresenta um arcabouço geotectônico formado por um núcleo estável no Neoproterozóico, designado de Cráton do São Francisco (CSF), circundado pelos orógenos inicialmente denominados de Faixa Brasília a oeste, Faixa Ribeira a sul-sudeste e Faixa Araçuaí a leste, instalados durante a Orogênese Brasileira/Pan-Africana (Silva, 2001). O estado do Rio de Janeiro localiza-se no segmento Central da Faixa Ribeira, onde está se estende por uma área de mais de 1.400 km ao longo da costa atlântica brasileira.

A Faixa Ribeira corresponde à parte de uma cadeia de montanhas geradas durante a amalgamação do supercontinente Gondwana, como resultado de uma colisão de placas continentais, ocorrida entre 670-480 Ma (milhões de anos), e conhecida como Orogênese Brasileira. Durante este evento, devido a um metamorfismo intenso associado com magmatismo, sedimentos marinhos com idades entre 1.000 – 700 Ma e embasamento com mais de 1.800 Ma foram dobrados e cisalhados (HEILBRON *et. al.*, 2000) (Figura 7).

Os terrenos se posicionam desde o Cráton do São Francisco, a NW, até o litoral, a SE, em faixas alongadas na direção NE-SW. Eles são limitados por zonas de cisalhamento dúctil de baixo a médio ângulo de mergulho, com vergência divergente a partir do Terreno Paraíba do Sul, o qual coincide com a zona de cisalhamento dúctil, de alto ângulo, homônima, caracterizando direção típica brasileira. Os domínios tectônicos que tem direção NE-SW, são cortados pela estruturação do Graben da Guanabara, orientado segundo as direções ENE-WSW a E-W (FERRARI, 1990).

O Graben da Guanabara foi definido por Almeida (1976) que o denominou Rift da Guanabara, englobando toda a área de relevo deprimido que se estende desde a Baía de Sepetiba, a oeste, até a localidade de Barra de São João, a leste, na qual se situa a área de estudo.

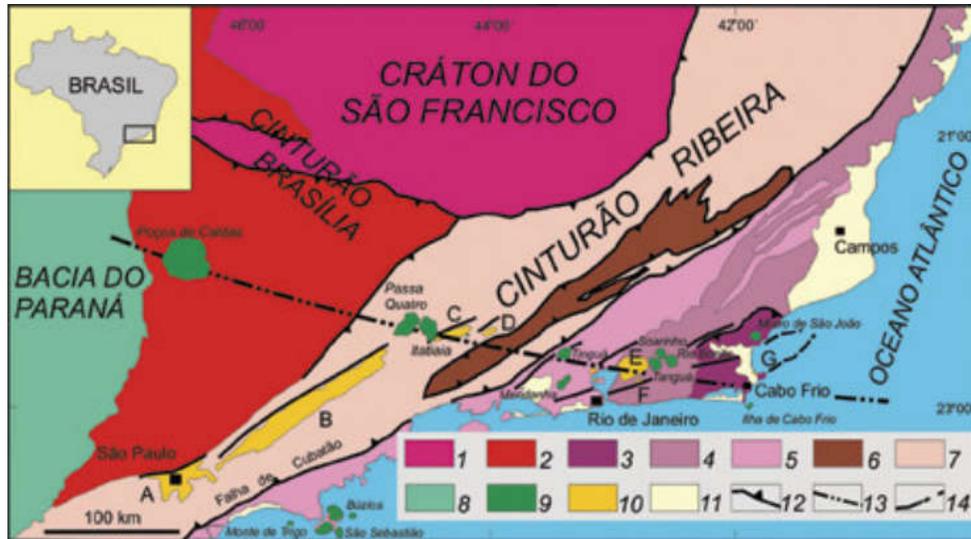


Figura 7. Mapa tectônico da região Sudeste do Brasil - 1) Cráton do São Francisco; 2) Cinturão Brasília; 3) Terreno Cabo Frio; 4) Terreno Oriental – Domínio Costeiro; 5) Terreno Oriental - Arco Magmático Rio Negro; 6) Klippe Paraíba do Sul; 7) Terreno Ocidental; 8) Bacia do Paraná; 9) Corpos alcalinos do Cretáceo Superior a Eoceno; 10) Bacias do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB): A – São Paulo; B - Taubaté; C - Resende; D - Volta Redonda; E - Macacu; F - Itaboraí; G – Barra de São João; 11) Sedimentos cenozóicos indiferenciados; 12) Falhas reversas, nappes; 13) Alinhamento Magmático de Cabo Frio; 14) Limites de grábens do Rift Continental do Sudeste do Brasil (Modificado de Riccomini (1989), Ferrari (1990), Mohriak; Barros (1990), Heilbron *et al.*(2000) e Ferrari (2001), (*in*, Mantesso-Neto *et al.*, 2004).

A região de estudo está inserida no contexto do Arco Magmático Rio Negro (TUPINAMBÁ *et al.*, 2000), rediscutido e rebatizado como Arco Magmático Guanabara por Porto Jr (2004) para a área correspondente a Cidade do Rio de Janeiro.

Porto Jr. (2004) sugere a evolução tectônica do Arco Magmático Guanabara segundo as fases a seguir:

a) Fase 1 – magmatismo de caráter marcadamente juvenil, assinalado pelas rochas com idades de até 792 Ma, associado a uma evolução em ambiente pré colisão. Estas características definem a existência de um arco magmático, eventualmente correlacionável ao Arco Rio Negro (TUPINAMBÁ, 1999), mas que apresenta idades iniciais para o seu estabelecimento mais antigas.

b) Fase 2 - fase marcada pela presença de intensiva deformação e metamorfismo (M1), que leva à geração da estrutura tectônica principal (foliação de transposição D2). A esta etapa

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

de deformação associa-se intensa migmatização o que implica na geração de leucossomas anatóxicos. Trata-se do momento de evolução do orógeno em que se estabelece o metamorfismo de maior intensidade (fácies anfibolito alto / granulito) chegando aos estágios de anatexia.

c) Fase 3 - momento de expressivo magmatismo no Arco Magmático Guanabara, de caráter crustal, tipo I, relacionado à colisão continental. Tem como produtos principais as rochas denominadas de Gnaiss Archer e Gnaiss Facoidal. Estes produtos são gerados em torno de 570 Ma.

d) Fase 4 - estabelecimento de uma tectônica de baixo ângulo (D3) ao qual se associa a ascensão dos magmas de composição básico-intermediária, evento magmático não datado até aqui, porém com estruturação e posicionamento associado à D3 ou tardiamente a esta estrutura.

e) Fase 5 - predomínio do magmatismo francamente tardio, pós-colisão, com idades em torno de 510 Ma, cujo representante é o Granito Pedra Branca.

f) Fase 6 - corresponde a fase do magmatismo pós-colisão "stricto". Magmatismo associado à extensão crustal cujo representante é o Granito Favela/Andorinha.

Outra feição tectônica regional importante é a Província do Alinhamento Magmático de Cabo Frio. Ela desenvolve-se ao longo de extensa zona de fratura transcorrente sinistral, de direção geral WNW, com pelo menos duas fases de reativação e magmatismo associado, no Neocretáceo a Paleoceno e durante o Eoceno (RICCOMINI *et al.*, 2004a). Inclui centros alcalinos intrusivos, sob a forma de stocks e maciços maiores, ocorrências efusivas e um número expressivo de diques.

METODOLOGIA

Caracterização do Uso e Ocupação do Solo

Os solos da região são, geralmente, rasos (profundidade inferior a 1 metro) pertencem às classes Argissolos vermelho/amarelo, Espodossolo Ferrocárbico e Planossolo Háptico, com textura média argilosa à arenosa (EMBRAPA, 2011).

A área de estudo apresenta um uso variado para a ocupação do solo. Porém, é possível classificar a área em 5 (cinco) principais usos, sendo elas: a) cobertura arbórea e arbustiva; b) áreas agrícolas; c) áreas industriais; d) áreas residenciais; e) favelas. As favelas foram separadas das áreas residenciais devido a sua característica irregular que afeta diretamente o potencial de vulnerabilidade dos corpos hídricos.

Podemos notar na Figura 8 que a área de estudo é preenchida, principalmente, por áreas residenciais. Notamos também a presença de áreas agrícolas em meio as coberturas arbustivas e próximo a uma grande área industrial.

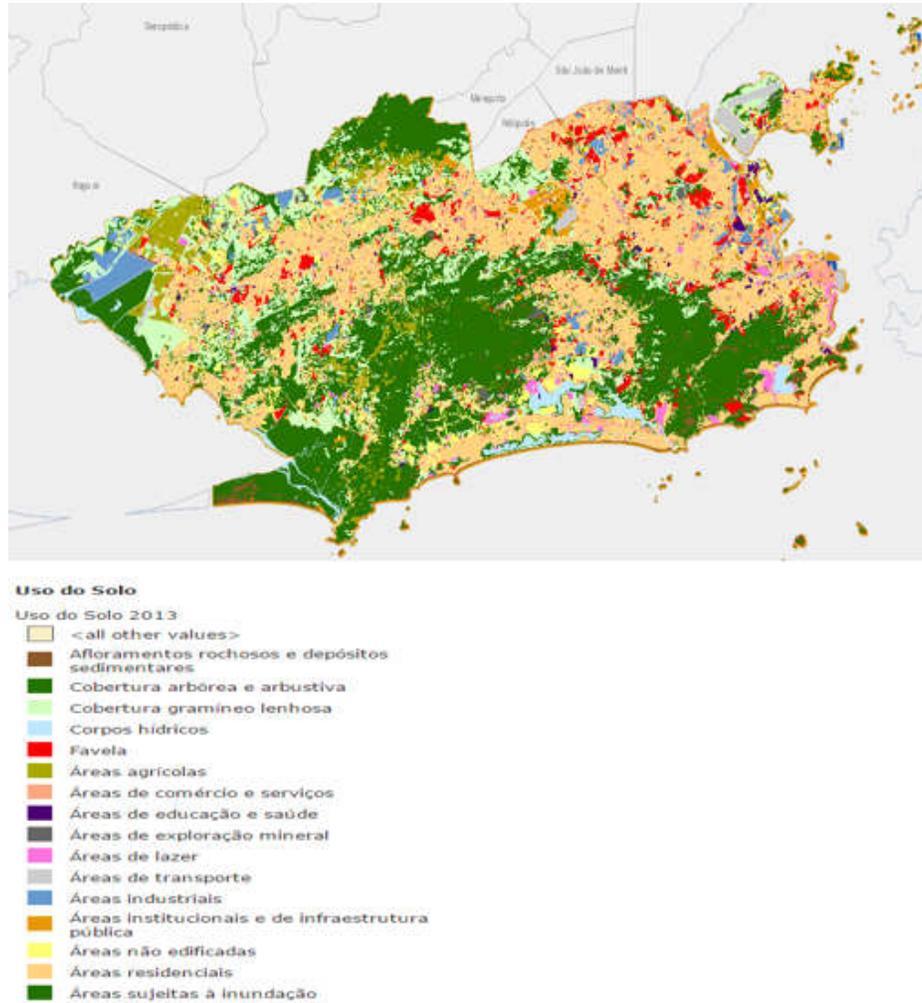


Figura 8. Mapa regional enfatizando os principais usos do solo na região de Guaratiba e Campo Grande (IPP, 2004).

Existe um polo industrial do Estado do Rio de Janeiro, que se situa na região de Sepetiba. Segundo a SIURB (Sistema de Informações Urbanas) o local é ocupado por cerca de 100 indústrias, dentre as quais se destacam as pirometalurgia, siderurgia e metalurgia, que abrange grandes empresas como a CSA, Cosigua, Basf e a Casa da Moeda. Segundo a Secretaria Estadual de Meio Ambiente (Sema) em 1988, apenas trinta das cem indústrias possuíam unidades de tratamento. Essas empresas são antigas e não possuem, em sua maioria, tratamento adequado para seus resíduos sólidos e líquidos.

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

Segundo a Petrobrás (2009) o solo é caracterizado por terrenos pré-cambrianos, representados por complexo granítico-migmático e corpos graníticos subordinados; alguns corpos de plutonitos alcalinos de idade Mesozóica; e recobrimentos sedimentares, notadamente holocênicos. Apresenta nos níveis mais baixos os solos latossolos, mais evidentes ao longo das vertentes meridionais do maciço Pedra Branca. Nos níveis mais elevados e nas encostas dos vales estão os solos podzólicos vermelho e amarelo litossolo, são solos raros das vertentes montanhosas. Assim, podemos dizer que a ocorrência de solo apresenta grande influência da geomorfologia da região.

Os locais no qual se localizam os maciços, são caracterizados por argissolos e latossolos constituídos por rochas que advém dos maciços. Nas regiões de baixadas apresentam solos do tipo argilosos e orgânicos (esses mais próximos ao mar). Em outras zonas de baixadas são caracterizadas por mangues, gleissolos, organossolos, espodossolos.

Relevo

A região de Guaratiba-RJ apresenta feições morfológicas características das planícies costeiras, com morfologia dito “meia-laranja”. Nessa região o dito maciço de Pedra Branca é composto por um conjunto de serras que: Valqueire, Viegas, Bangu, Barata, Lameirão, Engenho Velho, Rio Pequeno, Taquara, Pedra Branca, Quilombo, Santa Bárbara, Rio da Prata, Nogueira, Alto do Peri, Sacarrão, Geral de Guaratiba, Carapiá, Cabuçu e Grumar, (INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

No maciço da Pedra Branca e Parque estadual de mesmo nome está localizado no Pico da Pedra Branca, o ponto culminante da cidade do Rio de Janeiro, com os seus 1024 metros acima do nível do mar (CPRM, 2003).

Os relevos da região de Guaratiba é composto por vegetação de mata atlântica, visto mais comumente na região da Pedra Branca, com alguma mata secundária. No restante da região é mais comum encontrar matas de regeneração (capoeiras) e pontos de floresta tropical do tipo perinifólia latifoliada. Mais próximo da Baía de Sepetiba é prevalece a vegetação de mangue (Secretaria de Meio Ambiente do Rio de Janeiro, 1998).

Clima

O clima da área apresenta variações que ocorrem de acordo com a altitude, a disposição do relevo da bacia de drenagem e em função da presença do Oceano Atlântico. Segundo a classificação de Koppen, a região apresenta caráter tropical quente e úmido, com duas zonas pluviométricas distintas, devido ao contraste topográfico entre baixada e as encostas que a circundam. Por receberem ventos úmidos provenientes da Baía de Sepetiba, nas baixadas, o verão é úmido com inverno mais seco, enquanto que nas encostas das serras a pluviosidade é mais elevada sem uma estação seca definida (CAMPOS, 1996).

O clima Tropical (Figura 9), segundo Koppen, apresenta verão chuvoso e inverno seco, com precipitações médias de 1500 mm/ano distribuídas de Outubro a Maio. A temperatura máxima média anual corresponde ao mês de Fevereiro (25,7°C), e a mínima média anual corresponde ao mês de Julho (19,6°C) (INMET, 2016).

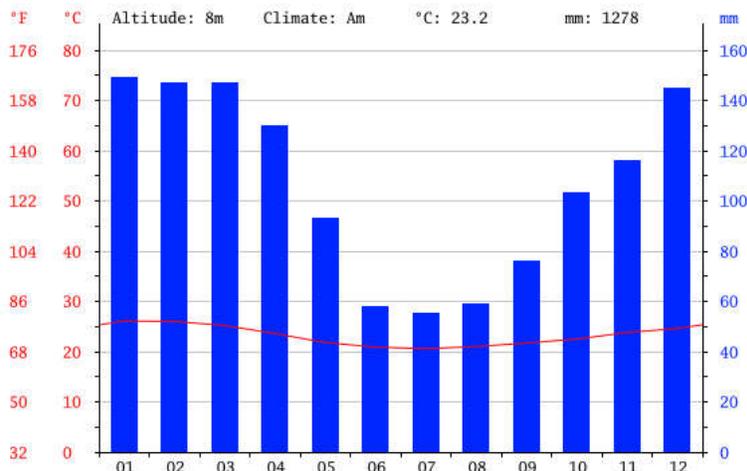


Figura 9. Variação anual de chuvas no Estado do Rio de Janeiro (INMET, 2016).

Hidrogeologia Regional

Segundo IPP (2004), a área está inserida na bacia hidrográfica da Baía de Sepetiba, na qual engloba as sub-bacias Secundárias do Rio Campinho, do Rio da Prata do Mendanha, Piraquê/Cabuçu, do Rio Piracão, do Rio do Portinho e Restinga da Marambaia (Figura 10). Neste contexto podem ser diagnosticados dois tipos de sistemas aquíferos: Um de características cristalinas relacionado às elevações rochosas, conceituando-se como sistema

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

“aquífero fissural”. O outro apresentando características de sistemas deposicionais sedimentares, conceituando-se como sistema “aquífero intergranular”.

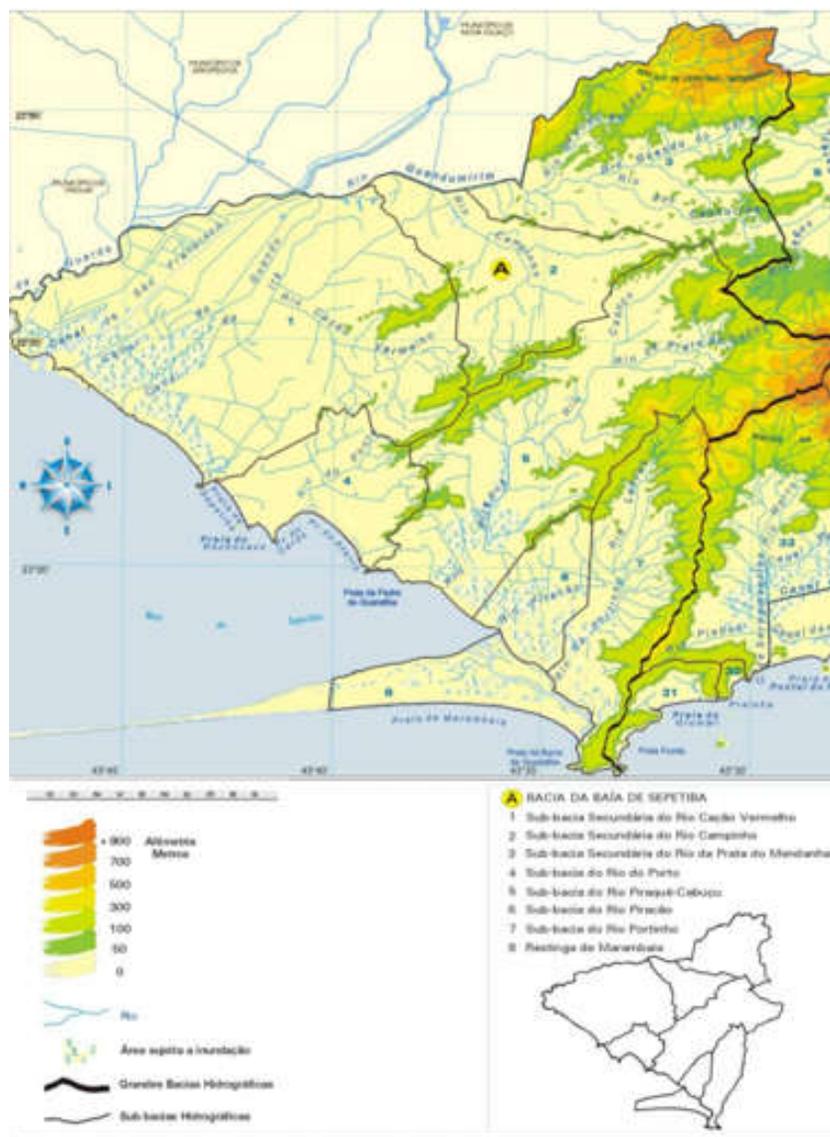


Figura 10. Mapa regional das sub-bacias hidrográficas nas regiões de Campo Grande e Guaratiba (IPP, 2004).

As rochas que representam a parte cristalinas da área de estudo estão relacionadas às Serras e Maciços apresentados tanto em superfície como no substrato rochoso, que serve como base para deposição dos sedimentos e solos inconsolidados. O sistema de aquífero intergranular é representado pelos sedimentos aluvionares dos rios que compõem a Bacia Hidrográfica do Rio Guandu na área de estudo (PETROBRÁS, 2009).

Nos aquíferos fissurais ocorre a recarga em rochas expostas, normalmente na cabeceira das bacias e sub-bacias hidrográficas, que provem das precipitações de chuvas naquela região. Nos aquíferos intergranulares a recarga se dá de forma mais direta, com chuvas na região, escoamento de águas de regiões mais elevadas e do próprio aquífero fissural, que pode ter contatos com os aquíferos intergranulares em zonas mais profundas.

Aspectos Hidrodinâmicos da Área

Os aspectos hidrodinâmicos da região de Guaratiba-RJ apresentam-se de duas formas: a) um sistema de aquífero intergranular, e b) um sistema de aquífero fissural. O mais presente, na região de Guaratiba, é o aquífero intergranular. Dados adquiridos do relatório da Petrobrás (2009) mostram o fluxo de água subterrânea em direção bacia de Sepetiba (Figura 11), que está direcionado a partir das regiões montanhosas em direção as sub-bacias mais importantes.

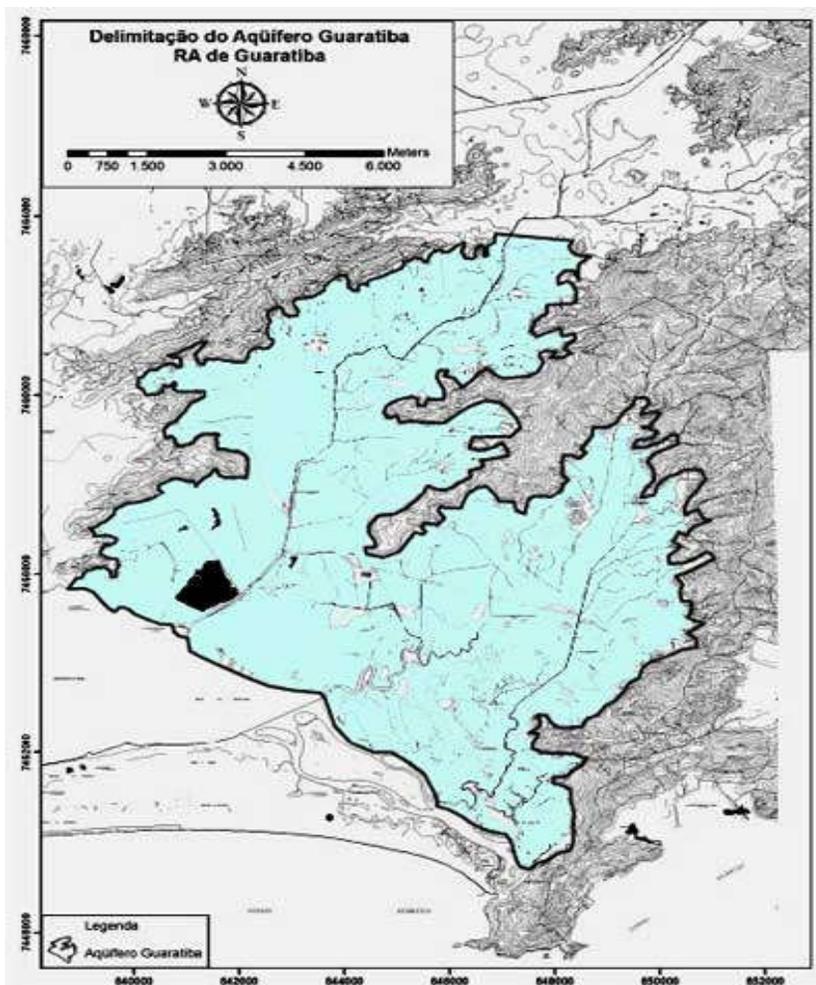


Figura 11. Delimitação do Aquífero Guaratiba (Petrobras, 2009).

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

Tipos de Poços

Na região Administrativa de Guaratiba foram monitorados três tipos de poços além de regiões de nascentes. Os três tipos de poços são: Cacimba (que é um poço raso, também chamado de cisterna, no qual sua construção se deu de forma manual), PTR (poço tubular raso), e PTP (poço tubular profundo). Esses poços foram cadastrados e monitorados e dando origem aos dados usados para a confecção dos mapas de vulnerabilidade.

Método do GOD

A metodologia GOD foi desenvolvida em 1987 por Foster e trata-se de um dos métodos mais utilizados na determinação da vulnerabilidade, devido a sua simplicidade de conceitos e aplicação (RIBEIRO, 2011). O método de GOD consiste basicamente na avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos e de cargas poluentes provenientes de atividades antrópicas realizadas na superfície terrestre. Ele determina se o aquífero está suscetível à contaminação (ROMEIRO, 2012).

As três fases para a geração do mapa de vulnerabilidade (Figura 12) são feitas da seguinte maneira: a primeira fase de aplicação do método de GOD consiste na identificação do tipo de grau de confinamento (G). Ele avalia o aquífero em um intervalo de 0,0 até 1,0. A segunda fase de aplicação do método de GOD consiste na avaliação e descrição em relação a ocorrência de estratos geológicos (O). A terceira fase (D) é dada pela determinação da profundidade do nível da água, sendo representada em uma escala de 0,6 até 1,0.

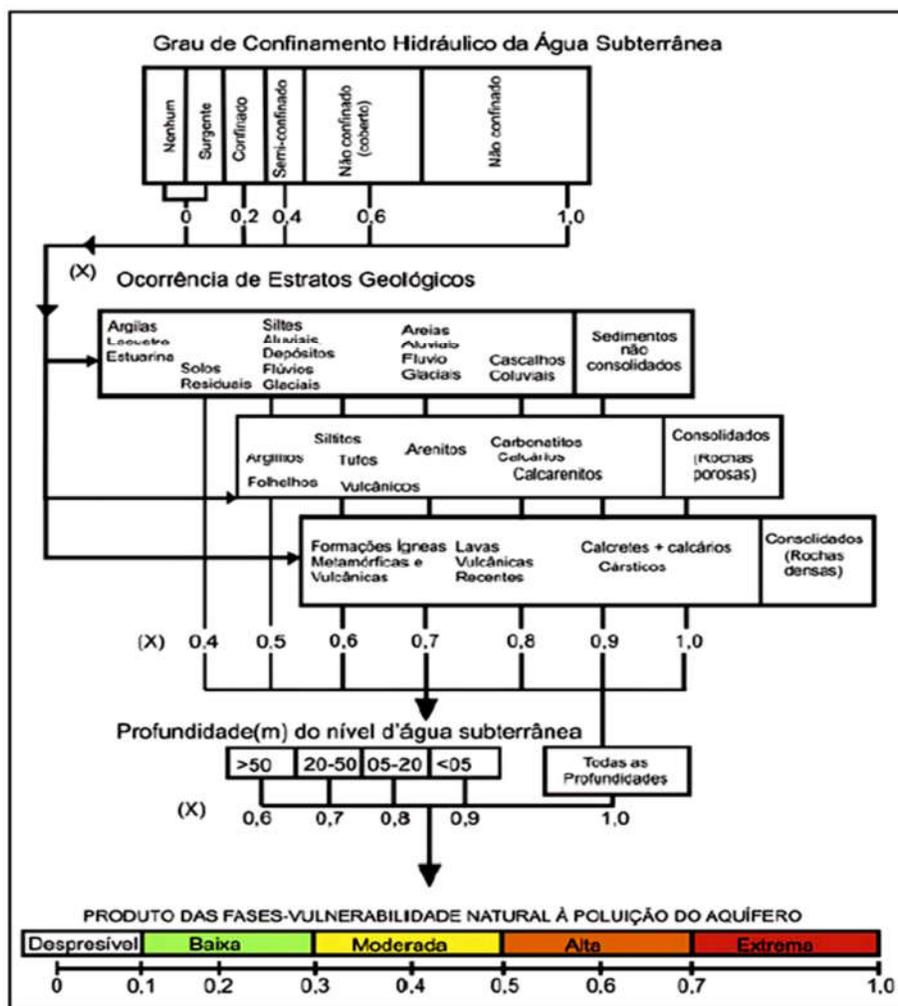


Figura 12. Sistema de avaliação do índice de vulnerabilidade natural através do Método de GOD (Adaptado de Foster *et al.*, 2003).

Modelagem Espacial

Para se representar o modelo de vulnerabilidade de GOD é preciso um conjunto de informações de formato espacial, aqui utilizando as técnicas de SIG, gerando mapas resultantes de modelagem destes planos. Na elaboração dos mapas foram utilizados o *software*: ArcGis 10.3.

Para a confecção dos mapas de geologia (Figura 13), litologia, solo e geomorfologia foram utilizados arquivo vetorial, utilizando a extensão *analysy tools* do ArcMap 10.3, onde a extração da área de interesse associado com a área de estudo, ocorreu através da função *Clip*. Para fundir as distintas camadas do mapa de estudo, foi utilizado a extensão *Data management tools e General*.

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

Para os mapas dos parâmetros G (Grau de confinamento), O (Ocorrência litológicas), D (Distância no nível da água), foi elaborada uma tabela de atributo com as informações obtidas de mapas e dados de campo, atribuindo também o peso da metodologia para cada mapa. Para isso utilizou-se a função *reclassify*, onde cada classe é identificada com uma cor diferente.

Para o mapa final da vulnerabilidade foi necessário transformar os mapas dos três distintos parâmetros da metodologia GOD, do formato *shapfile* para *raster*, com a função *polygon raster*. Após a transformação utilizamos processador *Raster Calculator*, onde inserimos a seguinte equação:

$$\text{Vulnerabilidade do aquífero} = G * O * D$$

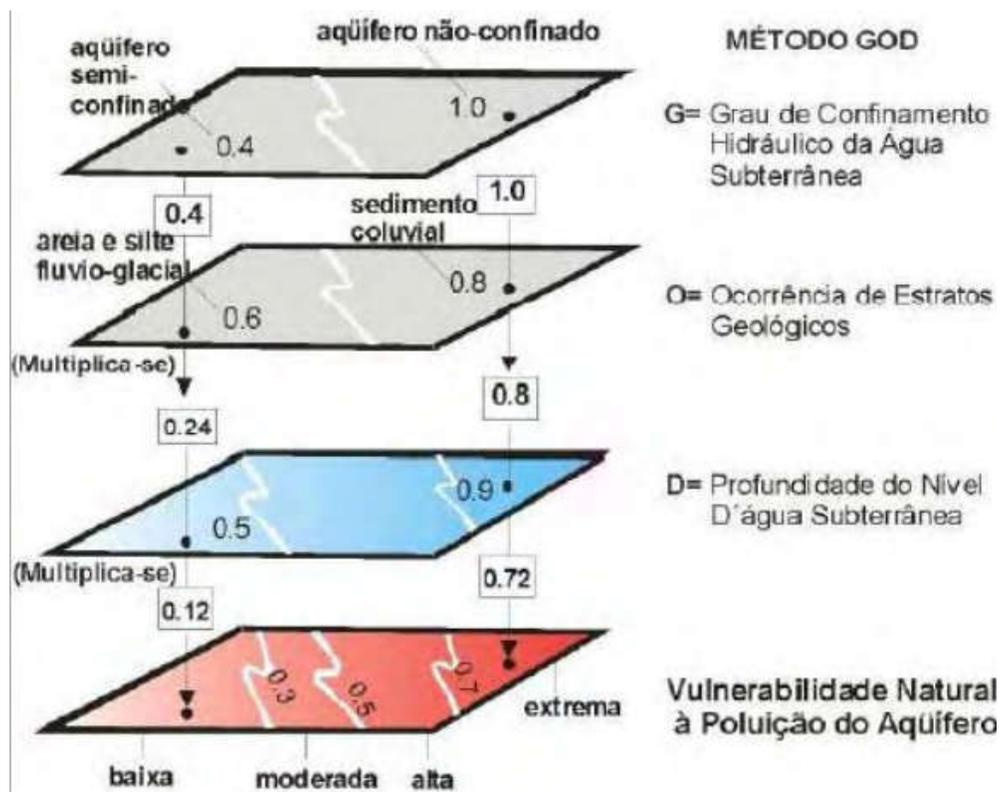


Figura 13. Construção do mapa de Vulnerabilidade de GOD (Foster *et al*, 2006).

Mapa da Zona Saturada

Depois de todas as avaliações em relação aos três parâmetros (GOD) é feito um processo para a geração de um quarto mapa, o mapa de vulnerabilidade (Figura 14). Esse mapa vai direcionar possíveis ações para proteção ou correção da área em estudo.

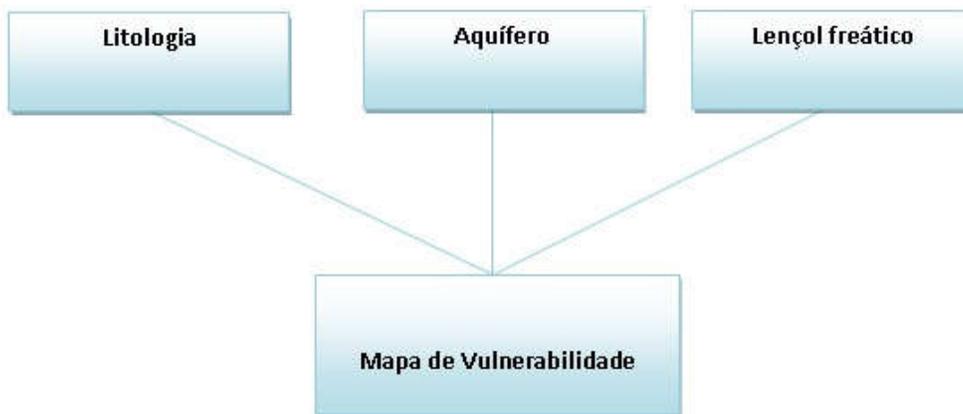


Figura 14. Parâmetros relevantes para obter o mapa de Vulnerabilidade.

Mapa de Ocorrência de Água Subterrânea (G)

Para a confecção do mapa de ocorrência de água subterrânea (G) foram utilizados dados do relatório final de Avaliação Hidrogeológica e da Qualidade das Águas Subterrâneas nas Regiões Administrativas de Campo Grande e Guaratiba – Município do Rio de Janeiro/RJ, Petrobrás 2009. A Tabela 1 apresenta atributos numéricos, utilizados na metodologia de GOD, que diferencia os tipos de ocorrência de água subterrânea.

Tabela 1. Índices de vulnerabilidade para o grau de confinamento do aquífero (G) (Adaptado de Foster et al., 2006).

Grau de confinamento da água subterrânea	Pesos
Nenhum ou surgente	0
Confinado	0,2
Semi-confinado	0,4
Não confinado (Coberto)	0,6
Não confinado	1,0

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

A região de Guaratiba-RJ é uma área caracterizada por domínios de caráter não confinado e não confinado coberto. No aquífero em Guaratiba (em verde no mapa, Figura 15) é caracterizada por apresentar domínios não confinados cobertos em toda a zona de estudo. Assim, de acordo com o índice de GOD, o atributo para o parâmetro relacionado ao grau de confinamento foi igual a 0,6 (Figura 16). Para classificação de toda a área de Guaratiba vamos fazer uma análise subliminar da área dita Maciço Pedra branca (em vermelho, Figura 16), atribuindo valores para essa zona que é tida como zona de recarga de grande parte do aquífero Guaratiba.

Aquíferos não confinados são motivos de preocupação por serem de muito fácil contaminação. Isso advém de se tratar de uma zona vadosa, geralmente pouco espessa, e com tendência a apresentar um nível freático mais raso.

Cutrim *et al.* (2010) concluíram que o modo de ocorrência do aquífero tem grande correlação com o seu grau de vulnerabilidade. Ribeiro *et al.* (2011) ao avaliarem um aquífero não confinado ressaltaram a preocupação com relação à possibilidade de contaminação das águas subterrâneas que se concentram nos aquíferos não confinados, onde a zona vadosa é pouco espessa e o nível do lençol freático é raso.

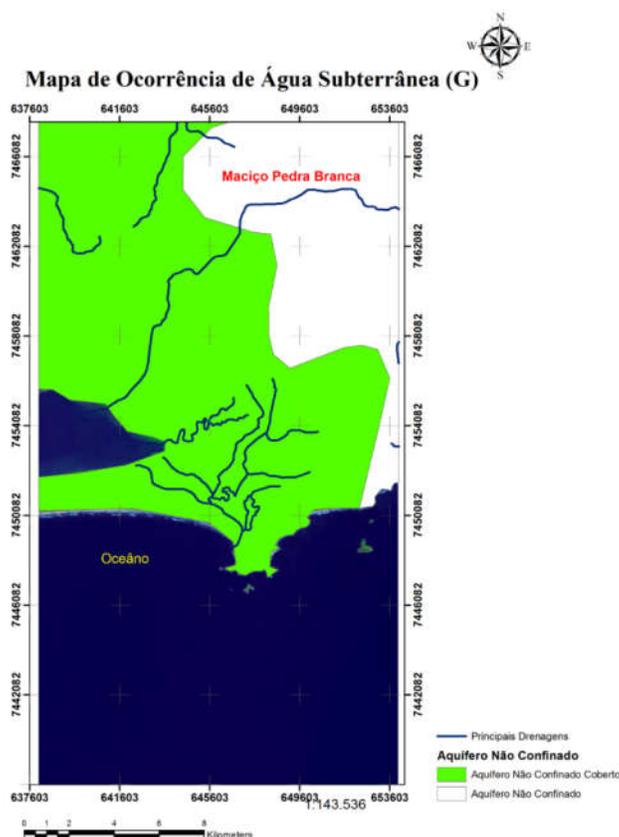


Figura 15. Área de estudo, Guaratiba-RJ.

Mapa de Ocorrência de Água Subterrânea (G)

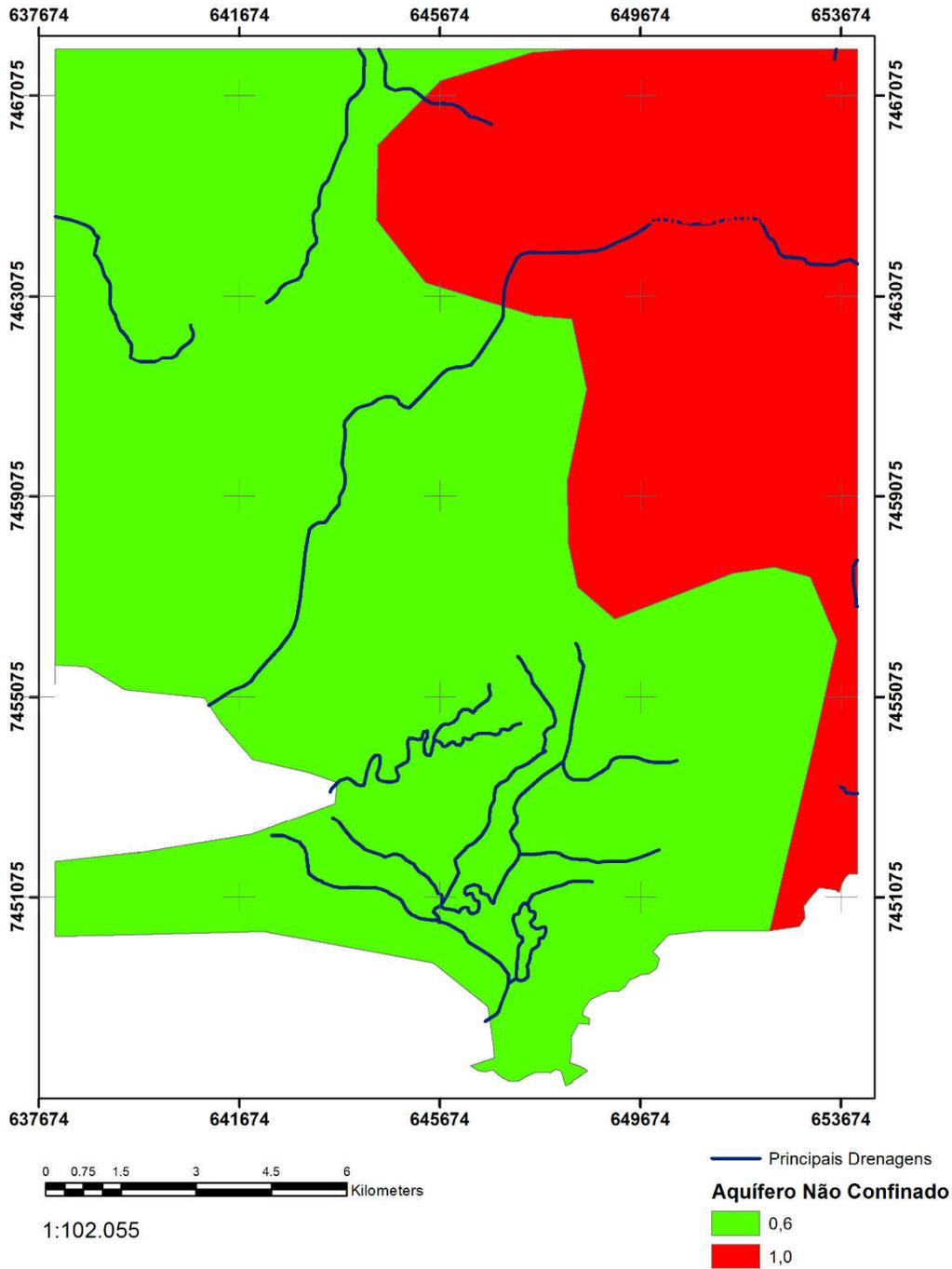


Figura 16. Área do aquífero Guaratiba. Classificação em 0,6 da região de baixada de Guaratiba. Classificação 1,0 da região do Maciço Pedra Branca.

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

Mapa de litologia da zona não saturada (O)

De acordo com o CPRM (2016) podemos definir Litologia como o estudo da origem e natureza das rochas. Segundo o IBGE (1998) o caráter litológico depende mais do ambiente sedimentar do que da idade de todas as unidades litoestratigráficas, ou seja, das camadas de rochas que delimita a área.

Foram utilizados os mapas geológico e geomorfológico elaborados pela CPRM/ DRM-RJ e CPRM, na escala 1:400.000 e 1:250.000, dos anos de 2001 e de 2000. Adquiriu-se o Mapa de Solos Semi-detalhado do Município do Rio de Janeiro, escala 1:75.000, junto a Embrapa Solos (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), elaborado no ano de 2004.

Para se saber o tipo de solo da região de Guaratiba-RJ foi preciso buscar informações descritivas e cartográficas junto a órgãos responsáveis (Embrapa, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; SIURB, Sistema de Informações Urbanas; CPRM, Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais), e através de trabalhos envolvendo SIG (Sistema de Informações Geográficas) tratar os dados elaborando assim um mapa de solos da região.

Na Figura 17 podemos notar os principais tipos de solo na região de Guaratiba, que é composta por três tipos principais: Espodossolo Ferrocárbicos, Argilossolo vermelho-amarelado e Planossolo Háptico.

O espodossolo são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B espódico, imediatamente abaixo de horizonte E ou A, dentro de 200cm da superfície do solo, ou de 400cm de profundidade, se a soma do horizonte A+E ou horizonte hístico + E ultrapassa 200cm de profundidade (EMBRAPA, 2006). Espodossolo ferrocárbico são solos com acúmulo, principalmente, de carbono orgânico e ferro no horizonte B espódico, presença de horizonte Bhs e/ou Bs acompanhados ou não de horizonte Bh, dentro de 200cm da superfície do solo (EMBRAPA, 2011).

Argilossolo vermelho-amarelado são solos definidos pela presença de horizonte diagnóstico B textural, apresentando acúmulo de argila em profundidade devido à mobilização e perda de argila da parte mais superficial do solo (EMBRAPA, 2006). Apresentam frequentemente, mas não exclusivamente, baixa atividade da argila (CTC), podendo ser alíticos (altos teores de alumínio), distróficos (baixa saturação de bases) ou eutróficos (alta saturação de bases), sendo normalmente ácidos.



Mapa de litologia da zona não saturada (O)

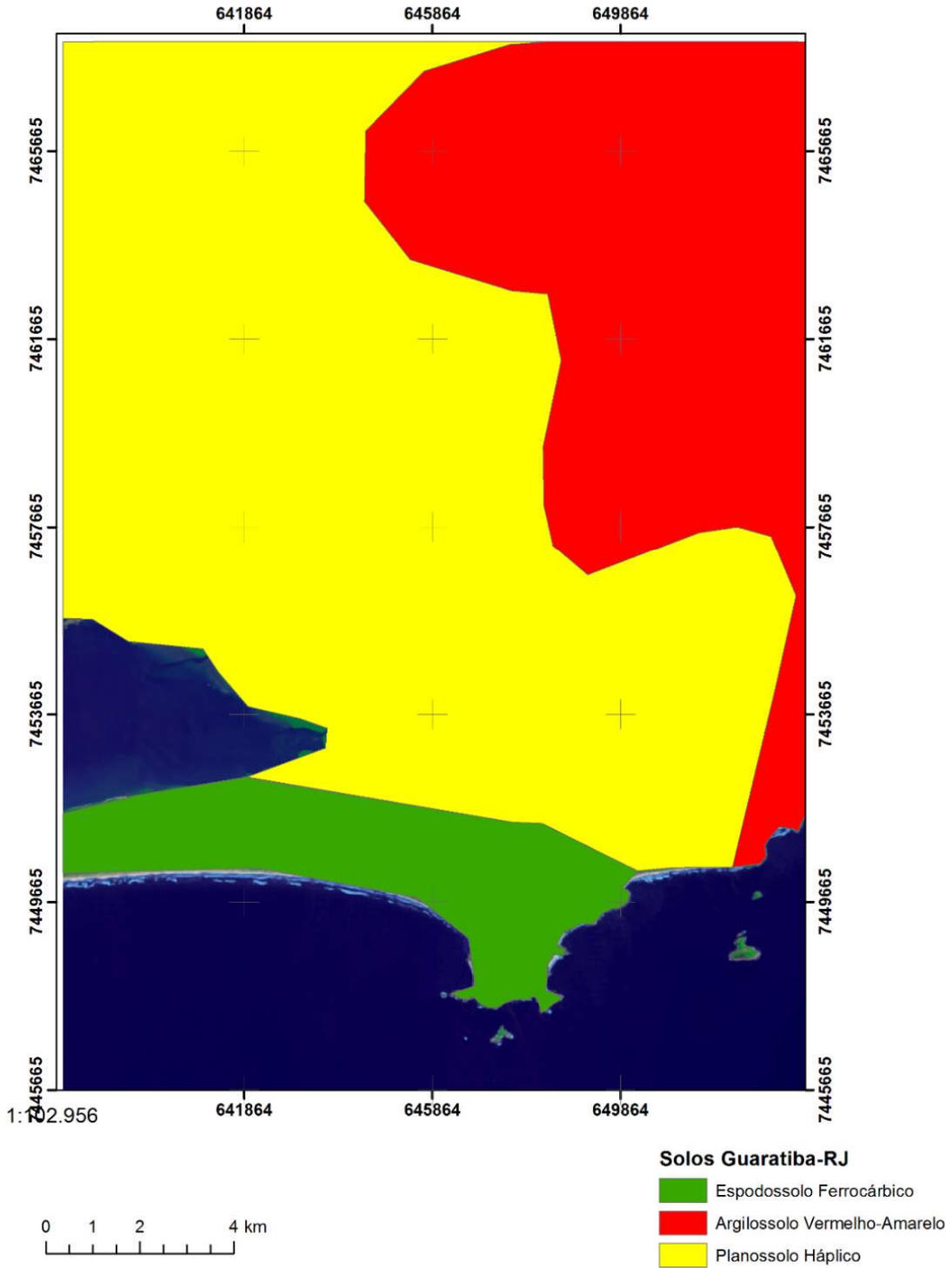


Figura 17. Mapa de solos da região de Guaratiba-RJ.

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

Planossolos Háplicos são aqueles que possuem a característica de serem bem abastecidos de bases, o que lhes confere elevado status nutricional, mas com sérias limitações de ordem física relacionadas principalmente ao preparo do solo e à penetração de raízes devido ao adensamento (EMBRAPA, 2011). Em condições de adensamento e em função do contraste textural, estes solos são muito susceptíveis à erosão. Apresenta teores muito elevados de alumínio no solo afetando significativamente o desenvolvimento de raízes, com atividade de argila menor do que 20 cmolc/kg de argila. Presença de carbonato de cálcio sem que este afete o desenvolvimento da maioria das plantas (EMBRAPA, 2006).

Em estudos mais específicos, a área é composta basicamente pelo Maciço da Pedra Branca e de regiões de baixada, que se estendem até o mar (Baía de Sepetiba). Assim, a ocorrência dos solos está associada à geomorfologia da área. As regiões dos maciços rochosos são caracterizadas por argissolos, sendo os interflúvios compostos predominantemente por latossolos, devido a alteração das rochas constituintes desses maciços. As regiões de baixada são caracterizadas principalmente por solos orgânicos e argilosos, influenciados pela proximidade com o mar. Gleissolos, organossolos, espodossolos e solos de mangue são predominantes neste tipo de ambiente (Embrapa, 2011).

Mapa do Nível do Lençol Freático (D)

Os dados aqui usados são referentes ao relatório final da Petrobrás dito como Avaliação Hidrogeológica e da Qualidade das Águas Subterrâneas nas Regiões Administrativas de Campo Grande e Guaratiba – Município do Rio de Janeiro/ RJ.

Os dados coletados (Anexo I - Tabela 2) indicam diferentes tipos de captação, sendo elas o poço tubular profundo (PTP), poço tubular raso (PTR), cacimba e nascente.

Na Figura 18 apresenta a disposição dos poços ao longo de toda a área da região de Guaratiba-RJ, e os tipos de poços de cada localidade. São ao todo 87 poços cadastrados sendo três nascentes, trinta e sete (37) do tipo cacimba, três (3) PTP e quarenta e quatro (44) PTR.



Distribuição de Pontos Guaratiba-RJ (D)

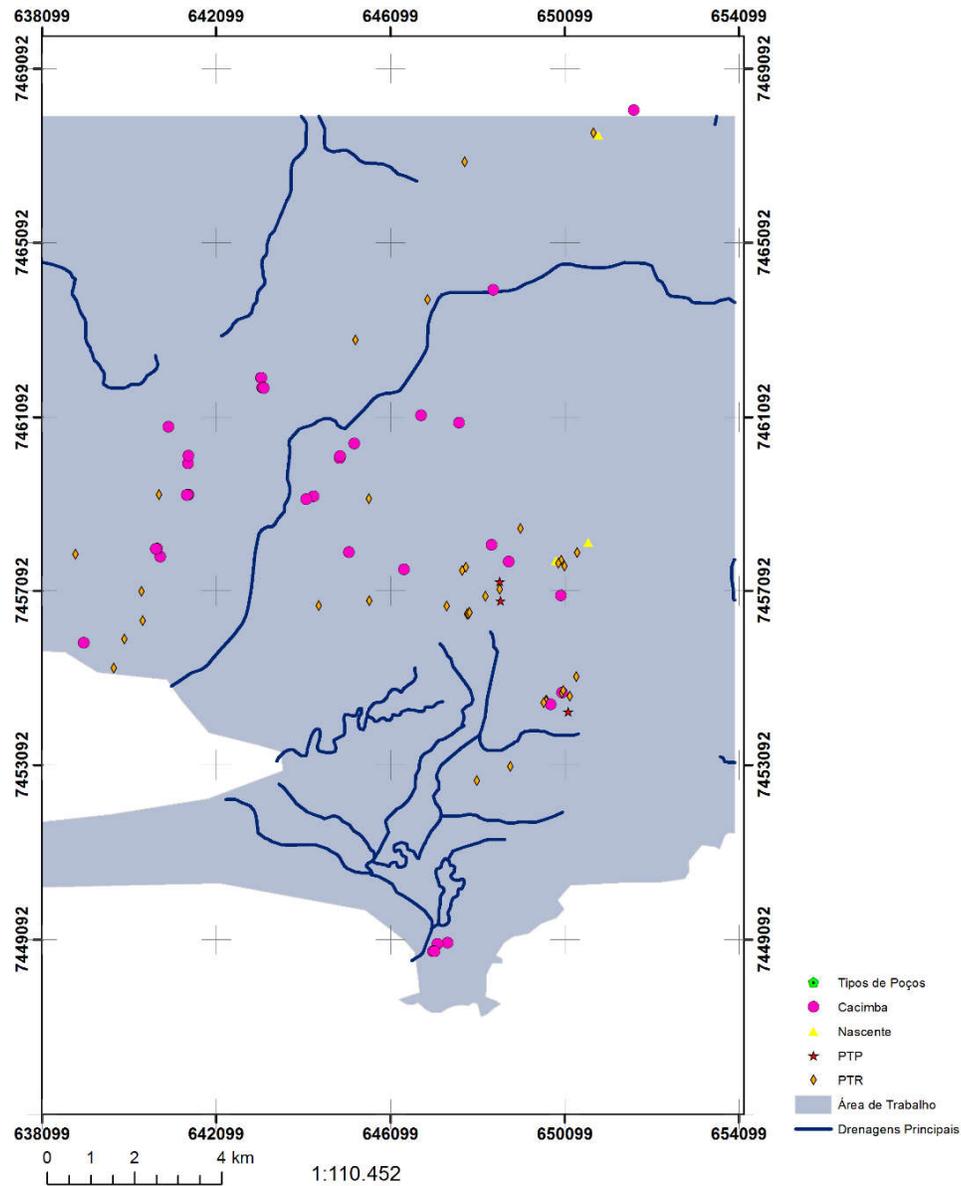


Figura 18. Distribuição de Pontos e as principais drenagens da região de Guaratiba-RJ.

Para o georreferenciamento dos pontos de estudo foi utilizado um GPS (*Global Positioning System*) de navegação modelo Garmin76MAP CSX. Foi adotado o *datum* do sistema Geodésico Brasileiro atual, o SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas). O sistema de coordenadas adotado foi o Universal Transverse Mercator-UTM.

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

Após o georreferenciamento dos pontos cadastrados foi realizada uma interpolação a fim de se obter o mapa da distribuição do nível do lençol freático na área de estudo. Para tanto, foi utilizado o interpolador IDW (*Inverse Distance Weighed*), presente no pacote do *software* ArcGis. Ressalta-se que o uso do interpolador IDW é recomendado quando a variável a ser mapeada diminui com a distância na localização amostrada.

Na Equação 1 apresenta-se como o valor do ponto desconhecido é calculado:

$$\hat{Z} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

Em que,

\hat{Z} = valor resultante calculado a partir das amostras Z_i até Z_n ;

n = número de amostras da região a ser analisada;

d_i = distancia de cada ponto em relação ao ponto a ser calculado;

p = expoente de ponderação;

Z_i = valor de cada amostra.

Medeiros *et al.* (2011) avaliaram métodos de interpolação na determinação de um mapa de nível de lençol freático e verificaram que o IDW foi aquele que apresentou valores mais próximos entre o dado observado e o medido.

Na Tabela 3 estão atribuídos os pesos da metodologia de GOD utilizados para os diferentes níveis do lençol freático.

Tabela 3. Índices de vulnerabilidades do aquífero associado ao nível do lençol freático (Foster *et al.*, 2006).

Profundidade do lençol freático	Pesos
Maior que 50 m	0,6
Entre 50 e 20 m	0,7
Entre 20 e 5 m	0,8
Menor que 5 m	0,9

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Mapa de Ocorrência de Água Subterrânea (G)

Conforme descrito na metodologia proposta por Foster e Hirata (1988), este parâmetro pondera o Grau de Confinamento das unidades hidrogeológicas, atribuindo os valores máximos para as unidades que sejam livres ou não confinadas.

A área de estudo é caracterizada por apresentar aquífero não confinado fraturado, onde a água circula pelas fissuras resultantes do fraturamento das rochas relativamente impermeáveis. Porém há duas zonas do aquífero não confinado (Figura 20): a primeira é a leste, no dito “Maciço Pedra branca” que possui características de rochas ígneas, no qual se tem o aquífero **não confinado**; a segunda fica na zona de baixada, a oeste, que é representado aqui pelo **aquífero não confinado coberto**.

O Maciço Pedra Branca, a leste, em vermelho, Figura 20, não é propriamente referente ao aquífero Guaratiba, mas influência diretamente no fluxo e no nível freático, como já dito anteriormente. Ele é tido como zona de recarga e essencial para a manutenção da água do aquífero Guaratiba. Portanto ele foi classificado como aquífero não confinado e, de acordo com a avaliação do índice de vulnerabilidade natural através do Método de GOD (Figura 19) Foster *et al.* (2003), seu valor atribuído para o parâmetro grau de confinamento foi igual a um (1,0).

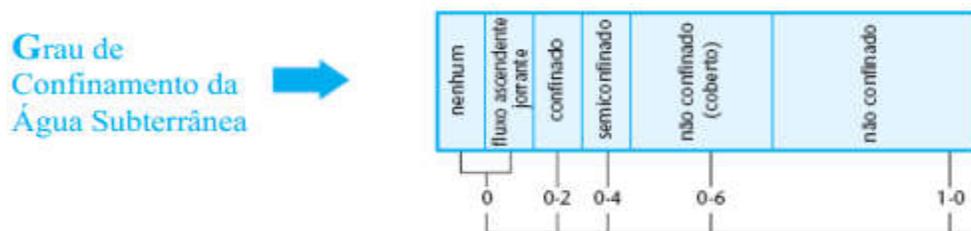


Figura 19. Sistema de avaliação do índice de vulnerabilidade natural através do Método de GOD. Grau de Confinamento da Água Subterrânea (Adaptado de Foster *et al.*, 2003).

No aquífero não confinado coberto, a oeste em verde, Figura 20, apresenta cobertura sedimentar aluvionar, com sedimentos argilosos e mistos argilo-arenosos que cobrem o fraturado da baixada em Guaratiba. Assim ele foi classificado como aquífero não confinado coberto e, de acordo com a avaliação do índice de vulnerabilidade natural através do Método de GOD (Figura 19) Foster *et al.* (2003), seu valor atribuído para o parâmetro grau de confinamento foi igual a 0,6.

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

Cutrim *et al.* (2010) concluíram que o modo de ocorrência do aquífero tem grande correlação com o seu grau de vulnerabilidade. De acordo com Foster *et al.* (2006), o trabalho que deve ser realizado em aquíferos não confinados deve ser feito com maior constância pois o risco de contaminantes é maior que em outros tipos de aquíferos.

Desta maneira o índice GOD atribuído para o parâmetro grau de confinamento foi igual a 1 (em vermelho) para a área a leste, e 0,6 para a área a oeste (em verde), conforme apresentado na Figura 20.

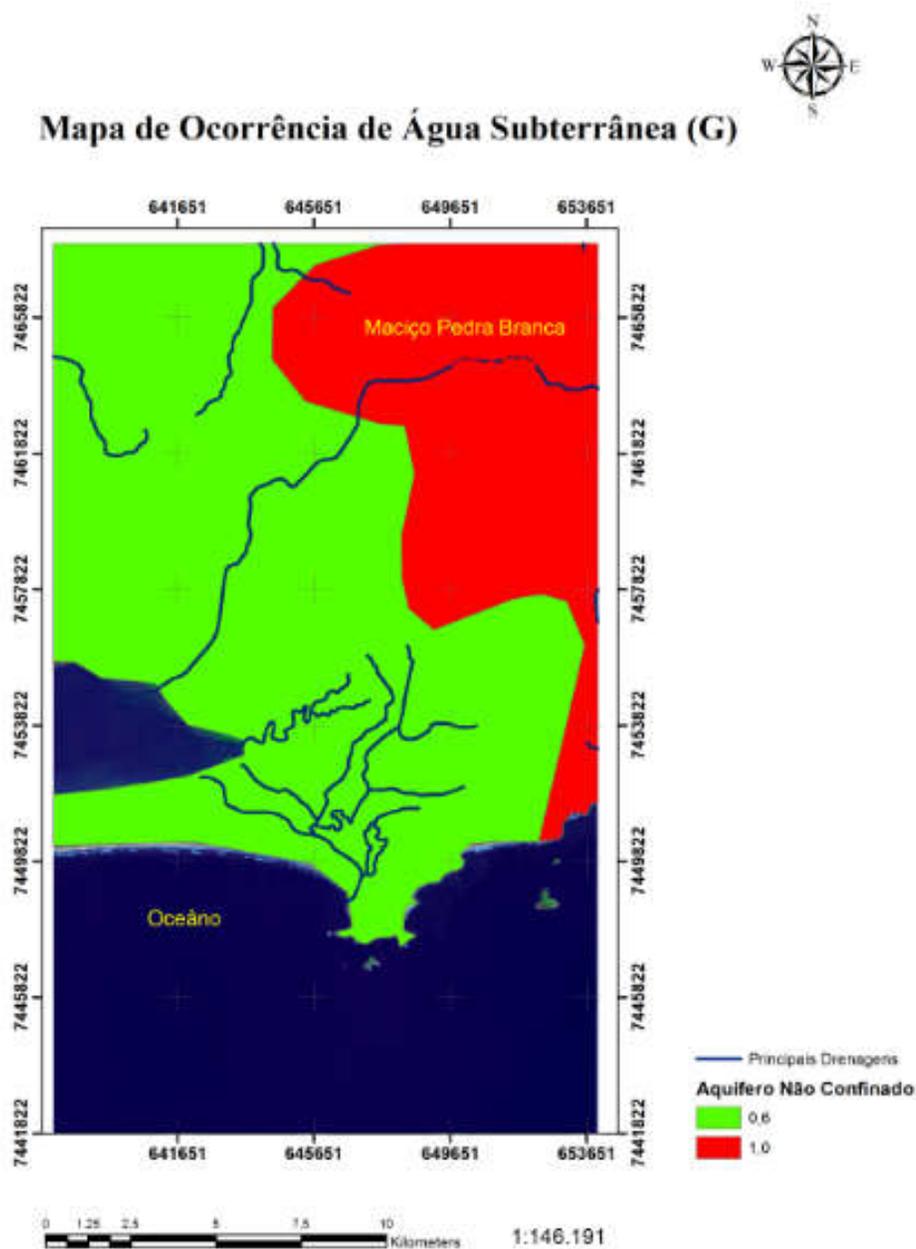


Figura 20. Grau de Confinamento hidráulico da água subterrânea.

Mapa de Caracterização Geológica de Zona Não Saturada (O)

O parâmetro Estratos de Cobertura do método GOD (O), Foster *et al.* (2003), consiste na caracterização litológica das camadas sobrejacentes ao aquífero, que podem conferir um maior ou menor grau de proteção aos mesmos.

Para realizar a classificação de vulnerabilidade quanto à litologia foi utilizado os padrões ditos por Foster *et al.* (2002), que é estabelecido de acordo com a unidade litológica da região, Figura 21.

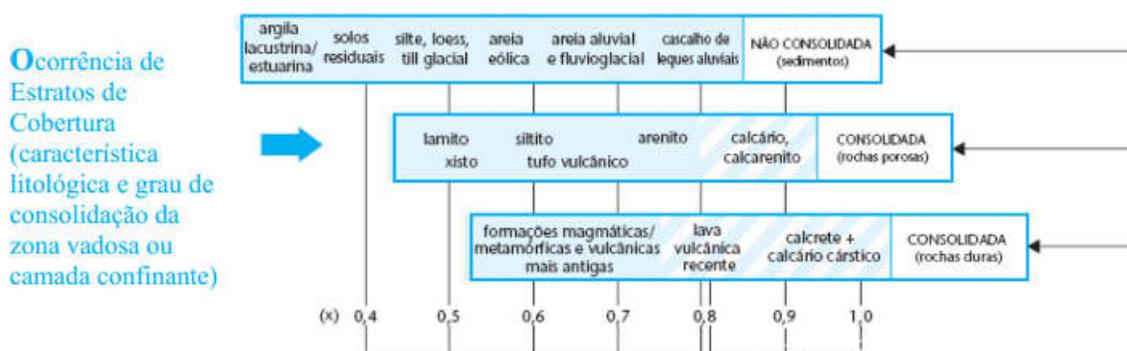


Figura 21. Sistema de avaliação do índice de vulnerabilidade natural através do Método de GOD. Ocorrência de Estratos de Cobertura (O) (Adaptado de Foster *et al.*, 2003.)

De acordo com a CPRM (2000) os depósitos flúvios-lagunares têm sua origem a partir de regiões que sofreram a deposição fluvial em um ambiente transicional marinho raso. Estes depósitos são compostos por areias e lamias que ficam acima das camadas de areias biodetríticas e/ou sedimentos lamosos de fundo lagunar. Os sedimentos arenosos são compostos por lentes de silte e argila, areias brancas, vasas, mangues e cascalhos, Cortines 2008.

A região de Guaratiba é caracterizada por arenitos fluviais, arenitos muito finos, siltosos e siltitos arenosos, de coloração cinza avermelhada, de baixa permeabilidade. Assim, foi preciso mesclar os tipos de sedimentos encontrados na área, pois esses sedimentos não possuem classificação única no índice de GOD.

Para a definição dos pesos atribuídos às unidades hidrogeológicas aflorantes na área de estudo, foram tomadas as suas características geológicas e hidráulicas, bem como o tipo de cobertura pedológica existente em suas respectivas áreas de ocorrência.

Desta maneira, e assim como Coridola *et al.* (2005), foi utilizado um critério diferenciado para definir o peso de uma das unidades litológicas encontradas na área. Na Tabela

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

4 estão atribuídos os pesos da metodologia de GOD utilizados para os diferentes tipos de unidades litológicas.

Tabela 4. Índices de vulnerabilidades do aquífero associado ao tipo de unidade litológica (Coridola *et al.*, 2005).

Unidades	Pesos
Solos residuais argilosos	0,35 a 0,46
Solos residuais mistos argilosos	0,46 a 0,62
Solos residuais mistos argilo-arenosos	0,62 a 0,79
Solos residuais arenosos	0,79 a 0,90

Desta forma temos duas áreas distintas na composição do mapa (Figura 22): uma com solos residuais mistos argilosos-arenosos (em azul no mapa), caracterizada pela mistura de sedimentos de arenitos fluviais, arenitos muito finos, siltosos e siltitos arenosos. Diante do exposto, considerou-se uma nota de 0,55 para os locais onde foi identificada a presença desse tipo de sedimento e pela característica do solo, já descrito anteriormente.

A área do alto topográfico, apresentado no mapa de MDE (Figura 23), apresenta características de rocha fraturada (dura), consolidada, de formação ígnea, com pouco ou nenhuma cobertura sobre a rocha. Na região do Maciço Pedra Branca, (Figura 22, em verde), pode-se relacionar o caráter de rocha consolidada com o tipo de formação, obtendo-se um grau de vulnerabilidade maior, e atribuindo assim peso 0,6, de acordo com a metodologia de GOD.

Mapa do Nível do lençol freático (D)

O parâmetro profundidade do Lençol Freático do Método GOD, pondera a distância que um determinado contaminante deve se infiltrar até atingir a zona saturada da formação aquífera Foster *et al.* (2003). Na Figura 24 apresenta-se o mapa de distribuição do nível do lençol freático na área de estudo. Na área de estudo o nível do lençol freático (NA) variou entre 0,10m até 30,00m, analisando todos os 71 poços nos quais foram possíveis a medição do nível da água (NA).

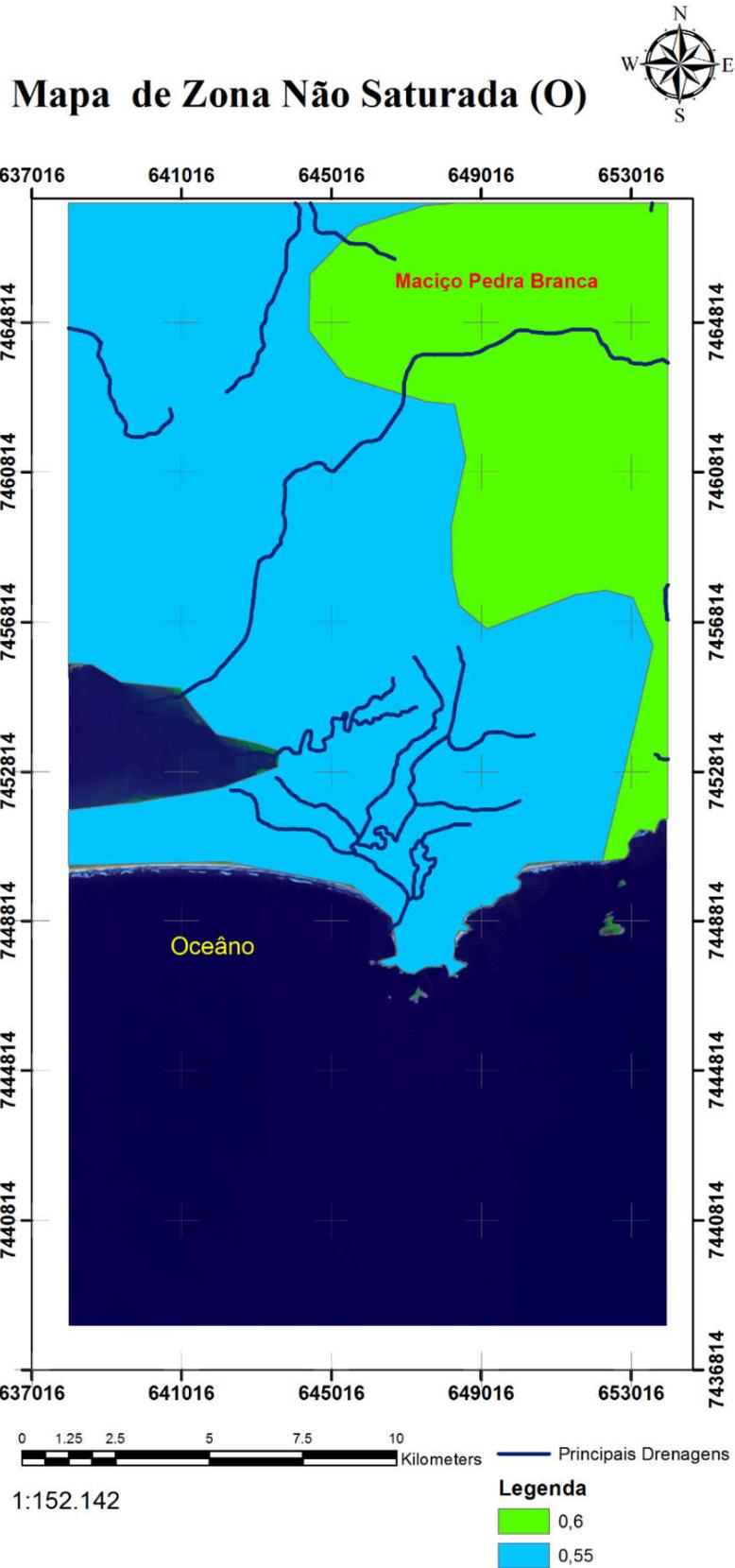


Figura 22. Mapa de caracterização geológica da zona não saturada.

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

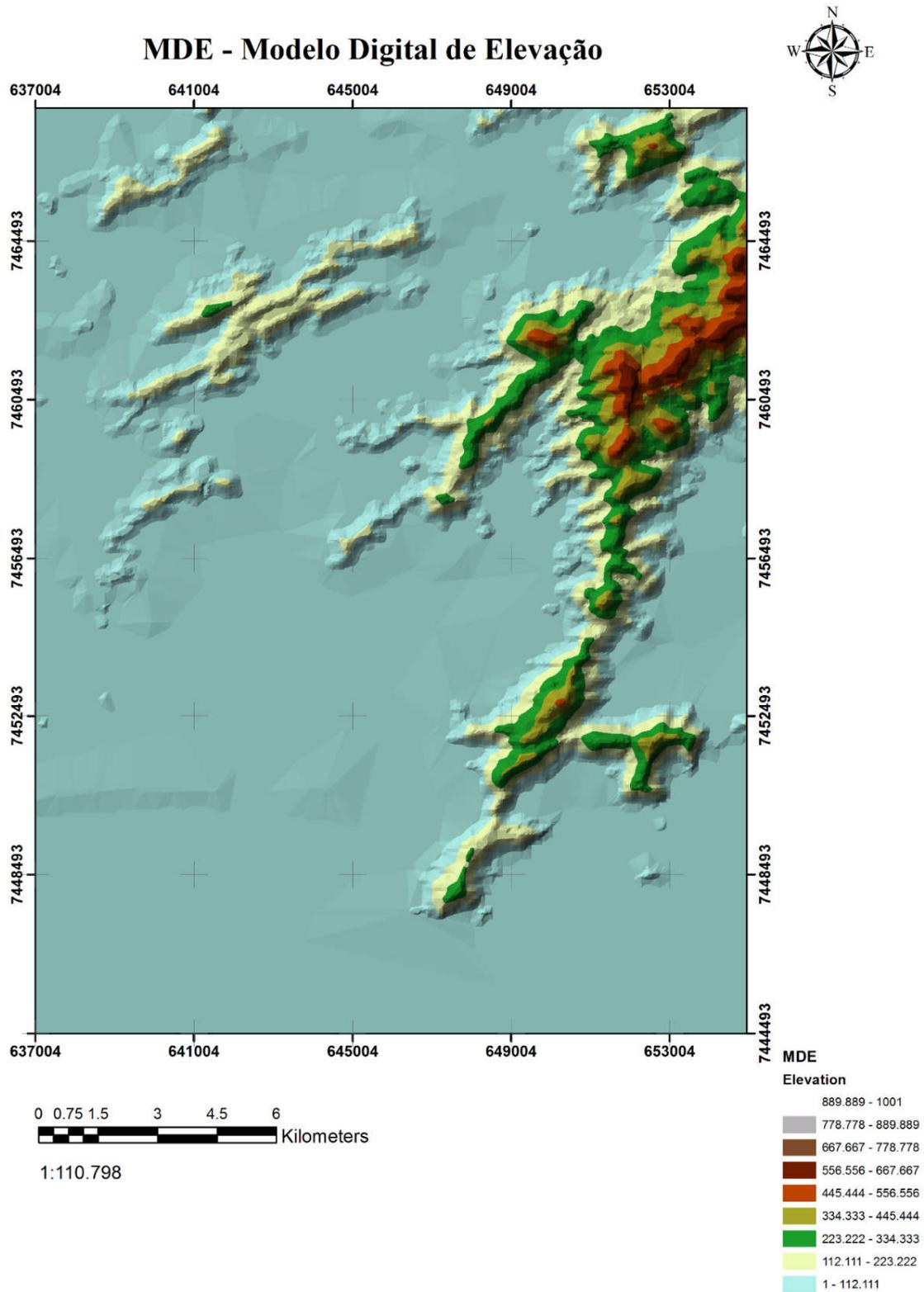


Figura 23. Modelo Digital de Elevação, Guaratiba-RJ.

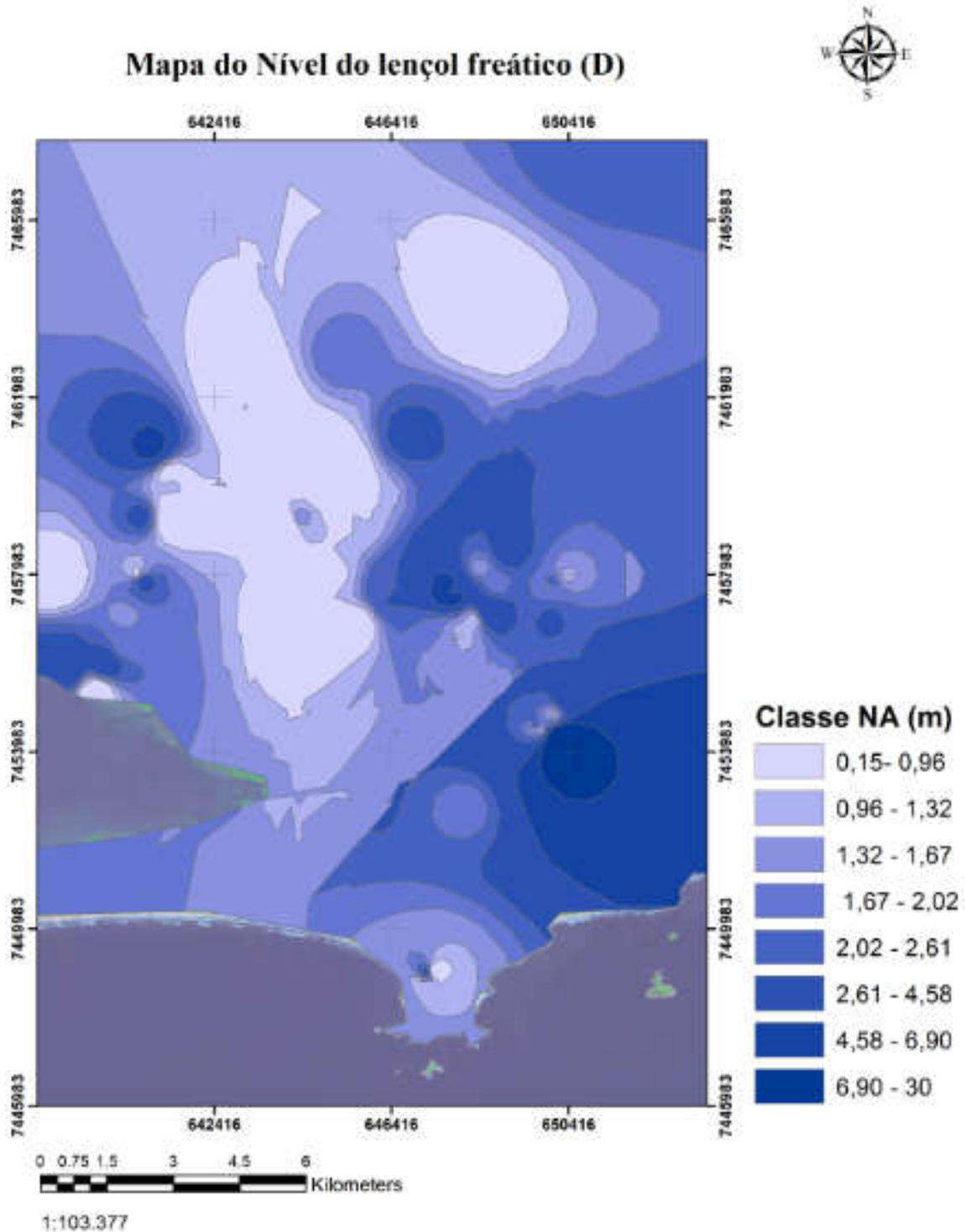


Figura 24. Mapa do Nível do lençol freático (D) com oito diferentes níveis freáticos.

O parâmetro profundidade do Lençol Freático do Método GOD, apresenta uma importância quanto ao tempo que um contaminante necessita para atingir o aquífero. A profundidade do aquífero está associada com o tipo de aquífero da região, uma vez que o mesmo

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

é não confinado (de acordo com o parâmetro G), apresentando o lençol freático raso devido à zona vadosa pouco espessa. As atividades potencialmente geradoras de cargas contaminantes segundo Foster *et al.* (2003) estão relacionadas ao desenvolvimento urbano, à produção industrial, à produção agrícola e à extração mineral. A possibilidade de contaminação desse tipo de aquífero é maior que em outros tipos, por isso os cuidados com contaminantes industriais e domésticos, por exemplo, devem ser mais rigorosos, Foster *et al.* (2003).

Dependendo do tipo de contaminante, se o mesmo for persistente e não degradável, e gerado por uma atividade contaminante amplamente distribuída, a tendência, ao longo dos tempos, é de todos os aquíferos se tornarem vulneráveis. Deste modo, a diluição do contaminante no aquífero pode não diminuir o efeito deste contaminante (Foster e Hirata, 1993). Para os aquíferos considerados com a menor vulnerabilidade à contaminação, estes tendem a ser os mais difíceis de serem reabilitados, quando contaminados, podendo ser considerados de alta vulnerabilidade à contaminação.

O lençol freático com maior proximidade da superfície favorece a vulnerabilidade, devido a isto o peso adotado na metodologia GOD é maior quando comparado a demais profundidades. Desta forma, utilizando a metodologia de GOD, obtivemos três diferentes pesos (parâmetro de profundidade do nível freático (D)), Figura 26. Assim temos valores variando de 0,7 até 0,9 (Figura 25).

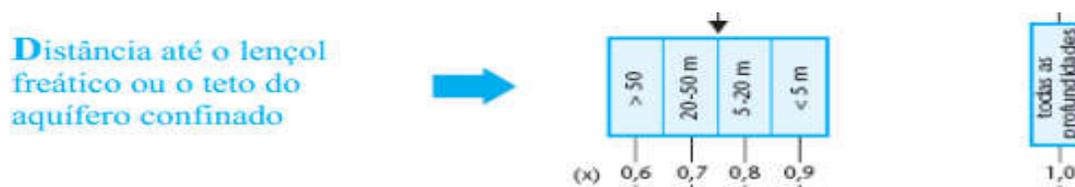


Figura 25. Parâmetros classificatórios para a determinação da distância até o lençol freático (D) pelo índice de GOD (Foster *et al.*, 2003).

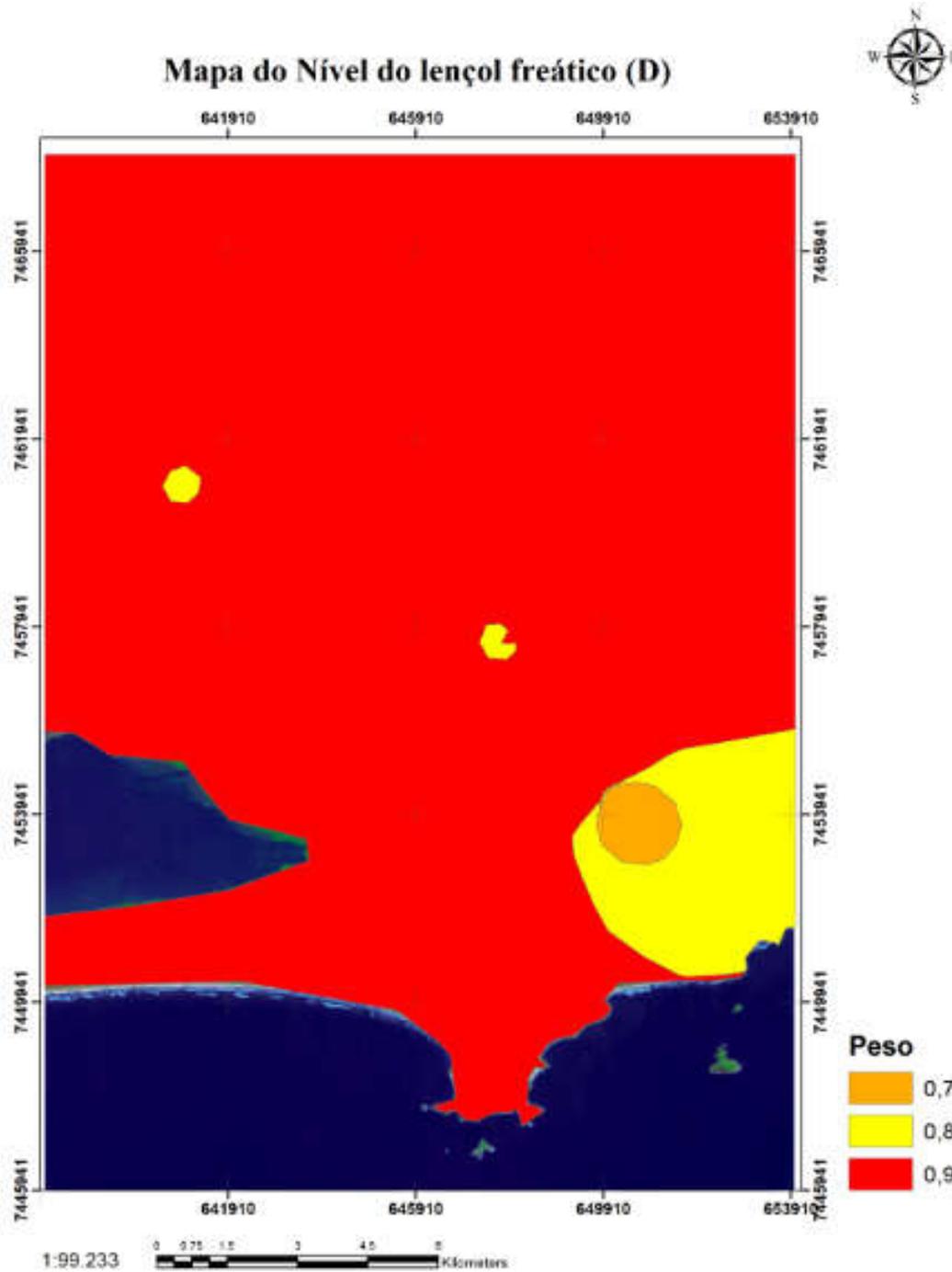


Figura 26. Mapa do Nível do lençol freático (D), dividido por peso.

O parâmetro profundidade do Lençol Freático do Método GOD, pondera a distância que um determinado contaminante deve se infiltrar até atingir a zona saturada da formação aquífera (MONTERO, 2012).

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

Caracterização da Vulnerabilidade Natural à Contaminação

Com a definição dos parâmetros que compõem o Método GOD e com a aplicação do procedimento metodológico apresentado anteriormente, foi possível gerar o mapa de vulnerabilidade natural à contaminação das unidades hidrogeológicas que afloram na região de Guaratiba-RJ (Figura 27).

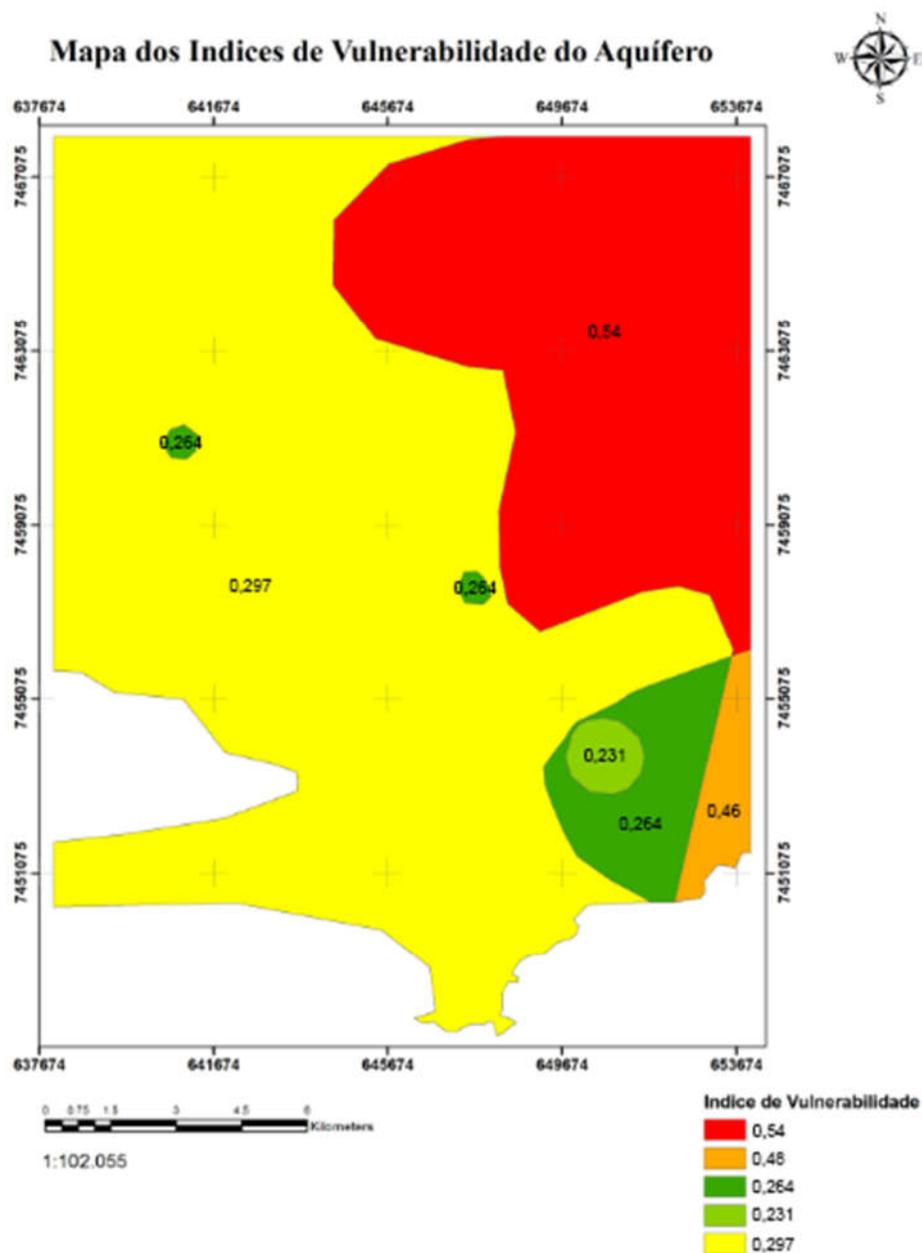


Figura 27. Índice de Vulnerabilidade da região de Guaratiba-RJ, dividido pelo índice de vulnerabilidade de cada região.

Inicialmente, esse produto gerado ainda não está classificado conforme a proposta do Método GOD. No entanto nota-se que a pontos com diferentes índices resultado da junção dos três parâmetros de GOD (Figura 27). Podemos observar que os índices mais altos são referentes aos pontos de maior elevação, que não apresentam ou apresentam pouco extrato de cobertura e que são regiões de recarga do aquífero.

Para a geração do mapa de classificação da vulnerabilidade natural foram utilizados os pesos dos diversos produtos compostos anteriormente pelo Grau de Confinamento (G), Estratos de Cobertura (O) e Profundidade do Lençol Freático (D), que foram classificados de acordo com as faixas de valores propostas por Foster e Hirata (1988), e apresentado no quadro abaixo, Tabela 5.

Tabela 5. Classificação da Vulnerabilidade natural das águas subterrâneas, de acordo com os intervalos propostos pelo Método GOD.

Intervalos	Classificação da vulnerabilidade natural
0 – 0,1	Insignificante
0,1 – 0,3	Baixa
0,3 – 0,5	Média
0,5 – 0,7	Alta
0,7 – 1,0	Extrema

Fonte: Foster; Hirata (1988)

Para cada intervalo definido, foi atribuída uma classificação qualitativa, representando as características de vulnerabilidade das águas subterrâneas na área. Com essa classificação e por meio de procedimentos de geoprocessamento, obteve-se o produto cartográfico apresentado na Figura 28.

Considerando as intervenções antrópicas e as condições ambientais da área, os impactos no aquífero livre (não confinado coberto), em amarelo no mapa, decorrentes do uso e ocupação do solo, da aplicação de agroquímicos, utilizados em pequenas propriedades ao longo do rio Guandu (principal rio da região de Guaratiba-RJ), da construção de fossas sépticas, dentre outros fatores, podem aumentar o risco de poluição/contaminação das águas subterrâneas. Esses fatores são potencializados pela baixa profundidade do nível estático, pela recarga direta, material pouco consolidado e a permeabilidade intrínseca do solo da região.

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

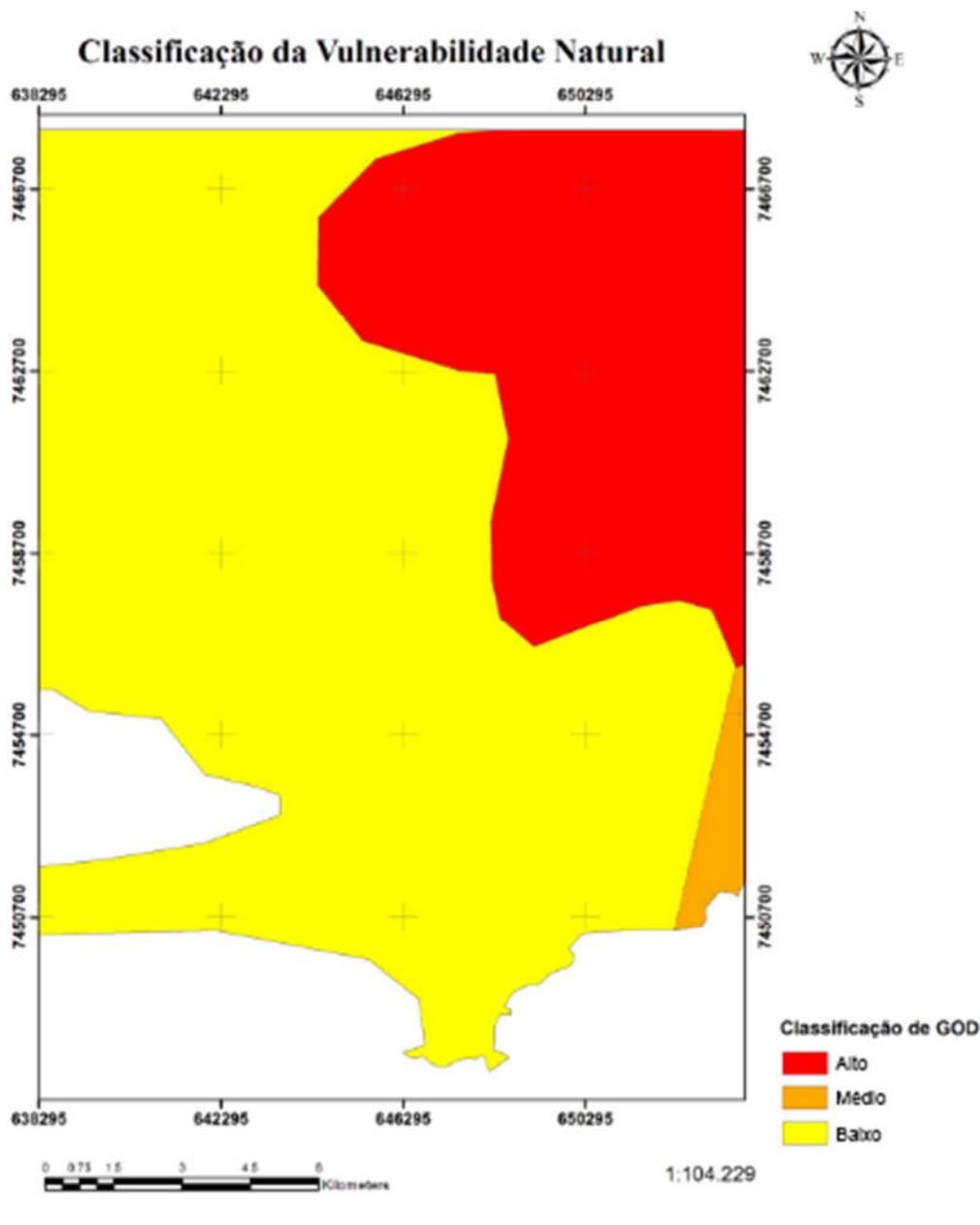


Figura 28. Mapa de Vulnerabilidade Natural classificado de acordo com as proposições do Método GOD.

A área de estudo recebeu a classificação de baixa vulnerabilidade, região do aquífero Guaratiba (em amarelo, Figura 28), média entre o aquífero Guaratiba e o Maciço Pedra Branca (em laranja, Figura 28), e de alta, na região do Maciço Pedra Branca (em vermelho, Figura 28). Esse resultado deve-se a vários fatores, entre os mais relevantes estão os fatores antropizadas da área, rodovias, despejo de dejetos domésticos, baixa profundidade das águas superficiais, uso da água de forma clandestina, indústrias potencialmente contaminadoras, entre outras.

A área apresenta baixo grau de vulnerabilidade e carece de programas específicos de regulamentação de uso e ocupação do solo, além do estabelecimento de perímetros de proteção dos poços utilizados para abastecimento para que esse índice não venha a aumentar. A falta de regulamentação e fiscalização de poços clandestinos (feito sem nenhum projeto prévio) compromete a qualidade da água subterrânea e seu fluxo, pois não se tem o controle de como é feito esses poços e nem o cuidado sanitário necessário.

Destaca-se que a área que teve um baixo índice de vulnerabilidade possui um histórico de contaminação, o que pode acarretar no aumento do índice de vulnerabilidade, conforme Cadastro de Áreas Contaminadas do estado do Rio de Janeiro – INEA. De acordo com estes relatórios a área possui contaminação por postos de combustível e indústrias de origens diversas, Figura 29.

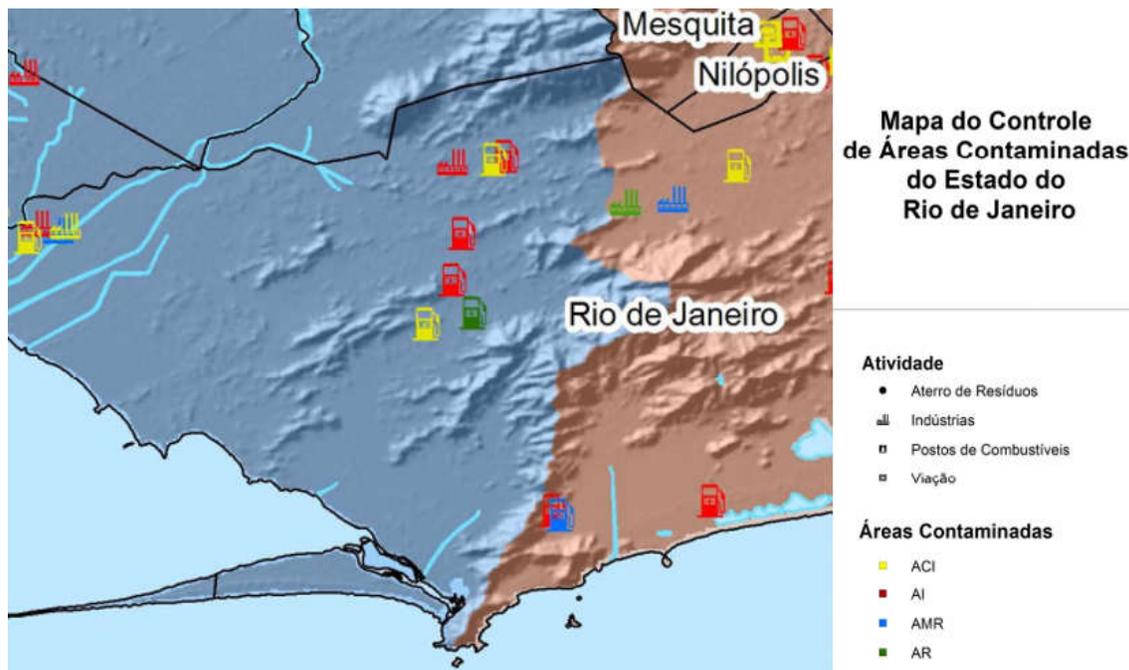


Figura 29. Mapa de controle de áreas contaminadas no Estado do Rio de Janeiro, região de Guaratiba, Rio Guandu, INEA.

De acordo com Linhares (2012) as águas subterrâneas devem ser incluídas no plano de gestão ambiental municipal, porque exibem conexão com os corpos hídricos superficiais através da descarga, auxiliam no fluxo superficial em período de estiagem e, demandam importância como alternativa de abastecimento rural e urbano-industrial.

De acordo com Foster *et al.* (2006) quando ocorre uma vulnerabilidade alta do aquífero, é preciso incluir medidas no planejamento de uso e ocupação do solo. Conforme discutido, é

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

extremamente importante à necessidade de implementação e do desenvolvimento de ferramentas de proteção pelo Órgão Ambiental Fiscalizador e Comitê de bacias. Desta maneira, estudar as possíveis fontes de contaminação, bem como a confecção de um mapa de vulnerabilidade de aquífero, favorece e auxilia o início da implementação e do desenvolvimento de ferramentas de proteção da água subterrânea.

É importante salientar que além do uso da ferramenta de proteção de aquífero é necessário criar uma estratégia para o uso da água subterrânea das áreas agrícola, industriais e residenciais, já que é comum na área o uso de poço para consumo, criação de animais e agricultura.

CONCLUSÃO

Diante do exposto, conclui-se que a área do aquífero Guaratiba possui baixa vulnerabilidade à contaminação da água subterrânea. A região do Maciço Pedra Branca, que aqui possui nível alto de vulnerabilidade, deve ser melhor estudado com a perfuração de poços e melhor controle da área, que apesar de ser de proteção ambiental possui características que podem comprometer toda uma rede hidrográfica. A região que apresentou um índice de média vulnerabilidade, que está na parte limítrofe do aquífero Guaratiba, também merece atenção por se tratar de uma área de costa.

Associado a este grau de vulnerabilidade e ainda ao tipo de uso e ocupação do solo, recomenda-se a necessidade da continuidade deste estudo, a fim de cadastrar novas possíveis fontes de contaminação, principalmente a região do Maciço Pedra Branca, e ainda da elaboração de medidas de monitoramento de qualidade da água subterrânea periodicamente.

A área de estudo apresenta características referente a ocupação do solo que são muito preocupantes. O risco de contaminação só aumenta com a perfuração de novos poços (realizados sem autorização do órgão responsável), construções irregulares e o não tratamento do esgoto da área. Logo, é necessário aprofundar melhor sobre estas características, entendendo a dinâmica dos possíveis contaminantes no solo e adaptando a classificação do parâmetro da litologia, para a realidade local, ajustando a metodologia GOD.

Desta maneira o avanço deste estudo auxiliaria e aprimoraria a tomada de decisão de órgãos ambientais na gestão da proteção das águas subterrâneas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.F.M. de. **Origem e evolução da plataforma brasileira**. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, p.1-36. (Boletim 241), 1967.

ALMEIDA, F. F. M. de. **O Cráton do São Francisco**. Ver. Brasileira de Geociências, v.(7), p.349 – 364, 1977.

ALMEIDA, F.F.M. de. **O Cráton do Paramirim e suas relações com o São Francisco**. In: SBG, Simpósio do Cráton do São Francisco e Suas Faixas Marginais, 1, Salvador. Anais, 1 – 10, 1981.

AUGE, M. **Vulnerabilidade de aquíferos: conceptos y métodos**. Buenos Aires: Universidade de Buenos Aires. 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil) (ANA). **HidroWeb: sistemas de informações hidrológicas**. Disponível em: <www.ana.com.br>. Acesso em: 25 maio 2016.

BRACHO, J. de J. C.; MORENO, L. S.; NIETO, A. M.; MÉNDEZ, A. L. **Vulnerabilidad de aquíferos a la contaminación**. 2004.

BRANCO, R. M. G. C.; CUNHA, L. S. da; CASTRO, D. L. de; SOUZA FILHO, O. A. de; RIBEIRO, J. A.; FEITOSA, F. A. C. **Integração De Métodos Geofísicos (Er, Em-34, Vlf) E Dados Geológicos Aplicados À Pesquisa De Água Subterrânea Em Terrenos Cristalinos Da Região Do Fumo (Irauçuba), Estado Do Ceará, Nordeste Do Brasil**. In: 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. 2001.

CARDOSO, L.V.R.Q. **Estudo Comparativo dos Métodos Drastic e GOD na Avaliação da Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas à Poluição da Bacia Hidrográfica do Rio Cabril Vila Real**. 2010.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução 420.2009**.

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

CAMPOS, J. C. V. **Estudo Hidrogeológico da Bacia do Rio Cabuçu – Zona Oeste do Município do Rio de Janeiro – RJ.** 100p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1996.

CORTINES, E. **Funcionamento Hidrológico de Nascentes em Microbacias Instáveis, Barra de Guaratiba-RJ.** Dissertação Mestrado em Ciências - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Conservação da Natureza – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008.

DORES, E. F. G. C. **Contaminação de águas superficiais e subterrâneas por pesticidas em Primavera do Leste, Mato Grosso.** Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, São Paulo: Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2004.

DRM- Departamento de Recursos Minerais _ Rio de Janeiro, **Águas subterrâneas** (2009). Disponível em: <www.drm.rj.gov.br>. Acesso em: 28 mar 2016.

DRM- Departamento de Recursos Minerais _ Rio de Janeiro, **Águas subterrâneas** (2009). Disponível em: <www.drm.rj.gov.br>. Acesso em: 25 abr 2016.

ENVIRONMENT AGENCY. **Assessing the Groundwater Pollution Potential of Cemetery Developments, Bristol, United Kingdom.** São Paulo: Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2004.

EMBRAPA-EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA Disponível em: <www.embrapa.br>. Acesso em: 28 mar 2016.

EMBRAPA-EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. **Manual de Métodos de análise de solo.** 2 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de solo, 2011.

FERRARI, A.L. **A geologia do "Rift" da Guanabara (RJ) na sua porção centro-ocidental e sua relação com o embasamento pré-cambriano.** 32º Cong. Bras. Geol., SBG, 2858-2870, Natal/RN, 1990.

FUCK, R. A.; SÁ, E.F. J. de; PIMENTEL, M.M.; DARDENNE, M.A.; SOARES, A.C. P. As Faixas de Dobramentos Marginais do Cráton do São Francisco: Síntese dos Conhecimentos. *In: J.M. DOMINGUEZ e A. MISI (eds). O Cráton do São Francisco*. Salvador, p. 161 – 185, 1993.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities and Environment Agencies; s.l.**, The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, 2002; Tradução: Silvana Vieira, Protecção da qualidade da água: Um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais, Servmar – Serviços Técnicos Ambientais Ltda, Brasil, 2006.

FREIRE. C. C.; OMENA. F. P. S. **Curso de Aperfeiçoamento em Gestão de Recursos Hídricos: Princípios da Hidrologia Ambiental**. 2005.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. **Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes**. São Paulo: Instituto Geológico, 1993.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. **Determinacion del Riesgo de Contaminacion de Águas Subterrâneas – una metodologia basada en datos existentes**. 2ª Edição. Lima, Peru: Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente / Organizacion Mundial de la Salud. p.81, 1991.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A.; Rocha, G. A. **Riscos de poluição de água subterrânea: uma proposta de avaliação regional**. São Paulo: CEPIS/ OPS, 1988.

FOSTER, S.S.D. Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, pollution Risk and Protection Strategy, In: W. van Duijvanboode and H.G. van Waegeningh (Eds), **Vulnerability of soil and Groundwater to Pollution**, Proceedings and information N° 38 of the International Conference held in the Netherlands. TNO Committee on Hydrological Research, Delft, the Netherlands, 1987.

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

INEA (Instituto Estadual do Ambiente).; **Bacia Hidrográfica dos Rios Guandu, da Guarda e Guandu-Mirim. Experiência para a gestão dos recursos hídricos** (2012). INEA –Instituto Estadual do Ambiente. Gerenciamento de Áreas Contaminadas do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwew/mde1/~edisp/inea0015445.pdf>>. Acesso em: 09 mai 2016.

INEA-Instituto Estadual do Ambiente Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/Portal/index.htm>>. Acesso em: 10 mai 2016.

INEA-Base legal para a gestão de águas do estado do rio de janeiro. n 2.Rio de Janeiro 2016. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwew/mdiw/~edisp/inea0020734.pdf>>. Acesso em: 12 mar 2016.

INEA – Instituto Estadual do Ambiente. **Elaboração do plano estadual de recursos hídricos do estado do Rio de Janeiro.** Disponível em: <www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwew/mdyy/~edisp/inea0062144.pdf>. Acesso em : 05 abr 2016.

MONTERO, R. C; PEIXOTO, A.S. P. **Vulnerabilidade e perigo de contaminação dos aquíferos no Alto Aguapeí e Alto Peixe, SP.** Ciência & Engenharia, v. 22, n. 1, p. p. 115-124, 2014.

MONTERO, R. C. **Vulnerabilidade e perigo de contaminação dos aquíferos nas sub-bacias do Alto Aguapeí e Alto Peixe-SP.**(Dissertação). Universidade Estadual Paulista. São Paulo. 2012.

MAIA, P.H.P. **Um novo método para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos.** 2011. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, UFBA, 2011.

MARTINEZ, M. M.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; LOPES, G. N. **Avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas no município de Santa Cruz do Sul, RS/Brasil.** Agroambiente On-line, v. 2, p. 1–8, 2008.

McBRIDE, M. B. **Environmental chemistry of soils.** New York: Oxford University Press, 406p., 1994.

MELO JUNIOR, H. R. **Mapeamento da vulnerabilidade e análise de risco de contaminação Como instrumentos de proteção das águas subterrâneas em áreas industriais: Caso da ALBRAS, Barcarena – PA.** Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. Dissertação de Mestrado, p.154, 2002.

MENDES, C.A.B, CIRILO, J.A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação.** Porto Alegre: ABRH, 2001.

MIRALDO, C.M. **Estudo de Contaminação do aquífero superior na região de Estarreja.** Coimbra. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2007.

MONKHOUS, R. A. **Vulnerability of aquifers and groundwater quality in the United Kingdom.** Institute of Geological Sciences Report. Nottingham, Reino Unido, 1983.

MUSETTI, R.A. **Da Proteção jurídico ambiental dos recursos hídricos.** Leme: Editora de Direito, 2001.

NOBRE, R.C.M. – **Avaliação de Risco para o Uso e Proteção de Aquíferos. Estudo de Caso: Região Metropolitana de Maceió.** Tese de Doutorado, Dep. Eng. Civil, COPPE/UFRJ, 296, 2006.

NRC (National Research Council). **Groundwater vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty.** Washington, D.C.: National Academy Press, 1993.

PAVÃO, A. D. M. **Avaliação do índice de vulnerabilidade na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria – RS.** 2004. 112 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria/ UFSM, Santa Maria, 2004.

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

PEREIRA, R. S. **Identificação e caracterização das fontes de poluição em sistemas hídricos.** RERH – Revista Eletrônica de Recursos Hídricos. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS, v. 1, nº 1, Julh/Set 2004; Porto Alegre/RS. IPH, 2004.

PETROBRAS – CARVALHO, M. G.; BARBOSA, G. R.; VICENTE, J.F.; CEZAR, M. R.; CARVALHO, L. **Avaliação Hidrogeológica e da Qualidade das Águas Subterrâneas nas Regiões Administrativas de Campo Grande e Guaratiba – Município do Rio de Janeiro/RJ.** Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnologia da UFRRJ – FAPUR. 2009.

PINHEIRO, R. J.; NUMMER, A. V.; RAUBER, A. C.; DA SILVA, J. L. S. **Vulnerabilidade dos Aquíferos Caturrita e Passo das Tropas no Município de Santa Maria-RS.** XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiânia-GO, 2014.

RAMOS, F. **Engenharia hidrogeológica.** Rio de Janeiro: UFRJ/ABRH, p. 404, 1989.

REBOUÇAS, A. C. **Águas Subterrâneas.** In: **Águas Doces no Brasil.** 2006.

RIBEIRA, F. **Calidad, contaminación y protección de acuíferos** In: III CURSO HISPANOAMERICANO DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA. 4 de outubro a 3 de dezembro de 2004, Montevideo – UY, 2004.

RIBEIRO, D. M.; ROCHA, W. F.; GARCIA, A. J. V. **Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do rio Siriri, Sergipe.** *Águas Subterrâneas*, v. 25, n. 1, p. 91-102, 2011.

ROMEIRO, C. I. da R. **A Tecnologia SIG Aplicada ao Estudo da Vulnerabilidade à Poluição das Águas Subterrâneas na Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Oeste.** 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Sistema de Informação Geográfica). Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informações da Universidade Nova de Lisboa, 2012.

SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; DERZE, G.R.; ASMUS, H.E. **Geologia do Brasil. Texto Explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da Área Oceânica Adjacente incluindo Depósitos Minerais.** Brasília, DNPM-MME, escala 1:2.500.000, p. 501, 1984.

SHIKLOMANOV, I. Sumário da **Monografia World Water Resources at the beginning of the 21 Century**, preparada para o Programa Internacional Hidrológico da UNESCO, 2000.

SILVA, R. C. A.; ARAÚJO, T. M. **Qualidade da água do manancial subterrâneo em áreas urbanas de Feira de Santana (BA).** Ciência & Saúde Coletiva, v. (8), n. 4 , p. 1019-1028, 2003.

SANTOS, R.D; LEMOS. R.C; DOS SANTOS. H.G; KER, J.C; ANJOS, L.H.C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** 2005. Embrapa – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2005.

SANTOS, M. M. **Avaliação hidrogeológica para determinação da vulnerabilidade natural do aquífero freático em área Seleccionada na cidade de Londrina (PR).** 2005. 158 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

STIGTER, T. Y.; RIBEIRO, L.; DILL CARVALHO, A. M. M. **Evaluation of an intrinsic and specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the South of Portugal.** Hydrogeology Journal. v. (14), n. 1-2, pp. 79-99, 2006.

TODD, D. K. **Hidrologia de águas subterrâneas.** New York, Edgard Blucher, p.319, 1980.

VOGEL, M. M. **Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Região Cultural da Quarta Colônia de Emigração Italiana, RS.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de ciências naturais e exatas, Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências, Santa Maria, RS, Brasil, 2008.

Análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação do aquífero da região de Guaratiba-RJ através do método de GOD

VRBA, J. E ZAPOREZEC, A. **Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability**. International Association of Hydrogeologists. Verlag Heinz Heise, v. (16), p.131,1994.

ZANETTI, N. **Estimativa da vulnerabilidade natural do aquífero livre no município de Rio Claro/SP**. SP. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Dissertação de Mestrado, 2012.

Capítulo 4

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma Revisão

Luiza de Almeida Vaillant¹

RESUMO. As perspectivas de planejamento energético do Brasil apontam para uma crescente diversificação da matriz elétrica brasileira. Historicamente, a demanda por energia elétrica é crescente, o que exige investimentos do setor público em geração e transmissão de energia frequentemente. A expansão da fonte hidráulica, a qual compõem maior parte da matriz elétrica atualmente, apesar de ser uma fonte renovável, pode gerar uma série de impactos ao meio ambiente, principalmente em áreas de preservação ambiental. Para contextualizar a inserção da fonte eólica e quais são os seus principais impactos socioambientais, foi realizada uma revisão bibliográfica de dados atuais disponibilizados por órgãos públicos, e por conteúdos científicos. A energia eólica é uma fonte renovável intermitente que, como grande parte dos processos de produção de energia a partir de recursos naturais, gera impactos socioambientais em duas diferentes esferas: A fase de instalação e funcionamento de usinas eólicas, e a cadeia produtiva de seus componentes. Quanto aos possíveis impactos negativos observados na primeira esfera, o mais relevante refere-se à alteração de componentes morfológicos em regiões litorâneas, o que pode provocar alterações da paisagem, supressão de habitats naturais de fauna e flora, e alteração na geodinâmica costeira que potencializam a erosão costeira. Quanto aos possíveis impactos positivos, o desenvolvimento socioeconômico proporcionado pela exploração da fonte pode ter efeito significativo no crescimento do PIB regional e nacional. Sobre os impactos ambientais relacionados à cadeia produtiva, utilizou-se a Avaliação de Ciclo de Vida para uma marca de aerogerador. Os pontos mais críticos observados referem-se à possibilidade de contaminação de água doce, ar e solo por emissões de dioxinas policloradas, a emissão de fosfatos, e a liberação tóxica para o meio ambiente. Os impactos socioambientais observados nas duas diferentes esferas podem ser minimizados com o planejamento e estudo de impactos ambientais detalhados (considerando os impactos já observados pela comunidade acadêmica), e o reaproveitamento de componentes em final de vida útil (aliado a inovação tecnológica para

¹**Departamento de Geologia da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) – Alegre, ES, Brasil**

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

possibilitar a substituição de matérias primas ou para otimizar suas técnicas de obtenção). Para isso, a visão interdisciplinar do profissional geólogo tem grande importância, visto que sua atuação tange o planejamento, licenciamento e monitoramento ambiental, incluindo análises de riscos geológicos e estudos de impacto socioambiental, podendo participar na decisão sobre os locais para alocação de usinas. Visto que existe a necessidade de expansão da oferta de energia, a fonte de energia eólica é uma boa alternativa para o desenvolvimento sustentável e socioeconômico do país.

PALAVRAS-CHAVE.

Energia Renovável; Energia Eólica; Ciclo de Vida.

INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira possui um alto percentual de renovabilidade. Em 2019, 46,1% da oferta interna de energia provinha de fontes renováveis, incluindo biomassa da cana (18%), hidráulica (12,4%), lenha e carvão vegetal (8,7%) e outras renováveis, que incluem energia eólica e solar (7%). Já na matriz elétrica, 83% das fontes são renováveis. A energia hidráulica corresponde a 64,9% da oferta interna, o que demonstra uma baixa diversificação de fontes de energia (EPE, 2020b).

Por diversos fatores, a demanda por energia elétrica mostra-se majoritariamente em crescimento. Apesar do crescimento de outras fontes renováveis, as hidrelétricas ainda produzem a maior quantidade de eletricidade do país e estão em expansão.

A fonte hidrelétrica é considerada renovável em função da utilização da água como combustível, um recurso que é naturalmente reabastecido e compatível com a escala de tempo humana. Porém, não são necessariamente sustentáveis. Lessa et al. (2015) afirmam que os reservatórios de hidrelétricas impactam o meio ambiente em vários aspectos, como as inundações de áreas cultivadas e florestais, alterações na biodiversidade e qualidade da água, conflitos com povos indígenas e migração de peixes. Além desses fatores, a comunidade científica recentemente acrescentou a esses impactos, a emissão de gases de efeito estufa provenientes do alagamento de matéria orgânica.

O potencial hidrelétrico inventariado encontra-se predominantemente no norte do país, sobretudo na região Amazônica, em áreas de alta sensibilidade socioambiental. Cerca de 77% desse potencial apresenta alguma sobreposição a áreas legalmente protegidas do território

nacional, como unidades de conservação, terras indígenas e territórios quilombolas. Além disso, vale lembrar que a geração hidrelétrica é vulnerável a alterações de vazões, decorrentes de mudanças climáticas e dos regimes hidrológicos (EPE, 2020e).

Visto isso, a diversificação da matriz elétrica brasileira, subsidiada pela expansão de outras fontes renováveis, é importante para atribuir mais segurança energética e socioambiental ao país. Nesse contexto, pesquisas de planejamento 12 energético a médio e longo prazo destacam a fonte eólica como ferramenta para complementar a geração de energia hidráulica.

O profissional geólogo, visto que possui uma interessante interdisciplinaridade relacionada a utilização de recursos naturais e seus efeitos na dinâmica terrestre, tem importante papel nos estudos de impacto e planejamento de projetos eólicos.

Para entender melhor a trajetória de inserção da fonte eólica na matriz elétrica brasileira, e abordar os principais impactos socioambientais da produção de energia eólica e da cadeia produtiva de aerogeradores, foi necessária uma pesquisa em trabalhos científicos e em estudos produzidos por órgãos do governo.

O presente trabalho tem como objetivo geral contextualizar o crescimento da participação da fonte eólica na matriz elétrica brasileira e, em seguida, discorrer sobre os aspectos socioambientais dessa fonte, com base em estudos realizados pelo poder público e em conteúdos científicos.

Para tanto, os objetivos específicos do estudo são:

1. Análise bibliográfica sobre o desenvolvimento do setor elétrico do Brasil, contando com estudos sobre a composição da matriz elétrica brasileira, geração de energia elétrica e quais são as perspectivas do poder público quanto ao suprimento de eletricidade do país no futuro;
2. Análise bibliográfica sobre o atual contexto da fonte eólica no Brasil, considerando o potencial eólico nacional, o aproveitamento desse potencial, e quais são as possíveis contribuições do profissional geólogo nesse cenário;
3. Análise bibliográfica sobre principais impactos socioambientais envolvidos na geração de energia eólica, tanto no momento de implementação de parques eólicos quanto durante a cadeia produtiva de aerogeradores, com base na Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de aerogeradores.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- **O Setor elétrico brasileiro**

Conforme Gomes e Vieira (2009), o uso de energia elétrica no Brasil se iniciou em 1880, para serviços públicos e fábricas. Com o tempo, surgiram algumas empresas de energia locais para a prestação de serviços públicos e para as atividades fabris. A partir de 1899, empresas internacionais chegavam ao país e adquiriam as empresas locais, estimulando o crescimento desse mercado. Lima (1984) afirma que a capacidade instalada de energia elétrica, entre 1890 a 1930, obteve um crescimento de 61.709,52%.

Durante o desenvolvimento do setor elétrico brasileiro, nos primeiros 100 anos, a administração das empresas distribuidoras e transmissoras de energia alternou da iniciativa privada para o poder público e, atualmente, a gestão é dividida entre empresas dos dois setores (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2014).

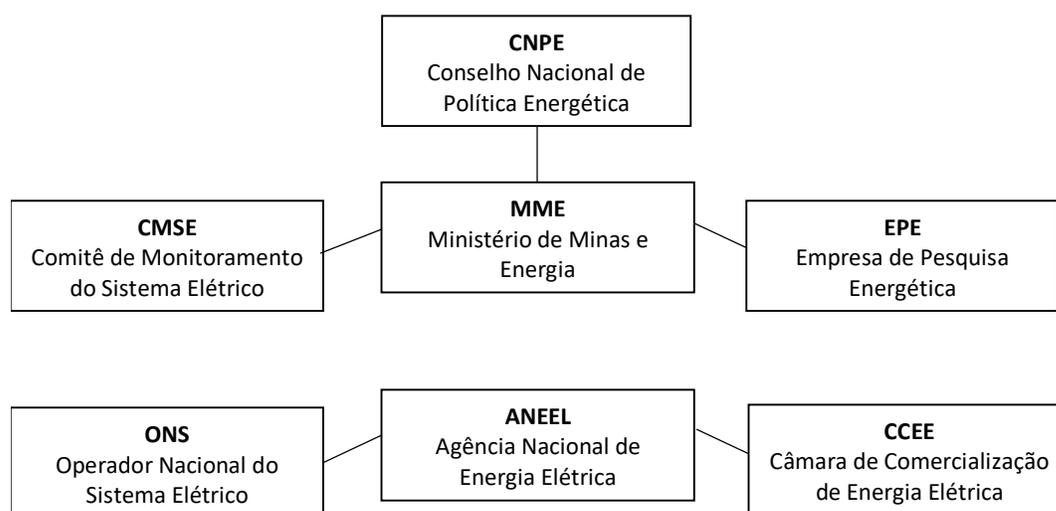


Figura 2. A atual estrutura do setor elétrico. Fonte: CCEE, nd.

A figura 1 elenca as principais instituições envolvidas no sistema elétrico brasileiro, com base nas definições da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. De acordo com o órgão, o Ministério de Minas e Energia tem como principais funções a formulação e implementação de políticas para o setor de energia, seguindo as diretrizes do Conselho Nacional de Política Energética. Além disso, o MME estabelece o planejamento energético do país, a fim de garantir o monitoramento e segurança energética.

O CNPE define-se como um “órgão interministerial de assessoramento à Presidência da República”, responsável por formular políticas e diretrizes de energia que garantem o “suprimento de insumos energéticos” para todo o país (CCEE, nd).

Também sob coordenação do MME, o Comitê de Monitoramento do Sistema Elétrico (CMSE) deve “acompanhar e avaliar a continuidade e a segurança do suprimento elétrico em todo o território nacional”, e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), fornece estudos sobre o cenário energético brasileiro para embasar o planejamento do setor energético (CCEE, nd).

A Agência Nacional de Energia Elétrica tem como responsabilidades “regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica”. Nessa ótica, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) foi criado com intuito de “operar, supervisionar e controlar a geração de energia elétrica no Sistema Integrado Nacional – SIN”, além de dirigir a transmissão de energia na rede básica. Já a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), tem como função equilibrar o sistema operacional da comercialização de energia (CCEE, nd).

Quanto aos investimentos em geração de energia, o crescimento demográfico, aliado à urbanização, industrialização e construção de infraestrutura de transporte rodoviário energointensiva, foram responsáveis pelo aumento da demanda de energia e, consequentemente, pelos incrementos ao setor elétrico. O consumo de energia primária aumentou de 15 milhões de tep (toneladas equivalentes de petróleo), em meados de 1940 – 1950, para 19 milhões de tep em 2000 (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007). Ainda de acordo com Tolmasquim, Guerreiro e Gorini (2007), o consumo de energia *per capita* também tende a aumentar com o crescimento da renda nacional.

O território brasileiro tem dimensões continentais e, de acordo com o IBGE (2020), sua população estimada atualmente é de 212.204.188 habitantes. A Tabela 1 relaciona a evolução da população com a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE), de 1970 até 2019, e confirma a demanda crescente por energia elétrica em função da modernização da sociedade e dos bens de consumo, e do aumento da população.

As Figuras 2, 3 e 4 correspondem ao consumo nacional de energia elétrica na rede, segmentado pelas classes residencial, industrial, comercial e outros (rural, serviço público e iluminação pública). Os gráficos foram confeccionados a partir de dados fornecidos pela Eletrobras (até 2003) e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (a partir de 2004), e atualizados pela Superintendência de Estudos Econômicos e Energéticos – SEE da Diretoria de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais – DEA. Os dados do ano de 2019 são preliminares.

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

Tabela 1. Evolução dos indicadores - oferta interna de energia elétrica (incluindo importação e autoprodução) e população.

	1970	1980	1990	2000	2010	2018	2019
Oferta Interna de Energia Elétrica (TWh)	45,7	139,2	249,4	393,2	550,4	636,4	651,3
População (milhões de hab.)	95,7	122,2	148,1	174,7	196,4	209,3	211

Fonte: EPE (2020b).

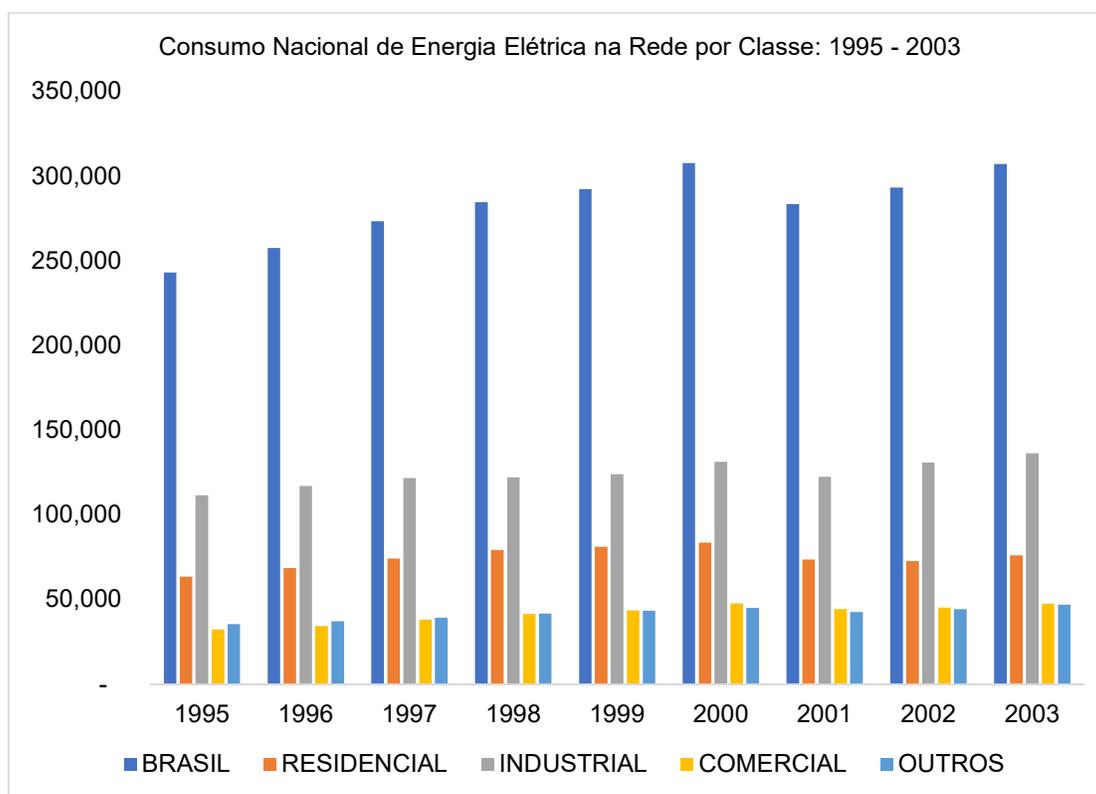


Figura 2. Consumo nacional de energia elétrica na rede por classe (1995 - 2003) (EPE, 2019b).

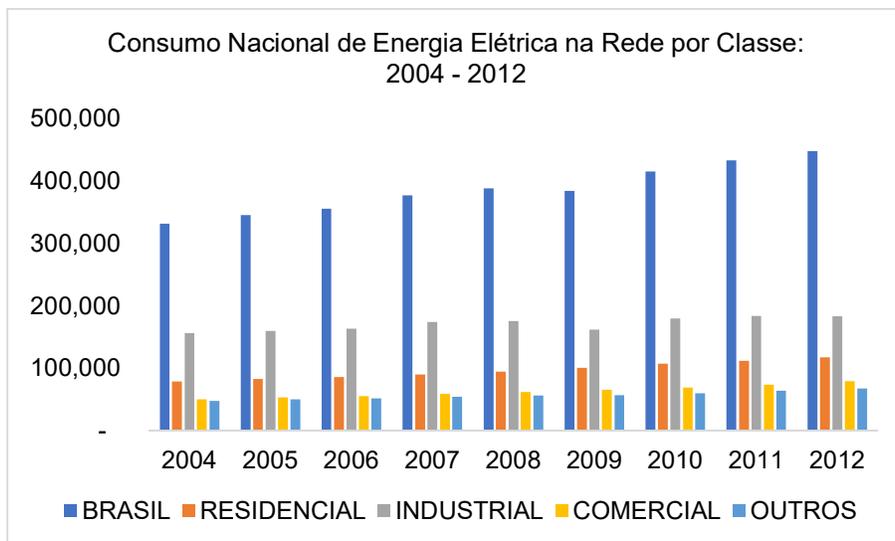


Figura 3. Consumo nacional de energia elétrica na rede por classe (2004 - 2012) (EPE, 2019b).

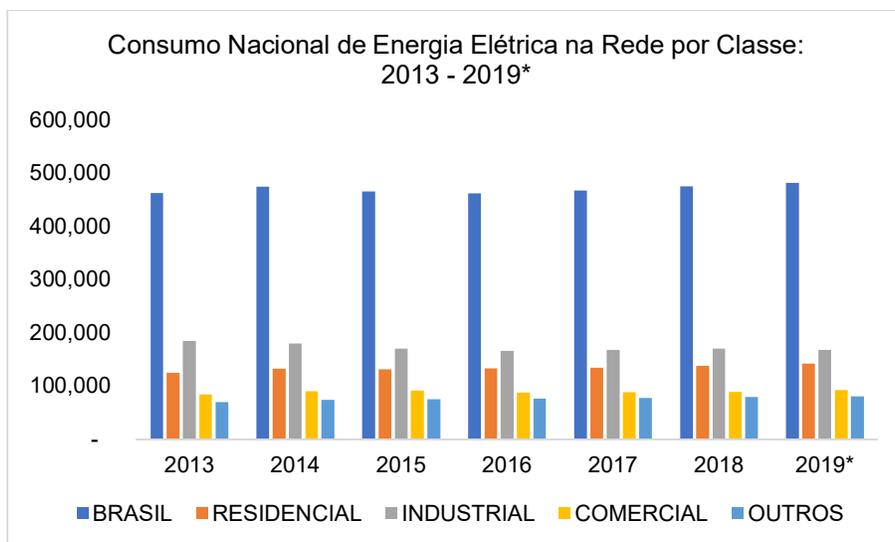


Figura 4. Consumo nacional de energia elétrica na rede por classe (2013 - 2019) (EPE, 2019b).

Os gráficos indicam que o consumo de energia se encontra majoritariamente em crescimento, com algumas quedas em 2001, 2009, 2015 e 2016. A primeira queda (2001) é proveniente de uma crise energética que impôs um racionamento de energia elétrica em todo o país. Segundo a Central Brasileira de Rádio (CBN), a crise foi causada pelo conjunto de fatores: escassez de chuvas, aumento da demanda e falta de investimentos na geração e transmissão de energia (CBN, 2016).

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

Em 2009, o consumo de energia elétrica foi impactado pela crise financeira global de 2007-2008, e caiu juntamente com o Produto Interno Bruto (PIB). Entre 2010 e 2013, a implementação de políticas sociais induziu o aumento da renda média da população e do poder de consumo e, conseqüentemente, o consumo energético voltou a crescer (EPE, 2019a).

Entre 2014 e 2018, um período de retração econômica culminou novamente em diminuição do consumo de eletricidade. Segundo Cury e Caoli (2016), em 2014 o PIB cresceu apenas 0,1% em relação ao ano anterior, e em 2015, a economia fechou em queda. A retração de 3,8% em relação a 2014 registrou o pior desempenho econômico desde 1990, quando houve uma retração de 4,3%. De acordo com o Cury e Silveira (2017), em 2016 o PIB continuou em retração, com recuo de 3,6%. Os dados sobre o Produto Interno Bruto divulgados por Cury e Caoli (2016) e Cury e Silveira (2017) foram fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

o A geração de energia elétrica

Com base em dados atuais sobre a matriz elétrica do Brasil, fornecidos pelo Balanço Energético Nacional 2020 (referente ao ano de 2019), 83% da oferta interna de eletricidade provém de fontes renováveis, enquanto a média mundial é de 27% (EPE, 2020b).

Em relação a geração de energia elétrica por fonte, o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020, referente ao ano de 2019, aponta que 64% da oferta interna de eletricidade provém de fonte hidráulica (incluindo a autoprodução) (EPE, 2020a). A Figura 5 corresponde à participação de cada fonte de energia elétrica no Brasil, e revela a fonte hidráulica e termelétrica como as principais geradoras do país, seguida da fonte eólica. As outras fontes correspondem às recuperações, gás de coqueria e outros secundários.

De acordo com esquema elaborado pela ONS (2020), a Tabela 2 apresenta a capacidade instalada do SIN no ano de 2020, e a projeção para o ano de 2024, referente a cada fonte de energia elétrica. Nota-se que o crescimento da energia eólica nos últimos anos fez a fonte atingir o percentual de 9,5% da capacidade instalada em 2020, superando as termelétricas a gás.

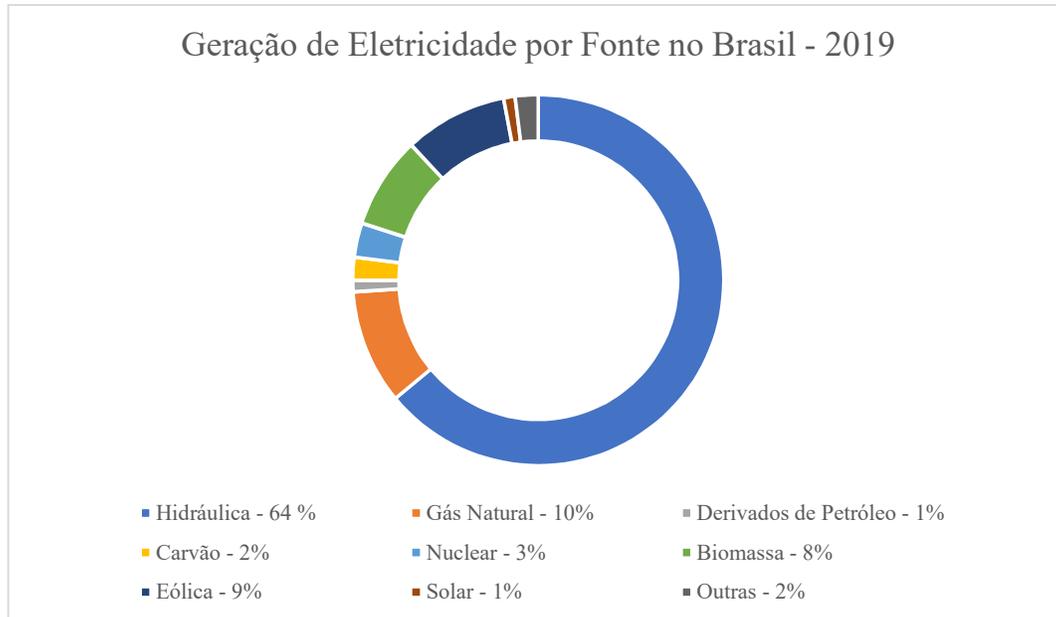


Figura 5. Geração de Eletricidade por Fonte no Brasil (2019) (EPE, 2020b).

Tabela 2. Capacidade Instalada no SIN - 2020/2024 (NOS, 2020).

	Capacidade Instalada (2020)	Capacidade Instalada (2024)
Hidrelétrica	108.495 MW (65,7%)	109.232 MW (61,6%)
Termelétrica (Gás + GNL)	14.208 MW (8,6%)	18.176 MW (10,2%)
Eólica	15.608 MW (9,5%)	20.363 MW (11,5%)
Termelétrica (Óleo + Diesel)	4.404 MW (2,7%)	4.6692 MW (2,6%)
Termelétrica (Carvão)	3.017 MW (1,8%)	3.017 MW (1,7%)
Biomassa	13.739 MW (8,3%)	14.682 MW (8,3%)
Solar	2.988 MW (1,8%)	4.508 MW (2,5%)
Nuclear	1.990 MW (1,2%)	1.990 MW (1,1%)
Outras	590 MW (0,4%)	745 MW (0,4%)
Total	165.039 MW	177.405 MW

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

○ Planejamento de médio prazo

Com intuito de indicar as perspectivas da expansão do setor de energia dos próximos 10 anos, um Plano Decenal de Expansão de Energia é elaborado anualmente pela EPE, com apoio da equipe da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético (SPE/MME) e da Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (SPG/MME). Em setembro de 2019, concluiu-se o Plano Decenal de Expansão de Energia 2029, o qual previa um crescimento médio da economia mundial e do comércio mundial de 3,3% a.a. e 3,7% a.a., respectivamente. Para a economia brasileira, a expectativa era de uma recuperação gradual, com um crescimento médio do PIB de 2,9% a.a., e do PIB per capita de 2,2% a.a. (EPE, 2019d).

Sob o aspecto demográfico, prevê-se que a população brasileira cresça a uma taxa média de 0,6% a.a., totalizando 224,3 milhões de habitantes em 2029. Além disso, deve ocorrer um acréscimo de 13 milhões de domicílios particulares permanentes em relação a 2018, totalizando 81,6 milhões de domicílios em 2029 (EPE, 2019d). A Tabela 3, elaborada pela EPE (2019c), resume os principais indicadores do consumo de eletricidade.

Tabela 3. Principais indicadores do consumo de eletricidade (EPC, 2019b).

	2019	2024	2029	Crescimento médio (% a.a.)		
				2019-2024	2024-2029	2019-2029
População (milhões de habitantes)	211	218	224	0,7%	0,5%	0,6%
Consumo Total (TWh)	549	663	793	3,9%	3,7%	3,8%
Autoprodução Clássica (TWh)	60	71	85	3,3%	3,6%	3,5%
Consumo Total per capita (KWh/hab/ano)	2.601	3.036	3.536	3,1%	3,1%	3,1%
Consumo por Consumidor Residencial (KWh/mês)	161	178	200	2,1%	2,3%	2,2%
Nº de Consumidores Residenciais (Milhão, base 31/12)	73,5	80,4	86,4	1,8%	1,4%	1,6%
Percentual de Perdas Totais no SIN	19,5%	19,1%	18,2%	-	-	-
Intensidade Elétrica da Economia (MWh/10³RS [2017])	0,132	0,139	0,144	-	-	-
Elasticidade-renda do consumo de eletricidade	-	-	-	1,36	1,22	1,29

A partir dos altos valores de elasticidade-renda do consumo de eletricidade (maior que 1), confere-se que o aumento de renda dos consumidores gera aumentos mais que proporcionais na demanda de eletricidade. Entre 2019 e 2024, o aumento de renda causaria mais impactos no consumo de energia que no período entre 2024 e 2029.

Em relação às fontes de energia elétrica, a matriz brasileira deve seguir com a predominância da fonte hidráulica, porém, a expectativa é de maior diversificação até 2029. De acordo com os estudos da EPE (2019b), a energia hidráulica irá decrescer de 58% da capacidade instalada, para 42%. Essa redução será compensada pelo crescimento da capacidade instalada de energia eólica, de 9% para 16%, e solar, de 2% para 8%. A geração de eletricidade por gás natural também deve avançar de 7% para 14% da capacidade instalada, o que atribui mais segurança para a matriz elétrica e reduz a dependência por fontes renováveis intermitentes.

A previsão é de que a composição da matriz elétrica avance de 80% de fontes renováveis, em 2019, para 84%. Consequentemente, a parcela de não-renováveis deve cair de 20%, para 16% (EPE, 2019c).

Entretanto, a pandemia de COVID-19 no início de 2020, causou efeitos inesperados no panorama econômico mundial. Por esse motivo, viu-se a necessidade de antecipar a divulgação dos estudos do PDE 2030. Neles, constaram que a “reversão profunda no cenário econômico” causada pela pandemia, e a incerteza em relação aos próximos acontecimentos, dificulta previsões para o setor energético (EPE, 2020c).

A demografia permanece com tendência de desaceleração do crescimento populacional após pandemia. Em relação à economia global, espera-se uma recuperação com um crescimento médio de 3,6% a.a. entre 2021 e 2030, conforme o Fundo Monetário Internacional (FMI). Para avaliar a conjuntura nacional do próximo decênio, foram criados três possíveis cenários: cenário inferior (pandemia de longa duração, com retomada lenta); cenário de referência (pandemia de média duração, com recuperação moderada); e cenário superior (pandemia de média duração e recuperação acelerada). No cenário de referência, o PIB no Brasil crescerá, em média, 2,9% a.a., enquanto no cenário inferior, a média é de 1,7% a.a., e no cenário superior, 4,1% a.a. (EPE, 2020c).

Ainda de acordo com a EPE (2020c), quanto a demanda de energia, há incremento da intensidade elétrica em todos os cenários, porém, o percentual de consumo total de energia ao ano é mais elevado nos cenários de referência e superior, e a elasticidade-renda é mais elevada no cenário inferior. Consequentemente, os impactos da pandemia refletiram também na “redução gradativa das projeções da carga de energia” (a projeção do PDE 2030, para o cenário de referência, é 5,5 GW médios inferior à do PDE 2029).

- **Recursos energéticos e sustentabilidade**

- **Desenvolvimento sustentável**

O termo “desenvolvimento sustentável” é bastante abrangente e multidisciplinar. Em relação a sua etimologia, sustentabilidade deriva do latim *sustentare*, o qual significa “sustentar”, “apoiar” e “conservar”. Atualmente, esse termo é amplamente difundido e discutido, seja no âmbito de políticas públicas, econômicas e socioambientais.

A noção de escassez de recursos naturais ganhou atenção mundial a partir da publicação de diversas obras catastrofistas, como na década de 70, com a ampla divulgação do chamado relatório de Meadows, intitulado “Limites do Crescimento” (*The Limits to Growth*). O relatório foi realizado pelo MIT (Instituto Tecnológico de Massachussets), liderado por Dennis Meadows, e encomendado pelo Clube de Roma (DE OLIVEIRA, 2012).

De acordo com de Oliveira (2012), o Clube de Roma foi uma organização fundada pelo industrial italiano e presidente do Comitê Econômico da OTAN, Aurelio Peccei, com a proposta de repensar a conjuntura mundial a partir da ótica industrial dominante. A maioria de seus integrantes eram importantes líderes empresariais.

De acordo com McCormick (1992), em estudo em que utilizou os modelos informáticos de Forrester (modelos de mundo global: *World 1, 2 e 3*), chegou-se a 3 conclusões: 1) se as taxas de crescimento se mantivessem, assim como as taxas de poluição, industrialização, produção de alimentos e exaustão de recursos, o planeta atingiria seu limite de crescimento em 100 anos; 2) era possível frear as taxas de crescimento e alcançar um “estado de estabilidade econômica”; e, 3) quanto mais cedo os países adotassem medidas para frear as taxas de crescimento, maiores seriam as chances de sucesso.

A obra destacava a necessidade de frear o desenvolvimento econômico de todos os países, e a adoção da chamada política de “crescimento zero” (DE OLIVEIRA, 2012). Na época, foram vendidos milhões de exemplares. Apesar do sucesso, vale lembrar que, de acordo com McCormick (1992), os modelos do MIT são compatíveis com uma época em que não havia uma grande compreensão dos processos ambientais e de uso de recursos, e a modelagem computacional ainda era pouco desenvolvida.

O tema levantado pelo relatório foi levado para a Primeira Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente (*United Nations Conference on the Human Environment*), em 1972, também nomeada como Conferência de Estocolmo. Nesse evento, ocorreu a primeira reunião com chefes de estado organizada pela Organização das Nações Unidas (ONU), com

objetivo de discutir temas relacionados à degradação do meio ambiente. Dessa forma, o conceito “sustentabilidade” foi estabelecido e amplamente difundido.

Em 1988, o documento intitulado como Nosso Futuro Comum definiu o termo “desenvolvimento sustentável”. De acordo com a 2ª edição do relatório, da Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD, 1991, p. 46), "desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem as suas próprias necessidades".

○ **Legislação ambiental brasileira**

No âmbito da legislação ambiental brasileira, após os debates mundiais à cerca da conscientização ambiental nos anos 70, houve a publicação da Lei nº 6.938/81, intitulada como a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) (BRASIL, 1981). A PNMA tem a função de regulamentar as diversas atividades que envolvem o meio ambiente afim de preservar, melhorar e recuperar a qualidade ambiental, tornando-o favorável a vida, e assegurando a população condições propícias para seu desenvolvimento social e econômico.

Ferreira e Salles (2017) afirmam que a Lei nº 6.938/81 trouxe uma série de inovações, como a criação do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o qual incluiu a participação pública nas decisões acerca da temática ambiental, e a criação do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), uma estrutura adotada para a gestão ambiental brasileira. Além disso, a lei implementou instrumentos de gestão ambiental, como: padrões de qualidade ambiental, zoneamento ambiental, avaliações de impacto ambiental e o licenciamento ambiental.

Ainda, de acordo com Ferreira e Salles (2017), em 1989 foi criado o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), resultado da fusão de alguns órgãos de política ambiental que atuavam de forma fragmentada. Apenas em 1997 houve a regulamentação do licenciamento ambiental (Resolução CONAMA nº 237/97), como ferramenta para uniformizar e delimitar as atividades sujeitas ao processo de licenciamento, além de definir os “critérios para a definição de competências para execução do licenciamento”.

Vale ressaltar que, de acordo com Brasil (1981), a PNMA define como poluição:

Poluição, a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente:

a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população;

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

- b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;
- c) afetem desfavoravelmente a biota;
- d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente;
- e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos.

Visto isso, atividades consideradas poluidoras ao meio ambiente podem afetar também os aspectos sociais e econômicos de determinado lugar, além do que diz respeito à biota. Em relação aos recursos energéticos, a emissão de gases de efeito estufa é sempre levada em consideração, porém, vale lembrar que este não é o único quesito que torna uma fonte de energia sustentável. Apesar da emissão de gases de efeito estufa ser significativamente menor para fontes renováveis de energia, comparando-se com fontes não-renováveis, existem outras atividades poluidoras que podem estar envolvidas no processo de obtenção de energia elétrica.

Nesse quesito, os princípios e objetivos da Política Energética Nacional refletem diretrizes do governo federal, e visam a produção e utilização da energia de forma organizada, racional e eficiente, buscando um equilíbrio entre os benefícios da indústria e da população em geral. Seus princípios e objetivos são definidos pela Lei nº 9.478, de 6 de Agosto de 1997. De acordo com Brasil (1997):

Art. 1º As políticas nacionais para o aproveitamento racional das fontes de energia visarão aos seguintes objetivos:

- I - preservar o interesse nacional;
- II - promover o desenvolvimento, ampliar o mercado de trabalho e valorizar os recursos energéticos;
- III - proteger os interesses do consumidor quanto a preço, qualidade e oferta dos produtos;
- IV - proteger o meio ambiente e promover a conservação de energia;
- V - garantir o fornecimento de derivados de petróleo em todo o território nacional, nos termos do § 2º do art. 177 da Constituição Federal;
- VI - incrementar, em bases econômicas, a utilização do gás natural;
- VII - identificar as soluções mais adequadas para o suprimento de energia elétrica nas diversas regiões do País;

GEOLOGIA, AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE

VIII - utilizar fontes alternativas de energia, mediante o aproveitamento econômico dos insumos disponíveis e das tecnologias aplicáveis;

IX - promover a livre concorrência;

X - atrair investimentos na produção de energia;

XI - ampliar a competitividade do País no mercado internacional;

XII - incrementar, em bases econômicas, sociais e ambientais, a participação dos biocombustíveis na matriz energética nacional (Redação dada pela Lei nº 11.097, de 2005);

XIII - garantir o fornecimento de biocombustíveis em todo o território nacional (Incluído pela Lei nº 12.490, de 2011);

XIV - incentivar a geração de energia elétrica a partir da biomassa e de subprodutos da produção de biocombustíveis, em razão do seu caráter limpo, renovável e complementar à fonte hidráulica (Incluído pela Lei nº 12.490, de 2011);

XV - promover a competitividade do País no mercado internacional de biocombustíveis (Incluído pela Lei nº 12.490, de 2011);

XVI - atrair investimentos em infraestrutura para transporte e estocagem de biocombustíveis (Incluído pela Lei nº 12.490, de 2011);

XVII - fomentar a pesquisa e o desenvolvimento relacionados à energia renovável (Incluído pela Lei nº 12.490, de 2011);

XVIII - mitigar as emissões de gases causadores de efeito estufa e de poluentes nos setores de energia e de transportes, inclusive com o uso de biocombustíveis.

○ Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Como reflexo da conscientização sobre o uso de recursos naturais e impactos ambientais, a *International Organization for Standardization* (ISO), na década de 90, fundou uma série de normas (série 14000) acerca de questões ambientais para padronizar os processos de empresas que usufruem de recursos naturais e/ou geram algum impacto ao meio ambiente (ISO, n.d.).

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

A série 14000 foi desenvolvida pelo Comitê Técnico TC 207 e subdividida em 9 subcomitês. Um dos subcomitês refere-se ao desenvolvimento de normas relativas à análise durante a existência (Análise de Ciclo de Vida – ACV). No Brasil, o Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) adotou essa série de normas, revisando-as e traduzindo-as para o português.

A segunda edição da ABNT NBR ISO 14040 (2009) define a ACV como uma ferramenta de gestão ambiental que foca nos aspectos e impactos ambientais de todo o tempo de vida útil de um produto, do “berço ou túmulo” (refere-se à trajetória do produto desde a aquisição de matéria prima, até a sua disposição final). Para a realização desse estudo, deve-se dividir o projeto em 4 fases, definidas como: 1) definição de objetivo e escopo; 2) análise de inventário de ciclo de vida; 3) avaliação de impactos; e 4) interpretação. Em suma, a ACV serve para dimensionar o impacto ambiental causado por determinado produto, levando em consideração todos os aspectos envolvidos para a sua existência.

Em estudo desenvolvido pelo Ipea *et al.* (2016) afirmam o seguinte:

Os principais objetivos da ACV são melhorar o desempenho ambiental dos processos produtivos e auxiliar na criação de produtos sustentáveis (ecodesign). Nas políticas públicas, a ACV contribui para a formação de critérios e requisitos de sustentabilidade, além de fornecer base científica para a implementação de normas e regulações ambientais. Contudo, o inventário de ciclo de vida é dependente de um banco de dados robusto em informações sobre insumos e resíduos da produção, seus fluxos de massa e energia e seus impactos ambientais.

No que diz respeito aos estudos de planejamento energético, o uso dessa ferramenta permite calcular os impactos ambientais causados por uma fonte de energia, o que possibilita relacionar os resultados com critérios de sustentabilidade e auxilia na tomada de decisão (SINGH; OLSEN; PANT, 2013). Nas diferentes fases do projeto de ACV, determina-se as particularidades do processo de produção de energia a partir de determinada fonte, levando também em consideração o local de instalação da geradora.

Segundo Singh, Olsen e Pant (2013), uma fonte de energia pode não ser sustentável para todas as localizações geográficas, porque as condições ambientais, sociais, econômicas, políticas e climáticas, além da disponibilidade do recurso, influenciam no sistema de produção da energia renovável.

É importante ressaltar que essa ferramenta apresenta limitações. Para o estudo de uma fonte de energia, a técnica é apropriada para mapear os impactos ambientais relacionados à cadeia produtiva dos componentes da fonte. No caso de um sistema eólico, a ACV pode indicar os impactos ambientais causados pela produção, extração de matéria-prima, fabricação e reciclagem de metais e aparelhos que o compõem (SILVA; REBUTINI; MANCINI, 2018).

- **A questão hidrelétrica**

Refletindo sobre a matriz elétrica brasileira, não há dúvidas sobre a base renovável proporcionada pelo uso intensivo de energia hidráulica no país. Porém, deve-se ressaltar que essa fonte não está isenta de impactos ao meio ambiente.

As usinas hidrelétricas (UHEs) podem gerar uma série de impactos de ordem ambiental, social e econômica, dependendo do seu local de instalação. Segundo Terrin e Blanchet (2019), o alagamento provocado pela construção de reservatórios causa alterações no regime hidrológico e formação de microclimas, o que acarreta na inevitável perda de biodiversidade. Os autores também abordam os possíveis impactos sociais e os elencam da seguinte forma:

Os principais problemas sociais gerados pela construção das hidrelétricas são: Deslocamento de populações em escalas variáveis conforme a topologia; Inundação de áreas agricultáveis ou utilizáveis para pecuária ou reflorestamento; Sempre são registrados casos de aumento da distribuição geográfica de doenças de veiculação hídrica como, por exemplo, a malária e a esquistossomose; Danos ao patrimônio histórico e cultural; Efeitos sociais intangíveis da relocação indiscriminada de grandes populações, especialmente agrupamentos indígenas, quilombolas ou comunidades tradicionais; Incremento de navegação e transporte na bacia de acumulação causando alterações relevantes dentro da bacia hidrográfica; Intensificação de atividade extrativistas no interior da bacia hidrográfica do reservatório; Perda de benfeitorias, plantações e áreas agricultáveis ou alagadiças (TERRIN; BLANCHET, 2019).

As Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), de acordo com a Resolução Normativa nº 673/15 da ANEEL devem possuir a área de reservatório de até 13 Km² e potência instalada de até 30 MW. Por esse motivo, esses empreendimentos representam para o governo uma

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

alternativa para o abastecimento regional e solução ambientalmente mais viável que as UHEs (LIMA; CARVALHO, 2016).

Como forma de fomento, a resolução nº 279/01 do CONAMA estabelece que, diferente do que ocorre com UHEs, as PCHs estão sujeitas ao chamado licenciamento ambiental simplificado, o qual não exige a realização do estudo de impacto ambiental. Porém, apesar da área inundada ser significativamente menor em PCHs, o impactos ambientais produzidos em cadeia deve ser considerado (TERRIN; BLANCHET, 2019).

A Tabela 4, elaborada pela EPE no Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), relata que o potencial hidrelétrico até 2050 no Brasil é de 176 GW (108 GW em operação e construção até 2019, e 68 GW de potencial inventariado) (EPE, 2020d). Esses dados evidenciam a complexidade que envolve a expansão hidrelétrica no país, visto que 77% do potencial hidrelétrico inventariado encontra-se em territórios de alta sensibilidade ambiental (região amazônica, a qual dispõem de extensas áreas legalmente protegidas, como terras indígenas, territórios quilombolas e unidades de conservação).

Tabela 4. Potencial hidrelétrico brasileiro para os estudos de longo prazo (EPE, 2020d).

Etapa	UHEs (GW)	Projetos de até 30 MW (GW)	Total (GW)	Participação (%)
Operação e construção (i)	102	6	108	62%
Potencial hidrelétrico inventariado	52	16	68	38%
Potencial hidrelétrico do PNE 2050	154	22	176	100%

Notas: (i) Considera apenas 50% da potência de Itaipú (usina binacional).

Segundo a EPE (2020d), o planejamento de expansão da oferta de energia também deve contar com a problemática que envolve a vulnerabilidade da geração hidrelétrica aos efeitos de mudanças climáticas. As baixas taxas de precipitação dos últimos anos oferecem grande risco para o suprimento de eletricidade para a população, como a crise energética ocorrida em 2001. Quanto a isso, uma usina hidrelétrica que for bem gerida, deverá respeitar o regime hidrofluvial do canal, minimizando as alterações negativas em regimes hidrológicos. O impacto é minimizado por um regime bem gerenciado.

Com a inserção de fontes alternativas de energia renovável, a matriz elétrica brasileira tende a evoluir, em perspectivas futuras. O PNE 2050 indica que, provavelmente, a geração hidrelétrica terá outro importante papel para a segurança energética nacional. A redução da

participação da hidreletricidade cederá espaço para participação de fontes intermitentes, como a eólica e solar (fontes não despacháveis). Em contrapartida, as hidrelétricas são mais flexíveis e poderão contribuir para a segurança energética compensando a variação das fontes alternativas. Estudos do PNE 2050 concluem que a maior entrada de “renováveis variáveis não controláveis na matriz”, reduz a necessidade de consumir os estoques de água das hidrelétricas em períodos secos. Numa escala de tempo mais curta, os reservatórios poderiam se manter elevados para “atender ao requisito de geração nos horários mais críticos do sistema”.

- **A energia eólica**

A energia eólica utilizada atualmente consiste na transformação da energia dos ventos em energia mecânica (ao movimentar pás das turbinas aerogeradoras), e em seguida transformá-la em energia elétrica. Os avanços tecnológicos ao longo dos anos possibilitaram o desenvolvimento de usinas *onshore* e *offshore*.

- **O potencial eólico brasileiro**

De acordo com MME e EPE (2018), a Densidade de Potência (DP) é determinada a partir de três importantes fatores: 1) velocidade do vento; 2) área varrida pelo aerogerador; e 3) massa específica do ar. Como variável mais influente, a velocidade do vento depende das características regionais e da presença de obstáculos e rugosidades, os quais diminuem em função da altura acima do solo (alturas maiores são privilegiadas com ventos mais intensos). O aumento da área de varredura (determinada pelo diâmetro das pás do aerogerador), proporciona maiores aproveitamentos do regime de ventos. Por último, a massa específica, determinada pela pressão, umidade e temperatura, também influencia diretamente a energia dos ventos – o aumento da pressão traz vantagens para a potência de energia dos ventos, enquanto o aumento da umidade e temperatura traz efeitos negativos).

- **Sistemas *onshore***

O Atlas de Energia Eólica produzido por Amarante *et al.* (2001) reflete as condições de desenvolvimento desta fonte na época, quando a tecnologia utilizada ainda era limitada à aerogeradores de 50 m de altura. Nele, indicava-se um potencial instalável de 143 GW para todo o território nacional, porém, atualmente sabe-se que este valor é subestimado. Por isso,

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

novos mapas temáticos foram elaborados pelo CEPEL (2017), a partir do modelo numérico de mesoescala Brams (*Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*), com resolução horizontal de 5 km x 5 km.

A Figura 6 diz respeito a um dos mapas temáticos, referente a densidade de potência a 100 m de altura (W/m^2), e evidencia um maior potencial na região ordeste, principalmente no litoral (com destaque aos litorais dos estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, e a região central da Bahia), e Sul (com destaque ao Rio Grande do Sul e Paraná). A região Norte possui áreas com alta densidade relativa dispersas, nos estados do Pará e Roraima. No Sudeste, as áreas que se destacam estão no litoral do Rio de Janeiro e Espírito Santo, e região central de Minas Gerais.

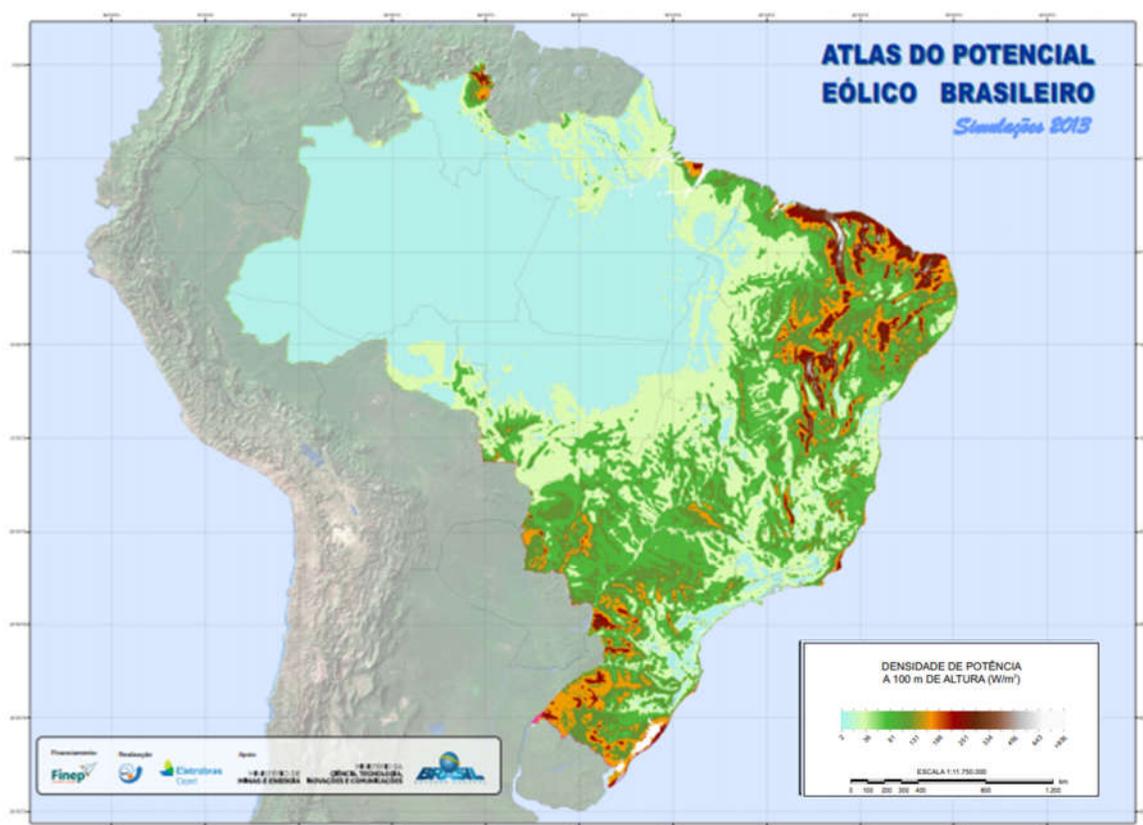


Figura 6. Densidade de Potência a 100 m de altura (W/m^2) (CEPEL, 2017).

Estudos de nível estadual também foram divulgados após a criação do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001) e, segundo o Plano Nacional de Energia 2050 (EPE, 2020e), os dados estaduais fornecidos refletem “cada qual seu conjunto de restrições, modelos e premissas, refletindo o potencial à sua época de edição, em locais com velocidade acima de 7m/s”.

GEOLOGIA, AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE

A Tabela 5 elenca os potenciais estaduais para diferentes alturas e revela um alto potencial eólico *onshore* no país a ser explorado nos próximos anos. O estudo mais recente provém do estado do Ceará (2019), seguido pelos estados da Paraíba e Pernambuco (2017), e do Rio Grande do Sul (2014). O total de energia anual (GWh) é mais elevado para aerogeradores mais altos (140 e 150 metros) e, neste caso, o Rio Grande do Sul oferece o potencial eólico de geração anual (GWh) mais elevado (911.000), seguido pela Bahia (766.500) e pelo Ceará (362.162).

Estados como o Maranhão, Piauí e Sergipe ainda não dispõem de estudos específicos (atlas) sobre o potencial de energia eólica, porém apresentam elevado potencial de acordo com o Atlas produzido pela CEPEL (2017) (EPE, 2020e).

Tabela 5. Potencial eólico dos atlas estaduais (EPE, 2020e).

Estados	Data da Publicação	Potência Instalável (MW)			Energia Anual (GWh)			
		Altura	75 m 80 m* 70 m**	100 m	150 m 140 m*	75 m 80 m* 70 m**	100 m	150 m 140 m*
Alagoas	2008		336	649	n.d.	822	1.340	n.d.
Bahia	2013		38.600 *	70.10 0	195.20 0	150.40 0*	273.500	766.500
Ceará	2019		23.144 *	41.77 0	94.274	82.660 *	153.065	362.162
Espírito Santo	2009		448	1.143	n.d.	1.073	2.397	n.d.
Minas Gerais	2010		24.742	39.04 3	n.d.	57.812	92.076	n.d.
Paraíba	2017		6.000* *	14.70 0	42.100	23.690 **	58.770	167.880
Paraná	2007		1.363	3.375	n.d.	3.756	9.386	n.d.
Pernambuc o	2017		6.600* 5	10.72 5	20.830 *	25.775 *	42.100	84.159*
Rio de Janeiro	2002		1.524	2.813	n.d.	4.835	8.872	n.d.
Rio Grande do Norte	2003		19.431	27.08 0	n.d.	55.901	69.293	n.d.
Rio Grande do Sul	2014		n.d.	102.8 00	245.30 0	n.d.	382.000	911.000
São Paulo	2012		15	564	n.d.	48	1.753	n.d.
Total dos Atlas			122.20 3	314.7 62	597.70 4	406.77 2	1.094.55 2	2.291.70 1

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

○ Sistemas *offshore*

O potencial eólico *offshore* utilizado foi elaborado pela EPE (2020f) (*Roadmap Eólica Offshore Brasil*), por meio da base de dados ERA5. Deve-se lembrar que as análises não consideraram nenhuma restrição nas áreas exploráveis (“áreas de proteção ambiental, rotas comerciais, rotas migratórias de aves, áreas de exploração de petróleo ou outras áreas com usos conflitantes”). A Figura 7 indica que, para locais com profundidade de até 50 m, aerogeradores de 100 m de altura têm potencial para produzir cerca de 697 GW de energia.

Velocidade /Batimetria	Áreas aproveitáveis (km ²)				Potencial (GW)				Potencial (TWh)			
	0-20	20-50	50-100	>100	0-20	20-50	50-100	>100	0-20	20-50	50-100	>100
≥6,0	175.754	186.188	171.923	2.784.706	628	641	531	9.100	1.789	2.048	1.576	30.140
≥6,5	147.234	171.441	147.519	2.602.599	522	591	467	8.420	1.582	1.949	1.450	28.793
≥7,0	79.869	123.078	79.907	1.765.981	276	421	237	5.833	1.008	1.528	902	21.872
≥7,5	38.637	64.276	57.360	1.237.126	129	209	159	4.014	566	890	667	16.101
≥8,0	29.017	46.109	50.429	674.730	100	147	137	2.056	456	664	587	8.934
≥8,5	16.835	22.227	31.507	333.324	63	81	87	993	308	398	383	4.612
≥9,0	3.996	7.337	1.852	143.039	15	28	7	399	82	149	38	1.929
≥9,5	729	560	154	2.971	3	2	1	11	16	12	3	63
≥10,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Figura 7. Potencial eólico *offshore* acumulado no Brasil (EPE, 2020f).

Além deste estudo, a publicação Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050 apresenta dados refinados sobre o potencial eólico *offshore* de uma faixa de 30 Km da costa brasileira (EPE, 2020d). O trabalho exclui áreas com restrições conhecidas ou inferidas no ambiente físico, biológico ou socioeconômico.

Os resultados das análises estão representados nas Figuras 8, 9 e 10. Pode-se afirmar que, comparado às outras regiões do país, o Nordeste é a que apresenta a maior área com disponibilidade de ventos com velocidade superior a 9 m/s.

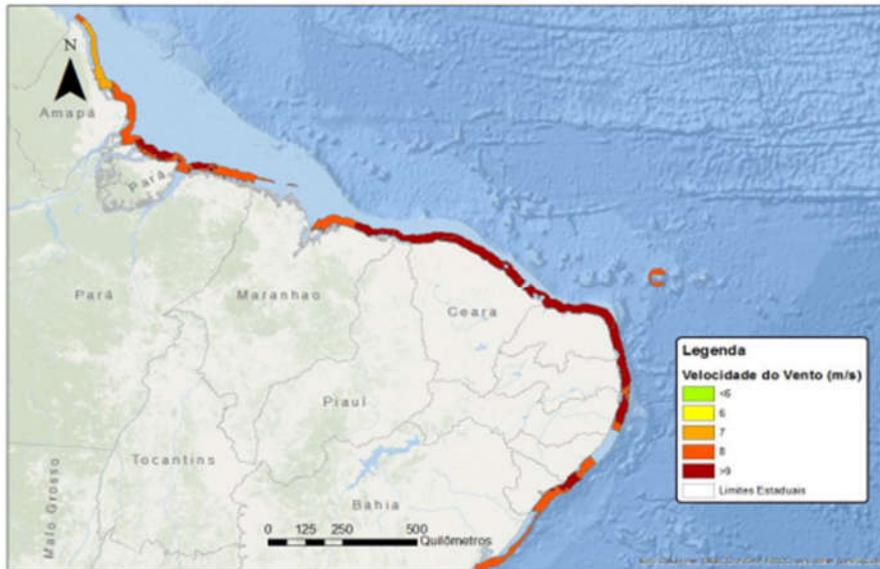


Figura 8. Campo de vento médio no Atlântico Sudoeste nas Regiões Norte e Nordeste (EPE, 2018).

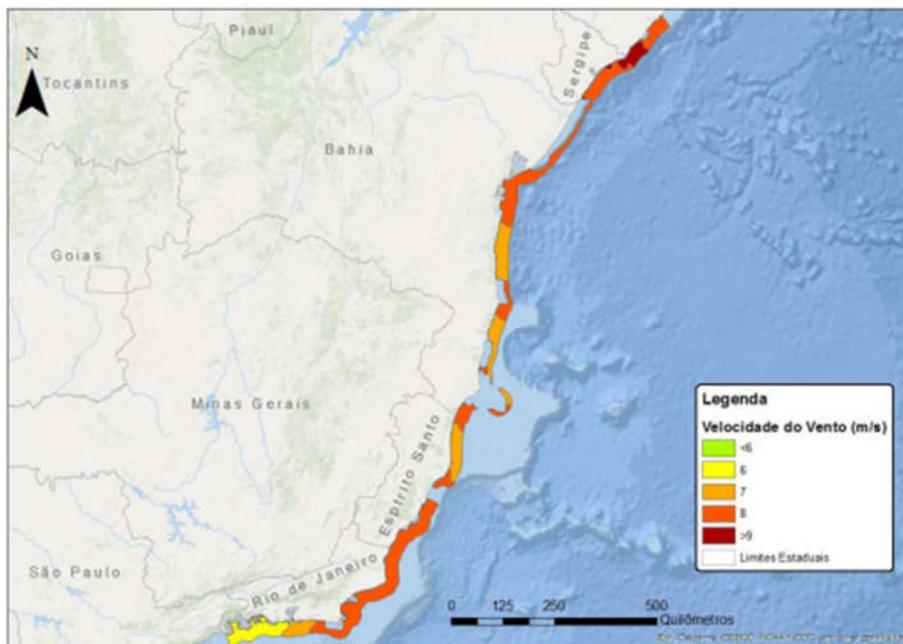


Figura 9. Campo de vento médio no Atlântico Sudoeste nas Regiões Nordeste e Sudeste (EPE, 2018).

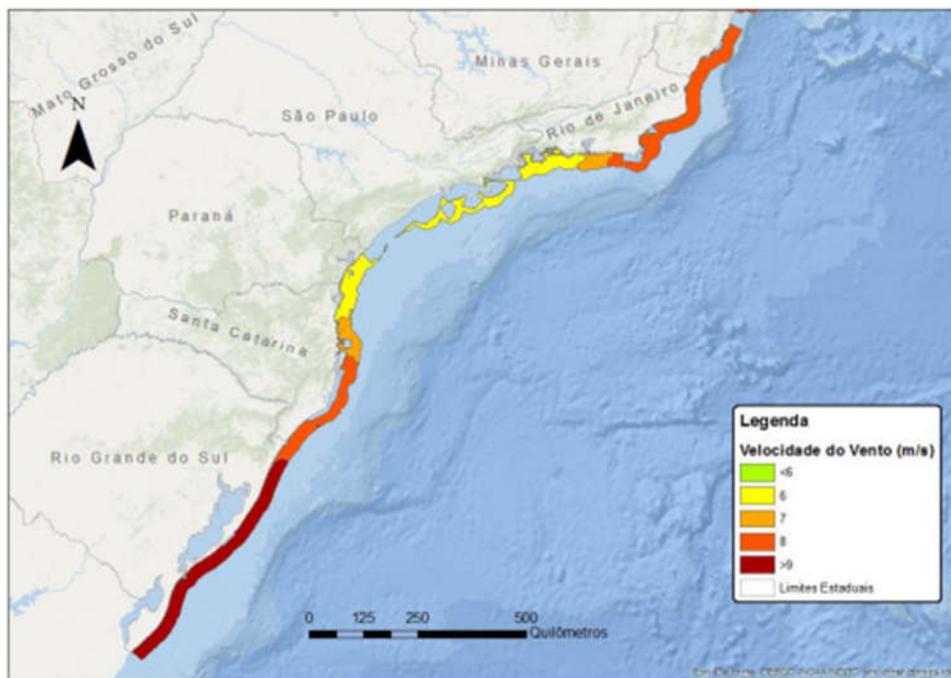


Figura 10. Campo de vento médio no Atlântico Sudoeste nas Regiões Sudeste e Sul (EPE, 2018).

- **O atlas eólico do Espírito Santo**

Em particular, o Atlas Eólico do Espírito Santo, divulgado em 2009, revela duas áreas com os maiores potenciais eólicos *onshore* do estado, e suas respectivas descrições: Litoral de Linhares, caracterizado como uma planície costeira de baixa rugosidade e com ventos de até 6,5 m/s a 50 metros de altura; e o litoral sul que engloba Presidente Kennedy e Marataízes, caracterizado como uma área litorânea de baixa rugosidade, também contendo ventos com velocidade em torno de 6,5 m/s a 50 metros de altura (ELETROBRAS CEPEL, 2009).

Quanto ao potencial eólico *offshore*, considerando águas com profundidade de até 20 metros, o Espírito Santo se mostrou mais competitivo. Em locais com velocidades maiores que 7,0 m/s, o potencial de geração correspondeu a 4,7 GW, a 75 metros de altura (ELETROBRAS CEPEL, 2009).

- **Os incentivos do estado à geração eólica**

Como afirma Zaparolli (2019), a crise energética de 2001 ascendeu discussões sobre a importância da diversificação da matriz elétrica no Brasil. Por esse motivo, criou-se no mesmo

ano o Programa Emergencial de Energia Eólica (Proeólica), com objetivo de contratar 1.050 MW de usinas eólicas até o término de 2003 (BRASIL, 2001). Porém, o programa não foi adotado, nem sequer regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Em seguida, criou-se o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), em 2002 (Lei nº10.438/2002). Segundo a SRD (2015), o programa tem como objetivo aumentar a participação de fontes renováveis alternativas para a produção de eletricidade. Empreendedores sem vínculo societário com concessionárias de geração foram privilegiados.

Segundo a Eletrosul (n.d.), o Proinfa visa a diversificação da matriz elétrica brasileira, atribuindo segurança energética ao sistema de abastecimento. Além disso, a diversificação da matriz também proporcionaria um maior aproveitamento das potencialidades e características ambientais de cada região. O Programa almejava um acréscimo de 3,3 GW na capacidade instalada para geração de energia elétrica, dividido entre 1,1 GW para pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), 1,1 GW para biomassa, e 1,1 GW para energia eólica. Logo, a Eletrobrás contratou a geração de energia por fontes renováveis por um prazo de 20 anos, por preços mais elevados do que até então a energia hidráulica proporcionava. Ao fim da primeira fase do programa, a energia eólica obteve maiores volumes de capacidade instalada contratada.

O método de compra utilizado na primeira fase do programa, a fim de incentivar o mercado de energia renovável mais intensamente, foi o sistema *feed-in* (DUTRA; SZKLO, 2006). Segundo Passos (2016), o *Feed-in-Tariff* funciona com o estabelecimento de tarifas fixas com contratos de longo prazo (no caso, 20 anos), para a geração de energia renovável. Essa produção é incentivada devido ao fato de que a energia injetada na rede possui valor mais elevado do que o da energia comprada na distribuidora. Ou seja, o sistema de distribuição paga melhor pela energia proveniente de biomassa, PCHs e sistemas eólicos. Segundo Lage e Processi (2013), esse sistema de incentivo não é mais usual no país. Na segunda fase do programa, adotou-se o método de compra com modicidade tarifária.

O artigo da Cenários Eólica (2018) aponta aspectos negativos do programa, como a exigência de um índice de nacionalização de 60% dos componentes e serviços envolvidos nos projetos de energia, o que diminuiu o interesse de investimento. Porém, a decisão, de certa forma, estimulou a indústria de componentes e aerogeradores no Brasil. Além disso, o Proinfa abriu portas para os chamados leilões de fontes alternativas (LFA). Além deste, projetos eólicos também participam dos leilões de energia nova.

A competitividade dessa fonte de energia cresceu ao longo dos anos e, em 2012, seu preço alcançou o mínimo histórico no país, com média de R\$ 87,94/kWh (em 2009, o preço médio era de R\$ 167,4/kWh) (LAGE; PROCESSI, 2013).

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

A Tabela 6 elenca os mais importantes incentivos à geração de energia eólica no Brasil. Em sua maioria, visam a diminuição do preço de custo de projetos eólicos, o que destaca a importância de políticas públicas para tornar a fonte renovável alternativa mais competitiva.

Tabela 6. Alguns mecanismos de incentivo à energia eólica no Brasil (Elaborado a partir do trabalho de Lage e Processi (2013) e Abragel (n.d)).

Imposto de Importação Zero	A aquisição de aerogeradores importados passou a ser menos onerosa. Medida estava em vigor até 2009.
Isenção do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI)	Desenvolvimento da cadeia produtiva nacional de aerogeradores. O imposto representava cerca de 7,5% do valor do produto.
Isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços (ICMS)	As mercadorias incluem equipamentos e componentes necessários para a geração de energia eólica (por exemplo, aerogeradores, reguladores, controladores, componentes internos e torres). Incentivo está em vigor desde 1997 e foi prorrogado até 2028.
Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (Reidi)	Regulamentado em 2007, o Reidi zerou a cobrança de PIS-Cofins para toda a infraestrutura, sendo a geração eólica uma das beneficiadas.
Certificação de Energia Renovável	Ao adquirir essa certificação, uma empresa, por exemplo, passa a ser abastecida pela rede local de eletricidade, pagando o equivalente ao consumo de energia apenas de fonte renovável.
Sistema <i>net metering</i>	Regulamentado pela ANEEL em 2012, o sistema regula a troca de energia entre concessionárias e usuários, por meio da acumulação de créditos (excedente de energia) e débitos (o consumo supera a geração de energia). O sistema contribuiu para a geração distribuída de energia eólica, de menor porte.

○ Geração de energia eólica no Brasil

A Figura 11 mostra a evolução da geração de energia eólica no Brasil (GWh), a partir de 2007, e evidencia que, desde 2018 ela é superior a geração à biomassa. O crescimento de 15,5% entre 2018 e 2019 se destacou entre as outras demais fontes, ficando abaixo apenas do percentual de crescimento da energia solar.

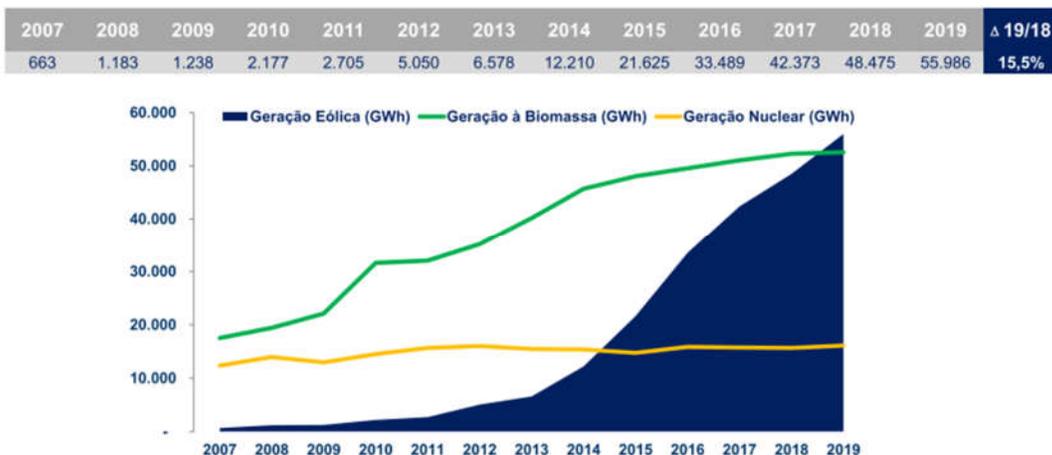


Figura 11. Evolução da Geração Eólica (GWh) (EPE, 2020b).

A Figura 12 corresponde à evolução da capacidade instalada (MW) de energia eólica no país até 2019, e destaca que o incremento de nova capacidade instalada foi mais elevado em 2015, decaindo a partir de então. O incremento de 2019 corresponde ao mais baixo dos últimos 8 anos, provavelmente em decorrência dos cenários econômicos que o Brasil tem enfrentado.

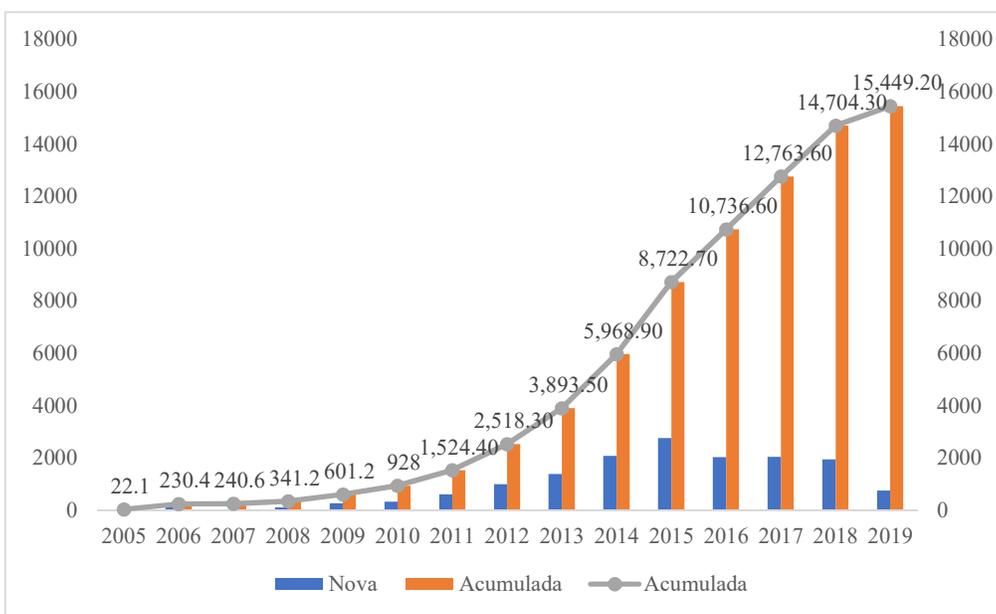


Figura 12. Evolução da Capacidade Instalada (MW) de Energia Eólica no Brasil (ABEEOLICA, 2020).

De acordo com o ONS (2019b), a forma de operação das usinas que compõem o SIN é dividida em 3 grandes modalidades (Tipo I, II e III), podendo conter subdivisões.

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

Usinas Tipo I correspondem àquelas que são conectadas à rede básica, ou que não são conectadas à rede básica, porém contribuem para a operação do SIN. Usinas Tipo II referem-se àquelas não classificadas como Tipo I, e que interferem no SIN (o Tipo II-B, em específico, corresponde às usinas que apresentam limitações quanto ao despacho centralizado, e cujo reservatório impacta a operação de usinas Tipo I). O Tipo III corresponde às usinas não conectadas à rede básica que não interferem na operação do SIN, e a empreendimentos de autoprodução conectados à rede básica, sem que a produção supere a demanda. Por último, nomeia-se como Conjunto um grupo de usinas capaz de injetar uma potência significativa em uma subestação do SIN, ou ponto de conexão compartilhado, também chamado de subestação coletora (dessa forma, geram impacto na fronteira da rede básica) (ONS, 2019b).

Sobre a participação da energia eólica no SIN, a Figura 13 confirma a sua evolução crescente, em especial para a capacidade instalada de usinas tipo Conjunto (ONS, 2019a). Segundo o Boletim, houve recordes de geração média diária e horária no SIN, onde nesses períodos a geração eólica era responsável por 17% e 16,8%, respectivamente.

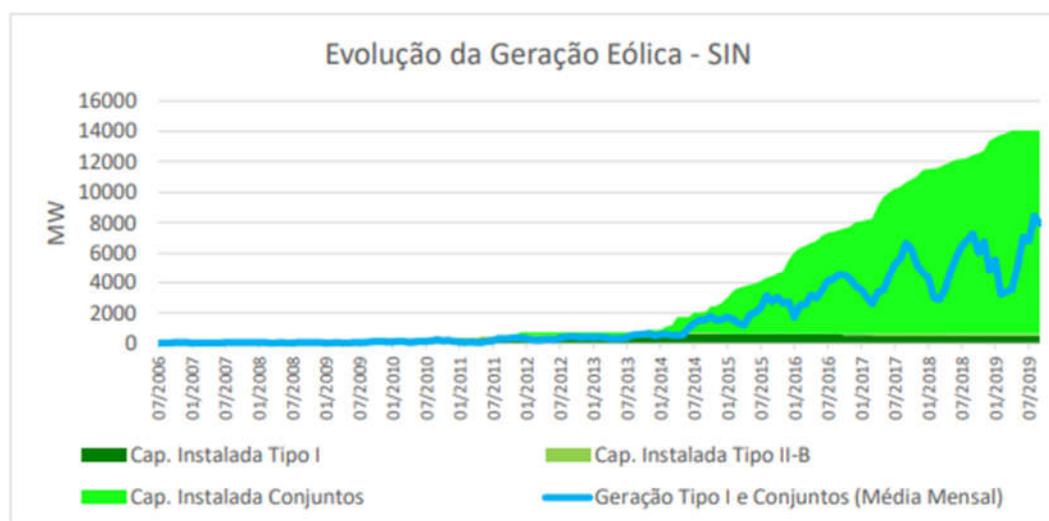


Figura 13. Evolução da capacidade instalada de usinas eólicas e geração eólica verificada no SIN. A capacidade instalada contempla apenas usinas em operação comercial (ONS, 2019a).

O Boletim Mensal de Geração Eólica (ONS, 2019a) também informa sobre a capacidade instalada de usinas eólicas (UGs em operação comercial), como demonstra a Tabela 7. A partir desses dados atualizados, percebe-se que a desenvolvimento eólico na região Sudeste é o mais

retraído frente às outras regiões, contendo apenas usinas do Tipo III. A região Nordeste se destaca com a maior capacidade instalada, seguida da região Sul.

Tabela 7. Capacidade instalada de usinas eólicas (UGs em operação comercial) por Subsistema (ONS, 2019a).

Subsistema	Capacidade Instalada (MW)					
	Tipo I	Tipo II-B	Conjuntos	Total ONS	Tipo III	Total
N	0,00	0,00	328,80	328,80	378,02	706,82
NE	526,29	23,10	11.177,62	11.727,01	923,99	12.651,00
S	0,00	97,68	1.898,69	1.996,37	83,50	2.079,87
SE	0,00	0,00	0,00	0,00	28,21	28,21

Observações:

- a) N: Amapá, Pará, Maranhão, Amazonas e Tocantins;
- b) NE: Compreende todos os estados no Nordeste, exceto o Maranhão;
- c) S: Compreende todos os estados do Sul;
- d) Se: Compreende estados do Sudeste e Centro-Oeste, além do Acre e Rondônia.

A região Nordeste mostrou-se como líder em geração eólica no país, entre o período de outubro de 2018 e setembro de 2018, especialmente nos estados da Bahia e Rio Grande do Norte, como demonstra a Figura 14. O subsistema Nordeste também alcançou recordes de geração média diária e horária, com 8.875 MW no dia 06/09 e 9.825 MW entre 22 e 23 horas do dia 23/09 (ONS, 2019a).

Em relação a implantação de centrais geradoras eólicas *onshore*, a ANEEL (2020) informa que atualmente existem 105 usinas em situação de obra “em andamento”, as quais apresentam alta viabilidade e totalizam cerca de 3.443,31 MW de potência. A maior parte dessas usinas tem previsão de início de operação para 2021 (1.986 MW de potência), e concentram-se nos estados do Piauí, Bahia, Rio Grande do Norte, Paraíba e Ceará. As unidades liberadas para operação comercial até outubro de 2020 equivalem a 914 MW de potência, e concentram-se nos estados da Bahia, Rio Grande do Norte e Ceará.

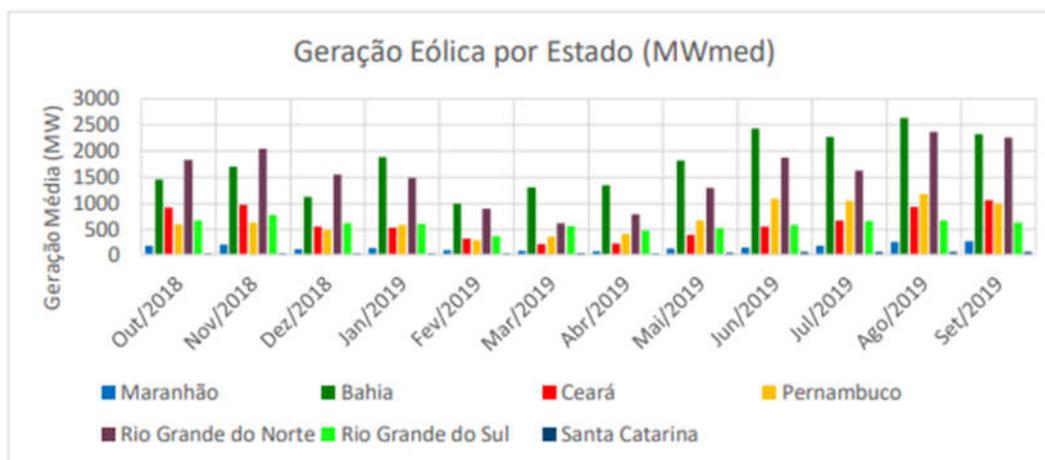


Figura 14. Geração média mensal no período de 12 meses, entre outubro de 2018 e setembro de 2019 (NOS, 2019a).

Sobre centrais eólicas *offshore*, no Brasil ainda não existem usinas em operação (os projetos ainda estão na etapa inicial – licenciamento ambiental). Em 2019, o IBAMA anunciou 3 processos ativos para licenciamento ambiental de energia eólica *offshore*: CEO Asa Branca I - 720 MW (Amontoada/Ceará), EOL BI Energia LTDA - 310 MW (Caucaia/Ceará), e Planta Piloto de Geração Eólica Offshore da Petrobras - > 7 MW (Rio Grande do Norte) (IBAMA, 2019). Em 2020, a EPBR (2020) anunciou o início do licenciamento ambiental de 2 projetos da empresa Equinor, nomeados como Aracatu I e Aracatu II, cada um contanto com capacidade de 2 GW. Os parques estarão localizados no litoral do Rio de Janeiro e do Espírito Santo, abrangendo a divisa entre os estados.

○ O geólogo em projetos eólicos

Segundo Simas e Pacca (2013), projetos eólicos podem gerar empregos em três diferentes esferas: 1) desenvolvimento tecnológico, que engloba a pesquisa, desenvolvimento e fabricação de equipamentos; 2) instalação e descomissionamento de usinas, que envolvem o planejamento, gestão de projetos, transporte e construção; e 3) operação e manutenção da usina, envolvendo também a geração e distribuição da energia gerada. Além disso, a presença de novos trabalhadores em uma região movimenta a economia local, por meio do aumento da demanda por hospedagem e restaurantes, por exemplo.

Sobre as oportunidades para o mercado de trabalho para geólogos, a aplicação de conhecimentos geológicos pode ser requisitada principalmente para o planejamento,

licenciamento e monitoramento ambiental, os quais também podem incluir a avaliação de riscos geológicos para a instalação das usinas. Os processos de avaliação que envolvem o licenciamento ambiental (Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental – EIA/RIMA) são essenciais para determinar a viabilidade econômica de um projeto.

À título de exemplo, o estudo de Freitas (2016) ressalta a importância da avaliação do espaço físico para a alocação desse tipo de empreendimento, a qual poderia evitar perdas financeiras para os empreendedores (por interrupções do licenciamento, por exemplo), e garantir que o uso da energia eólica seja de fato sustentável e responsável. O trabalho consiste em um levantamento de riscos geológicos relacionados à instalação dos parques Macambira I e II, Baixa do Feijão e Aventura (Rio Grande do Norte).

Os resultados obtidos por Freitas (2016) revelam possíveis riscos geotécnicos: 1) em função da proximidade dos empreendimentos à Áreas de Proteção Permanente que delimitam zonas limítrofes de chapadas (Macambira I e II); 2) em função das características do subsolo, que podem apresentar cavidades (Macambira I e II, porém apresentam incertezas devido à falta de estudos aprofundados; Baixa do Feijão, que apresenta 3 grutas em áreas próximas à sua área de atuação).

○ **Possíveis impactos socioambientais de usinas eólicas**

A energia eólica já apresenta vantagens óbvias em relação às hidrelétricas, por conta da não necessidade de construção de enormes reservatórios de água. Entretanto, esse fato não quer dizer que a fonte eólica seja isenta de impactos ambientais negativos. Portanto, a investigação ambiental é essencial.

▪ **Impacto visual e alteração da paisagem**

Poluição ambiental define-se como degradação que impacta as condições estéticas do meio ambiente, o que pode acarretar consequências ao bem estar e à saúde da população, além de prejudicar atividades sociais e econômicas. Entretanto, existe certa subjetividade quanto ao que é considerado esteticamente desagradável (SILVA, 2003).

Particularmente, no Brasil, parques eólicos são frequentemente instalados em regiões de dunas, as quais contêm uma estética ambiental com inegável importância turística e socioeconômica. A operação dos parques exige construção de vias de acesso entre torres, o que causa alterações na dinâmica geoambiental e supressão de ambientes lagunares (PINTO *et al.*,

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

2014). A subjetividade quanto ao julgamento estético resulta na dualidade entre: impactos negativos no desenvolvimento socioeconômico local frente à degradação estética e turismo; e impactos positivos no desenvolvimento socioeconômico frente à “atração turística” de parques eólicos, como símbolos de desenvolvimento sustentável (PINTO; MARTINS; PEREIRA, 2017).

▪ Alteração de componentes morfológicos em região litorânea

Além da questão estética, as alterações na dinâmica geoambiental ocasionada pela instalação de parques em áreas de dunas pode ter consequências significativas. De acordo com Meireles (2011), estudos de campo identificaram uma série de impactos negativos nas regiões de dunas do litoral cearense: 1) desmatamento de dunas fixas; 2) soterramento de dunas fixas em função da terraplanagem para construção de vias de acesso e canteiros de obras; 3) soterramento de lagos interdunares; 4) cortes e aterros nas dunas fixas e móveis; 5) introdução de material sedimentar proveniente de outros ambientes, para impermeabilização e compactação do solo; 6) fixação de dunas móveis.

Esse conjunto de impactos na região litorânea pode alterar a dinâmica costeira, ocasionando o “colapso de sedimentos na faixa praial e erosão progressiva” (MEIRELES, 2011).

A erosão da zona costeira, por sua vez, pode gerar grandes problemas socioambientais, como: 1) redução da largura de praia e retrogradação; 2) extinção da zona de pós-praia; 3) extinção e desequilíbrio de habitats naturais; 4) aumento da intensidade e da frequência de inundações costeiras; 5) avanço da intrusão salina em corpos hídricos de água doce da região litorânea; 6) destruição de patrimônios públicos e privados em função da erosão costeira; 7) desvalorização de imóveis; 8) impacto visual e alteração da paisagem; 9) comprometimento de atividades socioeconômicas da região; 10) utilização de verba pública para conter o avanço da erosão na costa e reconstruir as orlas (DE GOUVEIA SOUZA, 2009).

▪ Impacto sonoro

Parques eólicos podem produzir ruídos de duas formas: a partir das engrenagens e do gerador (ruído mecânico), e a partir do atrito entre as pás do aerogerador e o vento (ruído acústico). O efeito mais significativo provém de ruídos acústicos, os quais tendem a diminuir

em função da modernização dos componentes das turbinas eólicas (PINTO; MARTINS; PEREIRA, 2017).

De acordo com publicação da *American Wind Energy Association* (AWEA), o ruído acústico notado à uma distância de 350 metros se assemelha ao ruído presente em um ambiente de escritório (entre 35 a 45 decibéis) (COSTA; CASOTTI; AZEVEDO, 2009).

▪ **Interferências eletromagnéticas**

Alguns componentes do aerogerador podem causar interferências eletromagnéticas que afetam sinais de televisão e rádio, por exemplo. A modernização desses componentes e o isolamento da nacelle com constante manutenção são boas soluções, exceto para residências muito próximas dos parques. Por isso, estudos sobre a área de interferência devem ser aplicados durante a fase de planejamento do projeto eólico (PINTO; MARTINS; PEREIRA, 2017).

▪ **Mortalidade de aves**

As argumentações sobre esse possível impacto são provenientes de trabalhos antigos, sobre parques eólicos construídos sem um estudo de impacto referente às rotas migratórias de aves. Atualmente, medidas mitigadoras são comuns, como: programas de monitoramento ambiental durante todo o funcionamento dos parques, planejamento adequado do projeto (considerando as trajetórias principais de voo de espécies migratórias), redução da velocidade das pás em momentos críticos, entre outros (PINTO; MARTINS; PEREIRA, 2017).

▪ **Ocupação e uso da terra**

A ocupação e uso da terra determina qual tipo de impacto uma determinada região estará sujeita. Portanto, agentes envolvidos (representações das comunidades locais, provedores de comunicação de rádio e radar, autoridades de proteção ambiental etc.) devem participar do projeto desde a fase de planejamento (PINTO; MARTINS; PEREIRA, 2017).

Sistemas ambientais que dão suporte a “evolução morfoestrutural e paisagística da zona costeira”, ao desenvolvimento socioeconômico e cultural das populações nativas e à biodiversidade da zona costeira, necessitam de estudos sobre a viabilidade do empreendimento (estudos de impacto ambiental prévio) (PINTO *et al.*, 2014).

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

Por outro lado, a ocupação e uso da terra para empreendimentos eólicos (assim como para outros empreendimentos de energia renovável alternativa), podem trazer benefícios socioeconômicos, como: 1) geração de empregos; 2) desenvolvimento local e regional em zonas menos populosas, evitando problemas sociais como o êxodo rural, por exemplo; 3) inovação tecnológica e crescimento da indústria, como para a produção de componentes de empreendimentos eólicos nacionais; 4) aumento da oferta de energia e consequente democratização do acesso à energia, principalmente em regiões isoladas que dependem da transmissão de eletricidade por longas distâncias (SIMAS; PACCA, 2013).

O uso de terrenos rurais privados para geração de energia eólica também corresponde a um impacto socioeconômico positivo. Segundo o Canal Jornal da Bioenergia (2019), o arrendamento de parte de propriedades privadas garante renda extra para agricultores, e permite a continuidade da atividade agropecuária existente.

o Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Além dos impactos ambientais ocasionados pela instalação e operação de parques eólicos, é interessante avaliar os impactos provenientes do ciclo de vida dos produtos que envolvem a geração eólica. Apesar de ainda pouco difundido no Brasil, essa ferramenta é utilizada em países considerados desenvolvidos, como Estados Unidos da América e países da Europa, para contribuir com a constante inovação de processos produtivos (COELHO FILHO; SACCARO JUNIOR; LUEDEMANN, 2016).

Silva, Rebutini e Mancini (2018) contribuíram com o tema realizando uma análise da aplicação da ferramenta ACV em uma usina eólica *onshore*, elaborando suas fases na usina e no aerogerador. Para essa avaliação, os autores usaram dados fornecidos gratuitamente no artigo produzido pela empresa *Vestas Wind Systems A/S*, fabricante das turbinas Vestas, modelo V110-2.0MW. A simulação dos resultados foi feita com o *software* Gabi DfX. Calculou-se, para cada componente da turbina, o seu potencial de impacto ambiental “de acordo com o processo de fabricação, manutenção das peças, especificações de descarte e etapas para reciclar os produtos ao final de sua vida útil”.

Um aspecto importante de ser mencionado é que o *software* visa a diminuição do detalhamento da origem das peças, apesar da necessidade de se analisar as especificações de cada peça do aerogerador de acordo com sua regionalidade, base de dados específicas, entre outras. Essa é uma medida adotada com intuito de ampliar os estudos no setor e fornecer

extrapolações para a quantificação dos projetos eólicos (SILVA; REBUTINI; MANCINI, 2018).

A primeira fase da ACV definiu o objetivo como sendo avaliar uma usina eólica contendo capacidade instalada de 50 MW, 25 aerogeradores modelo V110-2.0, e vida útil de 20 anos; e o escopo, definindo o tipo de análise como de “berço ao túmulo”, ou seja, inclui desde a extração de matéria prima para aerogeradores, até o descarte do material, com possível reciclagem ou reaproveitamento.

Na segunda fase, responsável pela elaboração do inventário de ciclo e impactos ambientais, modelou-se os componentes utilizando o *software* GaBi DfX, o qual executou o mapeamento dos processos de fabricação e dos materiais neles utilizados.

Na terceira fase, a partir da interpretação dos dados fornecidos pelas etapas anteriores, os autores definiram cada categoria de impacto, junto a possível forma de redução desse impacto (no caso, a reciclagem de componentes) e o crédito ambiental referente ao “fardo evitado” proporcionado pela reutilização (Tabela 8). Observou-se que, apesar de a cadeia produtiva na fase de extração de matéria prima ter um alto potencial de impacto ambiental negativo, 98% dos componentes envolvidos na operação de uma usina eólica são recicláveis. Por isso, a aplicação de uma logística reversa eficiente pode ser vista como “compensadora”, frente aos impactos inerentes à atuação das usinas.

Tabela 8. Categorias observadas no estudo Vestas (Elaborada a partir de Silva, Rebutini e Mancini, 2018).

Categoria de Impacto	Formas de Redução	Créditos Ambientais
Elementos abióticos	Reutilizar no final da vida útil	70%
Elementos abióticos fósseis	Reutilizar no final da vida útil	30%
Emissão de dióxido de enxofre e óxido de zinco	Reutilizar no final da vida útil	27%
Emissão de fosfato	Reutilizar no final da vida útil	6%
Envenenamento de água doce, ar e solo – Emissões de dioxinas policloradas	Reutilizar no final da vida útil	9%
Emissão de gases de efeito estufa	Reutilizar no final da vida útil	31%
Potencial toxicológico humano e ecotoxicológico marinho	Reutilizar no final da vida útil	79% e 72%
Oxidantes fotoquímicos	Reutilizar no final da vida útil	31%
Liberção tóxica para o meio ambiente	Reutilizar no final da vida útil	2%

METODOLOGIA

O trabalho foi baseado em uma revisão bibliográfica, utilizando fontes diversas. Em todas as etapas, foram utilizados sites de pesquisa como o Scielo.org, Google Acadêmico e ScienceDirect.com.

Para iniciar a revisão, utilizou-se documentos atuais disponibilizados pela EPE, IBGE, ANEEL, ONS. Desse modo, foi possível analisar dados sobre o consumo e geração de energia elétrica no Brasil, e quais são as perspectivas em relação à expansão da oferta interna de energia elétrica e a diversificação da matriz elétrica para o próximo decênio. A partir dessa análise sobre os índices nacionais, foi possível perceber a tendência crescente da participação de energia eólica na matriz, e em contrapartida, a queda da participação de energia hidráulica.

Com abordagem focada na questão ambiental que envolve a expansão de oferta de energia, no terceiro momento foi realizada a explanação de alguns conceitos referentes às políticas ambientais e ao desenvolvimento sustentável. Em seguida, o foco da pesquisa volta-se para a fonte de energia eólica, abordando o potencial eólico nacional e regional, baseado em Atlas produzidos pelo Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL), Agência de Serviços Públicos do Estado do Espírito Santo (ASPE) e material produzido pela EPE. Para analisar os índices de crescimento da geração eólica do país, também foram consultados documentos da EPE.

Por último, foram abordadas as políticas públicas responsáveis pelos incentivos à geração eólica no Brasil, além dos serviços envolvidos no setor de energia eólica que abrangem as áreas de conhecimento do geólogo, e os possíveis impactos ambientais gerados pela geração de energia eólica (seja no processo de obtenção de energia ou pela cadeia produtiva dos componentes de um projeto eólico).

Sobre os impactos relacionados à cadeia produtiva de aerogeradores, o estudo apresenta a limitação de contar apenas com uma Avaliação de Ciclo de Vida, a qual considera um fabricante. Atualmente, o Brasil sedia uma maior diversidade de marcas, principalmente estrangeiras.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para analisar o contexto da expansão da oferta de energia elétrica no Brasil e, posteriormente, estabelecer seus aspectos do ponto de vista ambiental, foi realizada uma revisão bibliográfica. Para se conhecer o cenário de desenvolvimento do setor elétrico brasileiro, foi

realizado um estudo com base em dados fornecidos pelo poder público, sobre a composição da matriz elétrica, acerca da geração de eletricidade e quais são as perspectivas do poder público em relação ao suprimento de eletricidade no país a médio prazo.

A urbanização, industrialização e a infraestrutura das cidades, junto ao crescimento da população, são os principais fatores que influenciam a demanda de energia. A renda da população (a qual é proporcional ao cenário econômico do país e ao seu grau de industrialização) e o número de habitantes são diretamente proporcionais ao consumo de energia (total e per capita), e conseqüentemente interferem na oferta interna de energia do país (EPE, 2019c, 2019b, 2020b; TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

A partir da necessidade de suprir a demanda, reduzir a dependência da fonte hidráulica (a qual compõem a maior parte da matriz elétrica brasileira) e de se adequar aos compromissos de desenvolvimento sustentável previstos na legislação nacional, a energia eólica recebeu considerável protagonismo.

Entre 2018 e 2019, a energia eólica obteve a segunda maior taxa de crescimento (15,5%), e as previsões são de que a tendência crescente permaneça. Em 2019, a matriz elétrica brasileira era composta principalmente pela fonte hidráulica (64%), seguida pela termelétrica a gás natural (10%) e eólica (9%). A ONS (2020) prevê que até 2024, a energia eólica ocupe o segundo lugar em capacidade instalada, assim como as perspectivas da EPE para 2029. Em ambos os estudos, a matriz elétrica tende a se diversificar com a redução de participação de hidrelétricas e aumento dos projetos eólicos, termelétricos e solares. Porém, a recente instabilidade econômica em função da pandemia de 2020 pode alterar o cenário futuro, o que dificulta as previsões para o setor energético. Haverá incremento na oferta interna de energia, porém em menores proporções do que a prevista anteriormente (EPE, 2019d, 2019c, 2019b, 2020a, 2020b, 2020c; ONS, 2020).

O uso intensivo de energia hidráulica para suprir a demanda do país, em uma matriz elétrica pouco diversificada, tem representado risco à segurança energética, devido a vulnerabilidade dessa fonte aos períodos de escassez hídrica. Além disso, expansão da capacidade instalada envolve a exploração de regiões com alta sensibilidade socioambiental. O planejamento a longo prazo para o setor de energia indica que até 2050, a energia hidráulica terá papel complementar junto às fontes renováveis intermitentes (principalmente a eólica) (EPE, 2020d; TERRIN; BLANCHET, 2019). A energia termelétrica a gás exercerá papel complementar às fontes renováveis (hidráulica, eólica e solar), em função do seu caráter despachável, e atribuirá mais segurança à matriz (EPE, 2019b).

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

O potencial eólico *onshore* do Brasil, para torres de 50 m, é avaliado em 143 GW. Estudos mais atuais do potencial eólico brasileiro, os quais consideram torres mais altas, mostram que a região com maior densidade de potência (W/m^2) são o Nordeste, seguido do Sul e Centro-Oeste/Sudeste. Entre os estados que possuem estudos sobre o tema, o potencial do Rio Grande do Sul se destaca com 102.800 MW e 245.300 MW, seguido da Bahia com 70.100 MW e 195.200 MW e Ceará com 41.770 MW e 94.274 MW, para torres de 100 m e 150 m de altura, respectivamente (EPE, 2020e).

O país apresenta um potencial mais elevado em regiões mais afastadas da costa. O potencial eólico *offshore* é liderado pela região Nordeste, a qual apresenta maior área com disponibilidade de ventos com velocidades superiores a 9 m/s, seguida da região Sul. Particularmente, o Espírito Santo apresenta potencial significativo principalmente nas regiões do litoral de Linhares, Presidente Kennedy e Marataízes. Parques *onshore* apresentam uma capacidade instalável de 448 MW e 1.143 MW, para torres de 75 m e 100 m, respectivamente. Para parques *offshore*, existe uma capacidade de geração de 4,7 GW em locais de até 20 m de profundidade e com torres de 75 m (ELETROBRAS CEPEL, 2009; IEA, 2011).

Para a construção de um ambiente favorável para a energia eólica no país, foi necessária uma série de incentivos do poder público, a fim de estimular a industrialização do setor eólico em terreno nacional e baratear os seus componentes. O Proinfra foi o principal responsável pela maturidade da fonte de energia. A capacidade instalada saltou de 22,1 MW, em 2005, para 15.449,20 MW em 2019 (CENÁRIOS EÓLICA, 2018; ELETROSUL, N.D.; ZAPAROLLI, 2019).

As obras de projetos *onshore* que se encontram em andamento apresentam potência de 3.443,31 MW, da qual 1.986 MW contemplam a região Nordeste, e tem previsão de início de operação para 2021. Os projetos previstos para operar em 2020 reúnem 914 MW, e concentram-se na região Nordeste (ONS, 2019). Sobre as usinas *offshore*, os parques em processo de licenciamento contemplam a região Nordeste e Sudeste (Rio de Janeiro e Espírito Santo). Os projetos do Sudeste devem apresentar a capacidade mais elevada (dois parques com 2 GW de potência cada) (EPBR, 2020).

Esse tipo de empreendimento gera empregos em diferentes esferas e uma delas é a de instalação e descomissionamento de usinas, a qual envolve o planejamento, gestão de projetos, transporte e construção (SIMAS; PACCA, 2013). O mercado de trabalho para profissionais geólogos, pode ser aquecido frente à expansão do uso de energia eólica, com oportunidades nas áreas de planejamento, licenciamento e monitoramento ambiental (as quais contemplam o estudo de riscos geológicos para a construção de infraestrutura do parque).

Sob o ponto de vista socioambiental, a energia eólica não pode ser considerada completamente “limpa” e sustentável. Apesar de ser uma fonte renovável, não é isenta de impactos ao meio ambiente, assim como a energia hidráulica. Os impactos negativos mais significativos correspondem à alocação de aerogeradores em regiões costeiras de dunas, comuns na região Nordeste. Nesse caso, o potencial para a alterações da paisagem, supressão de habitats naturais de fauna e flora e alterações na geodinâmica ambiental capazes de provocar o avanço da erosão costeira, são os principais pontos a serem considerados (MEIRELES, 2011; PINTO *et al.*, 2014; DE GOUVEIA SOUZA, 2009).

Já os impactos referentes à cadeia produtiva dos equipamentos envolvidos no processo de geração de eletricidade, analisados a partir da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de um aerogerador, elaborada por Silva, Rebutini e Mancini (2018), são ocasionados principalmente pelo processo de obtenção da matéria-prima para fabricação dos diversos componentes. Essa fase da cadeia produtiva é potencial causadora de problemas como emissão de gases de efeito estufa, contaminação de corpos hídricos, do solo e do ar por metais pesados e substâncias químicas. No caso dessa ACV, o estudo foi aplicado ao aerogerador fabricado pela *Vestas Wind Systems A/S*, a qual possui unidade industrial no município de Aquiraz, Ceará.

Visto que as políticas públicas de incentivo estimularam o crescimento da indústria do setor de energia eólica no Brasil, tornando-o sede para diversos fabricantes estrangeiros, os danos ambientais causados por esse tipo de cadeia produtiva impactam diretamente o ecossistema da população brasileira. Para compensar os danos, a ACV consultada sugere a aplicação de logística reversa para todos os componentes. Ou seja, reciclar os componentes e reinseri-los na cadeia produtiva pode diminuir a necessidade de obtenção de matéria prima nova e, conseqüentemente, suavizar o potencial de dano dessa atividade.

O uso de elementos abióticos (extração e fabricação de materiais para construção de componentes como nacela, gerador e caixa de engrenagens) obteve um crédito ambiental de 70%. O potencial toxicológico humano e ecotoxicológico marinho (provenientes de processos que utilizam o cobre e alumínio, principalmente) obtiveram crédito ambiental de 79% e 72%, respectivamente. Para essas 3 categorias de danos, o reaproveitamento em final de vida útil pode compensar o meio ambiente de forma significativa.

Alguns pontos representam maior risco para o meio ambiente, visto que apresentam um baixo crédito ambiental (o reaproveitamento no final de vida útil não consegue compensar os danos causados de forma eficiente). No caso, o uso de elementos abióticos fósseis (30%), a emissão de dióxido de enxofre e óxido de zinco (resultantes da queima do sulfeto de zinco) (27%), a emissão de gases de efeito estufa (emitidos durante o processo de extração e produção

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

de materiais como ferro, fibra de vidro utilizada nas lâminas, aço e cobre) (31%), e oxidantes fotoquímicos (resultantes da queima de solventes e combustíveis) (31%). Os pontos mais críticos referem-se à contaminação de água doce, ar e solo (emissões de dioxinas policloradas) (9%), a emissão de fosfatos (6%) e a liberação tóxica para o meio ambiente (2%), representando os impactos mais graves.

Como o intuito dessa ferramenta (ACV) é melhorar o desempenho ambiental dos processos produtivos, como afirmado por Coelho Filho, Saccaro Junior e Luedemann (2016), esses pontos abordados podem ser considerados para propostas de inovação de equipamentos. O avanço de técnicas de obtenção dos metais, ou mesmo estudos com intuito de substituir a matéria prima para confecção dos componentes, podem ser alternativas para reduzir os impactos ambientais gerados pela cadeia produtiva de aerogeradores.

Ao analisar as características das principais fontes renováveis de energia elétrica do país, é necessário um estudo mais aprofundado para determinar qual delas é menos poluidora. Entretanto, devido ao fato de a expansão hidrelétrica envolver aspectos sensíveis como o uso de áreas de conservação, terras indígenas e quilombolas e o uso da água (entre a produção de energia, agronegócios, setor industrial, abastecimento da população, entre outros), a fonte eólica pode ser uma alternativa mais viável sob o ponto de vista socioambiental.

Ademais, o aproveitamento da fonte eólica é uma forma de explorar as potencialidades das diferentes regiões do país, e pode ser um importante via econômica para a região Nordeste, a qual possui o potencial eólico mais significativo. Entre os anos de 2002 e 2017, junto ao momento de ascensão da economia nacional, a região apresentou taxa de crescimento do PIB de 2,69% a.a., média superior ao crescimento nacional (2,39% a.a.), onde o setor de energia foi um dos principais contribuintes. Com base em dados do IBGE em 2019, as taxas de crescimento do PIB do nordeste estavam acima da média nacional, exceto nos anos de 2007, 2010 e 2016 (BANCO DO NORDESTE, 2019).

Visto que o potencial eólico do Espírito Santo também é relevante, principalmente para projetos *offshore*, pode-se esperar que a chegada de empreendimentos na região seja uma possível fonte de renda e de empregos para o estado no futuro. Os projetos de parques eólicos *offshore* de Aracatu I e Aracatu II, os quais encontram-se em processo de licenciamento, são promissores para o desenvolvimento econômico da região sudeste.

CONCLUSÃO

A demanda crescente de eletricidade, aliada a necessidade de diversificação da matriz e de um desenvolvimento sustentável, provocaram o crescimento da participação da energia eólica no Brasil. A perspectiva do poder público é de que até 2029, a fonte ocupe o segundo lugar em capacidade instalada, ultrapassando a fonte termelétrica.

De acordo com as definições da Política Nacional de Meio Ambiente, a fonte eólica é potencialmente poluidora, visto que pode gerar uma série de impactos socioeconômicos nas regiões sede (principalmente alterações da geodinâmica costeira), e durante a cadeia produtiva dos equipamentos. Entretanto, devido ao alto potencial eólico brasileiro, junto a dificuldade de expansão da fonte hidráulica e ao caráter não-renovável da fonte termelétrica, a fonte eólica pode ser vista como uma boa alternativa para o desenvolvimento sustentável e econômico do país.

Para a minimização dos impactos ambientais, a alocação dos empreendimentos eólicos deve ser estudada previamente, mediante estudo de impacto ambiental e planejamento, considerando os impactos já observados pela comunidade acadêmica, principalmente nas regiões costeiras do Nordeste.

Em relação à cadeia produtiva, a ACV aponta a necessidade de reaproveitamento de componentes em final de vida útil. Além disso, a partir dos pontos críticos indicados pela ferramenta, percebe-se que o setor (assim como outros setores industriais que utilizam os mesmos insumos) carece de inovação tecnológica capaz de substituir matérias primas ou de otimizar suas técnicas de obtenção.

Como sugestão para trabalhos futuros, existe a necessidade de analisar a complementaridade entre as principais fontes de energia que irão compor a matriz elétrica no próximo decênio (fonte hidráulica e eólica). Para isso, é importante considerar os potenciais de geração e a sazonalidade de cada uma das fontes.

Além disso, é interessante analisar os efeitos da chamada transição energética no ecossistema e na eficiência energética do país.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Geração. **Acompanhamento da Implantação das Centrais Geradoras de Energia Elétrica.** 2020. Disponível em:

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiaMGYyZWl0NzgtMGRlOC00M2ZjLTljZDYtZTVkYjIjZjZjZDBkIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 07 nov. 2020.

AMARANTE, O. A. *et al.* **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: MME; Rio de Janeiro: Eletrobrás; 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEOLICA). **Boletim Anual de Geração Eólica 2019**. 01 set. 2020. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/?s=boletim>. Acesso em: 09 nov. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA (ABRAGEL). **Certificado de Energia Renovável**. (n.d.). Disponível em: <https://www.abragel.org.br/energia-renovavel/#:~:text=O%20Programa%20de%20Certifica%C3%A7%C3%A3o%20de,alto%20desempenho%20em%20termos%20de>. Acesso em: 07 nov. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental-avaliação do ciclo de vida-princípio e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BANCO DO NORDESTE. Diário Econômico Etene - DEE. **PIB do Nordeste cresce acima da média Nacional**. Ano II. n. 117, 02 dez. 2019. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/documents/1342439/5804193/117_02_12_2019.pdf/8f2ab569-ac5c-4f8a-0521-f9a07aefcc2b. Acesso em: 20 nov. 2020.

BARROS, B.; BORELLI, R.; GEDRA, R. L. **Geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica**. São Paulo: Editora Erica, 2014.

BRASIL. Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica. **Resolução nº 24, 5 de julho de 2001**. Brasília, 6 jul. 2001.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. Diário Oficial da União, Brasília, 1981.

BRASIL. **Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997.** Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo. Diário Oficial da União, Brasília, 1997.

BRASIL. **Lei nº10.438, de 26 de abril de 2002.** Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº 9.648, de 27 de maio de 1998, nº 3.890-A, de 25 de abril de 1961, nº 5.655, de 20 de maio de 1971, nº 5.899, de 5 de julho de 1973, nº 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2002.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). **Com quem se relaciona.** n.d. Disponível em: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/com_quem_se_relaciona?_afLoop=1228871551946&_adf.ctrl-state=16rz2ubl71_1#!%40%40%3F_afLoop%3D1228871551946%26_adf.ctrl-state%3D16rz2ubl71_5. Acesso em: 15 dez. 2020.

CANAL JORNAL DA BIOENERGIA. Produção de energia eólica garante renda e investimentos nas comunidades rurais. *In: Energia Solar e Eólica*, 03 out. 2019. Disponível em: <https://www.canalbioenergia.com.br/producao-de-energia-eolica-garante-renda-e-investimentos-nas-comunidades-rurais/#:~:text=O%20produtor%20descobriu%20depois%20que,terra%20R%24%203.000%20por%20m%C3%AAs>. Acesso em 09 nov. 2020.

CBN. Globo Rádio. **2001: crise do apagão leva governo de FHC a racionar energia.** *In: Boletins. CBN, Rádio Globo.* 05 out. 2016. Disponível em: <https://cbn.globoradio.globo.com/institucional/historia/aniversario/cbn-25-anos/boletins/2016/10/05/2001-CRISE-DO-APAGAO-LEVA-GOVERNO-DE-FHC-A-RACIONAR-ENERGIA.htm>. Acesso em: 03 nov. 2020.

CENÁRIOS EÓLICA. **Legislação e Tributos no Setor Eólico.** 04 dez. 2018. Disponível em: <https://cenarioseolica.editorabrasilenergia.com.br/2018/12/04/legislacao-e-tributos-no-setor-eolico/>. Acesso em: 05 nov. 2020.

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL). **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013**. Rio de Janeiro: CEPEL 2017.

COELHO FILHO, O.; SACCARO JUNIOR; N. L.; LUEDEMANN, G. **A Avaliação do Ciclo de Vida Como Ferramenta para a Formulação de Políticas Públicas no Brasil**. 2016.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CMMAD). Relatório Brundtland: nosso futuro comum. **Fundação Getúlio Vargas**, 1991.

COSTA, R. A. da; CASOTTI, B. P.; AZEVEDO, R. L. S. de. Um Panorama da Indústria de Bens de Capital Relacionados à Energia Eólica. 2009.

CURY, A.; CAOLI, C. PIB do Brasil cai 3,8% em 2015 e tem pior resultado em 25 anos. **G1 – Economia**, 03 mar. 2016. Disponível em: <http://g1.globo.com/economia/noticia/2016/03/pib-do-brasil-cai-38-em-2015.html>. Acesso em: 04 nov. 2020.

CURY, A.; SILVEIRA, D. PIB recua 3,6% em 2016, e Brasil tem pior recessão da história. **G1 – Economia**, 07 mar. 2017. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/pib-brasileiro-recua-36-em-2016-e-tem-pior-recessao-da-historia.ghtml>. Acesso em: 04 nov. 2020.

DE GOUVEIA SOUZA, C. R. A Erosão Costeira e os Desafios da Gestão Costeira no Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 9, n. 1, p. 17–37, 2009.

DE OLIVEIRA, L. D. Os “Limites do Crescimento” 40 anos depois. **Revista Continentes**, n. 1, p. 72-96, 2012.

DUTRA, R. M.; SZKLO, A. S. A Energia Eólica no Brasil: Proinfa e o Novo Modelo do Setor Elétrico. **Anais Do XI Congresso Brasileiro de Energia-CBE**. 2006. p. 842-868.

ELETROBRAS CEPEL. Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (Cresesb). **Atlas Eólico: Espírito Santo**. 2009.

ELETROSUL. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. (n.d). Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/a-camara/estruturaadm/altosestudios/seminarios/energiasrenov/custodio2.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Atlas de Eficiência Energética**. Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2019a.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Consumo anual de energia elétrica por classe (nacional) 1995-2018**. 2019b.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Demanda de Energia. *In: Plano Decenal de Expansão de Energia 2029*. 2019c. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-423/topico-481/02Demandada de Energia.pdf>. Acesso em: 28 out. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Premissas Gerais. *In: EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029*. 2019d. Disponível em: 27 out. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020**: ano base 2019. 2020a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 21 out. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2020**: ano base 2019. 2020b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 09 set. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030. *In: EPE. Cadernos de Estudo do PDE 2030*. 2020c.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Hidreletricidade. *In: EPE. Plano Nacional de Energia 2050*. 2020d. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-523/05.01Hidreletricidade.pdf>. Acesso em: 09 set. 2020.

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Nacional de Energia (PNE) – 2050. 2020e. Disponível em: 07 nov. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Roadmap Eólica Offshore Brasil. 2020f. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-456/Roadmap_Eolica_Offshore_EPE_versao_R2.pdf. Acesso em: 07 nov. 2020.

EPBR. **Equinor licencia parques eólicos offshore com 4 GW no Rio e Espírito Santo**. 19 ago. 2020. Disponível em: <https://epbr.com.br/equinor-licencia-parques-eolicos-offshore-com-4-gw-no-rio-e-espírito-santo/>. Acesso em: 12 nov. 2020.

FERREIRA, M. B. M.; SALLES, A. O. T. Política ambiental brasileira: análise histórico-institucionalista das principais abordagens estratégicas. **Revista de Economia**, v. 43, n. 2, 2017.

FREITAS, M. M. de. Avaliação de Riscos Geológicos no Planejamento Energético Eólico no Rio Grande do Norte, Brasil. **Mercator (Fortaleza)**, v. 15, n. 1, p. 117–129, 2016.

GARCIA, S. Q. Petróleo: Visão Geral e Aspectos Fundamentais nas Relações Internacionais. **Revista Política Hoje**, v. 23, n. 1, p. 129–147, 2015.

GOMES, J. P. P.; VIEIRA, M. M. F. O campo da energia elétrica no Brasil de 1880 a 2002. **Revista de Administração Pública**, v. 43, n. 2, p. 295–321, 2009.

IBAMA. Licenciamento ambiental federal de complexos eólicos *offshore*: Uma agenda positiva da Diretoria de Licenciamento Ambiental do IBAMA. Apresentação de Eduardo Wagner da Silva. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2020. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html?utm_source=portal&utm_medium=popclock&utm_campaign=novo_popclock. Acesso em: out. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). n.d.. Disponível em: <https://www.iso.org/iso-14001-environmental-management.html>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Technology Roadmap - Biofuels for Transport. 2011. Disponível em: www.iea.org

LAGE, E. S.; PROCESSI, L. D. Panorama do setor de energia eólica. 2013.

LESSA, A. C. R.; SANTOS, M. A. dos; MADDOCK, J. E. L.; BEZERRA, C. dos S. Emissions of greenhouse gases in terrestrial areas pre-existing to hydroelectric plant reservoirs in the Amazon: The case of Belo Monte hydroelectric plant. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.51, p. 1728-1736, 2015. DOI 10.1016/j.rser.2015.07.067.

LIMA, C. C.; CARVALHO, L. M. de O. A Produção de Energia Elétrica, a Exaustão Ambiental da Fonte Hídrica e a Opção Proveniente da Base Eólica Renovável. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 1, 2016.

LIMA, J. L. Estado e desenvolvimento do setor elétrico no Brasil: das origens à criação da Eletrobrás. **São Paulo: Instituto de Pesquisas Econômicas**, 1984.

MCCORMICK, J. Rumo ao paraíso: a história do movimento ambientalista. **Rio de Janeiro: Relume-Dumará**, v. 224, 1992.

MEIRELES, A. J. de A. Danos socioambientais originados pelas usinas eólicas nos campos de dunas do Nordeste brasileiro e critérios para definição de alternativas locais. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, n. 11, 2011. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/6970?lang=pt>

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME); EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. Rio de Janeiro, 2018.

NASCIMENTO, C. A. O.; MORO, L. F. L. Petróleo: energia do presente, matéria-prima do futuro?. **Revista USP**, n. 89, p. 90–97, 2011.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Boletim Mensal de Geração

A Energia Eólica no Brasil e os Impactos Socioambientais: Uma revisão

Eólica Setembro/2019. 2019a. Disponível em:
http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Boletim_Eolica-set_2019.pdf

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Critérios para classificação da modalidade de operação de usinas. 2019b. Disponível em:
<http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2026%2FSubm%C3%B3dulo%2026.2%2FSubm%C3%B3dulo%2026.2%202019.08.pdf>

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Evolução Da Capacidade Instalada No Sin - Dez2020/ Dez2024, 2020. Disponível em:
<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>

ORGANIZATION OF THE PETROLEUM EXPORTING COUNTRIES (OPEC). About us. 2020. Disponível em: http://www.opec.org/opec_web/en/17.htm. Acesso em: out. 2020.

PASSOS, F. Sistema de Compensação de Energia Elétrica no Brasil – REN 482:2012. **Microgeração Fotovoltaica**, 27 jul. 2016. Disponível em:
<https://microgeracaofv.wordpress.com/2016/07/27/sistema-de-compensacao-de-energia-eletrica-do-brasil-ren-4822012/>. Acesso em: 07 nov. 2020.

PINTO, L. I. C.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. **Ambiente & Água**, v. 12, n. 6, p. 1082-1100, 2017. DOI 10.4136/1980-993X

PINTO, M. F.; NASCIMENTO, J. L. J. do; BRINGEL, P. C. F.; MEIRELES, A. J. de A. Quando os conflitos socioambientais caracterizam um território. **Gaia Scientia**, v. 8, n. 1, p. 271–288, 2014.

RESOLUÇÃO CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Disponível em:
<http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res97/res23797.html>. Acesso em: 29 out. 2020.

RESOLUÇÃO NORMATIVA nº 673, de 4 de agosto de 2015. Disponível em:
<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015673.pdf>. Acesso em: 29 out. 2020.

RESOLUÇÃO nº 279, de 27 de junho de 2001. Disponível em:

<http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res01/res27901.html>. Acesso em: 30 out. 2020.

SILVA, M. T. da; REBUTINI, V. Z.; MANCINI, F. N. Life Cycle Assessment (LCA) and Wind Power Generation: Application of the Methodology and the Generator to Power System. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 61, n. SPE, 2018.

SILVA, S. T. da. Poluição visual e poluição sonora: aspectos jurídicos. **Revista Informação Legislativa**, v. 40, n. 159, p. 161-179, 2003.

SIMAS, M.; PACCA, S. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. **Estudos Avançados**, v. 27, n. 77, p. 97-116, 2013.

SINGH, A.; OLSEN, S. I.; PANT, D. Importance of life cycle assessment of renewable energy sources. *In: Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources , Green Energy and Technology*. Springer, London, 2013. p. 1-11. DOI 10.1007/978-1-4471-5364-1.

SRD. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas. *In: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL)*. 27 nov. 2015. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/proinfa>. Acesso em: 05 nov. 2020.

TERRIN, K. A. P.; BLANCHET, L. A. Direito de Energia e Sustentabilidade: Uma Análise dos Impactos Negativos das Hidrelétricas no Brasil. **Revista Videre**, v. 11, n. 22, p. 47-63, 2019. DOI 10.30612/videre.v11i22.11215.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira: uma perspectiva. **Novos estudos CEBRAP**, n. 79, p. 47-69, 2007.

WIND ENERGY ASSOCIATION (AWEA). Disponível em: <https://www.awea.org/>.

ZAPAROLLI, D. Ventos promissores a caminho. **Pesquisa Fapesp**, n. 275, p. 78-83, 2019. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/ventos-promissores-a-caminho/#:~:text=O%20potencial%20de%20gera%C3%A7%C3%A3o%20de,atual%20de%20energia%20do%20Brasil>. Acesso em: 05 nov. 2020.

Capítulo 5

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás – PA

Iuri Viana Brandi¹; Marcelo Roberto Barbosa²; Airton Barata³; Rafael Guimarães de Paula⁴; Tomás Corrêa⁵; Adimir Fernando Rezende⁶; Hernani Mota de Lima⁷; Adam Barros Fernandes⁸

RESUMO. Os estudos espeleológicos são imprescindíveis no atendimento aos requisitos legais e à conservação do patrimônio espeleológico em áreas de mineração. Este trabalho apresenta uma nova metodologia que classifica os vãos de cavernas em formações ferríferas quanto a sua suscetibilidade à instabilidade estrutural, denominada Índice Geotécnico de Cavernas (IGC). Este índice foi calibrado ao longo dos últimos 5 anos, via monitoramento de 27 cavernas com autorização de impactos, localizadas nos arredores das minas de ferro N4 e N5 em Carajás, estado do Pará. Desde então, novos modelos preditivos de impactos geotécnicos em cavernas estão em desenvolvimento, integrando as variáveis espeleológicas e sismográficas aos planos de desmonte de rochas, promovendo cada vez mais a sustentabilidade na indústria de mineração.

PALAVRAS-CHAVE. Caverna; Estabilidade; Mineração.

¹Gerente de Espeleologia, Vale S.A., Belo Horizonte, MG (iuri.brandi@vale.com);

²Especialista Técnico, Vale S.A., Belo Horizonte, MG (marcelo.roberto.barbosa@vale.com);

³Geólogo Pleno, Vale S.A., Belo Horizonte, MG (airton.barata@vale.com);

⁴Geólogo Sênior, Vale S.A., Belo Horizonte, MG (rafael.guimaraes@vale.com);

⁵Geólogo Sênior, Vale S.A., Belo Horizonte, MG (tomas.correa@vale.com);

⁶Analista de Meio Ambiente Sênior, Vale S.A., Belo Horizonte, MG (adimir.rezende@vale.com);

⁷Professor da Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Mineração, Campus Morro do Cruzeiro, Bauxita, CEP: 35400-000, Ouro Preto, MG (hernani.lima@ufop.br);

⁸Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Rua Carlos Gomes, 250, CEP: 13083-855, Campinas, SP (adambarrosgeo@gmail.com)

INTRODUÇÃO

As cavidades naturais subterrâneas, ou simplesmente cavernas, são protegidas pela legislação federal brasileira e objeto de inúmeros estudos técnico-científicos requeridos nos processos de licenciamento ambiental que regulamentam a preservação do patrimônio espeleológico brasileiro. Cavernas são abundantes em ambientes de minério de ferro e, por isso, diversas pesquisas têm se intensificado nos últimos anos, promovendo a evolução do conhecimento no campo da geotecnia e tecnologia aplicada a espeleologia, como o caso da aplicação do mapeamento 3D para diagnóstico de zonas de vulnerabilidade geotécnica em cavernas ferríferas (Araújo et al, 2016). Dessa forma, é premente a motivação da indústria de mineração em conhecer bem os mecanismos geotécnicos que regem as questões de estabilidade estrutural das cavernas ferríferas, buscando-se conhecer melhor os mecanismos que regem as deformações geoestruturais e suas correlações com os esforços das atividades de mineração.

Este artigo apresenta desde a metodologia de construção do Índice Geotécnico de Cavernas (IGC), um novo sistema de classificação da suscetibilidade de vãos de cavernas ferríferas à instabilidade estrutural, até a sua aplicação na indústria. São apresentados modelos preditivos de impactos em cavernas situadas próximo a minas em operação e um estudo de caso no qual o método de lavra é otimizado a partir da aplicação direta do IGC.

Este índice seguiu conceitualmente o sistema de classificação geomecânica de maciços de Bieniawski (1989), entretanto, é mais abrangente e voltado exclusivamente para aplicação na espeleologia. O fluxograma de construção do IGC é demonstrado na Figura 1.

O trabalho de pesquisa foi autorizado pelo IBAMA e pelo ICMBio/CECAV, o que permitiu acompanhar as deformações estruturais ocorridas nos vãos das cavidades da amostra ao longo do período de monitoramento entre os anos de 2015 e 2018, até o completo colapso das estruturas, permitindo-se calibrar os parâmetros físicos de análise de estabilidade.

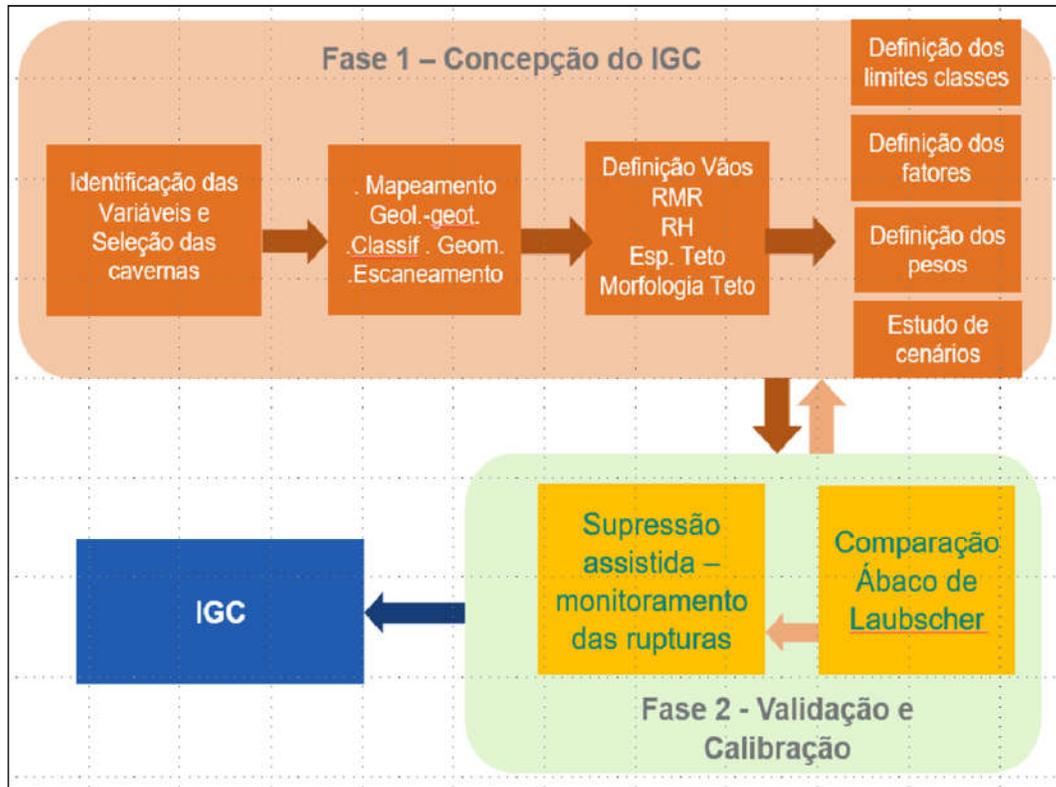


Figura 15. Fluxograma de construção do Índice Geotécnico de Cavernas (IGC).

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no sudeste do estado do Pará, na Serra dos Carajás, nas minas de ferro N4 e N5. A seleção das cavernas foi feita considerando-se a representatividade do ambiente espeleológico da Província Mineral de Carajás, bem como a proximidade com as frentes de lavra (Figura 2). Dessa forma, na construção do IGC, foram considerados 63 vãos de 27 cavernas.

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

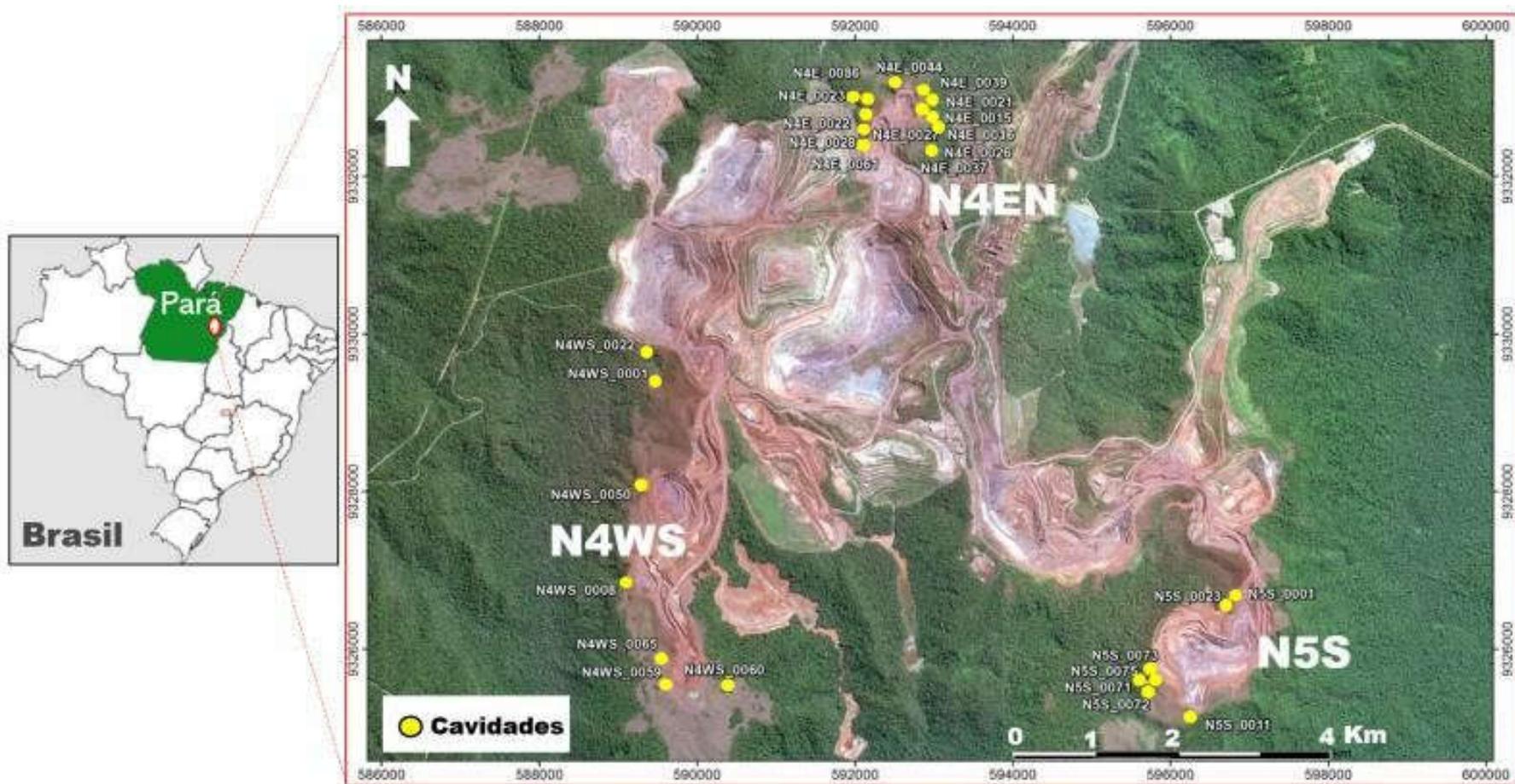


Figura 16. Localização das 27 cavernas da amostra nas minas N4 e N5.

ÍNDICE GEOTÉCNICO DE CAVERNAS (IGC)

O modelo de construção do IGC foi inspirado no conceito de classificação geomecânica de Bieniawski (1989), com o somatório de classes de variáveis ponderadas, cujo resultado indicasse a qualidade do material avaliado. A seleção das variáveis do IGC sustenta-se em disciplinas que perfazem a geotecnia aplicada a espeleologia, na experiência prática dos autores adquirida através dos monitoramentos espeleológicos contínuos, desde o ano 2014, em cavernas situadas nas proximidades de áreas operacionais de minas de ferro no Pará e em Minas Gerais, bem como em fundamentos conceituais da literatura científica.

Rock Mass Rating (RMR)

Para a composição do IGC foram testados três sistemas de classificação geomecânica considerados como os mais apropriados pelas suas abordagens de qualidade de maciço e aplicação em ambientes subterrâneos, como é o caso das cavernas em formações ferríferas da área de estudo. Foram testados os sistemas Q de Barton (1974), RMR de Bieniawski (1989) e o MRMR de Laubsher (1990).

Os testes foram realizados com a aplicação direta dos citados sistemas nas 27 cavernas da amostra, estabelecendo-se uma correlação com a realidade observada nos mapeamentos geoestruturais e monitoramentos geotécnicos. Os resultados apresentaram similaridades, porém o Sistema RMR de Bieniawski (1989) foi percebido como o mais aderente à realidade observada em campo e o que ofereceu melhor praticidade e adaptabilidade para compor o IGC (De Paula et al., 2018).

Raio Hidráulico (RH)

Em termos de suporte efetivo dos vãos, alguns pesquisadores propõem índices e parâmetros na avaliação da estabilidade de espaços subterrâneos. Dentre esses, destacam-se: Largura do Vão ou Span Width, bastante empregado por Barton et al. (1974), e Raio Hidráulico, estudado por Laubscher (1990).

De acordo com a proposta de Laubscher (1990), é sugerida a relação entre o Raio Hidráulico e o seu índice de classificação geomecânica, Mining Rock Mass Rating (MRMR), para análise de auto portabilidade de vãos em minas subterrâneas.

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

Para a composição do IGC, essa variável foi incorporada com 3 classes (Pequeno, Médio e Grande) que representam seus respectivos tamanhos na unidade métrica.

Forma do Teto (FT)

Peck et al. (2013) afirmam que a forma do teto é um fator chave para a avaliação de estabilidade de uma escavação subterrânea, juntamente com as características geológicas e as condições gerais do terreno. Os autores compararam a performance de formas retas (planas) e arqueadas (abobadadas) em escavações rasas, e verificaram que áreas de instabilidade estão normalmente associadas às geometrias planas, salientando que as formas de teto estáveis são similares à configuração pós-ruptura - abóbadas.

Para a composição desta variável, as formas dos tetos de todos os 63 vãos das 27 cavernas do estudo foram analisadas em seções transversais obtidas por escaneamento a laser, confirmadas nos levantamentos de campo e nos perfis dos mapas topográficos. Foram consideradas 3 classes: Abóbada, Planar e Abóbada Invertida.

Espessura do Teto (ET)

Pesquisas específicas sugerem que, em se tratando de escavações rasas, quanto mais próximas à superfície, menor estabilidade essas estruturas apresentam (Carter, 2014). Para a composição desta variável, foi utilizado escaneamento a laser para aquisição dos dados topográficos. Ressalta-se que a International Society for Rock Mechanics (ISRM, 2014) endossa as técnicas de escaneamento a laser na geotecnia.

Cálculo do IGC

Dessa forma, foram inter-relacionadas as quatro variáveis descritas, (1) Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989); (2) Raio Hidráulico (RH); (3) Forma do Teto (FT); e (4) Espessura do Teto (ET), resultando na Equação 1, abaixo:

$$\text{IGC} = \alpha \text{ RMR} + \beta \text{ RH} + \gamma \text{ FT} + \delta \text{ ET (Equação 1), onde:}$$

α RMR = Peso atribuído à classificação Rock Mass Rating (Bieniawski, 1989);

β RH = Peso atribuído ao Raio Hidráulico;

γ FT = Peso atribuído à Forma do Teto;

δ ET = Peso atribuído à Espessura do Teto.

Intervalos de valores das classes das variáveis (tratamento estatístico)

Para se definir com precisão o intervalo de valores das classes das 4 variáveis do IGC, foi aplicado um tratamento estatístico a partir dos dados levantados nos 63 vãos das 27 cavernas do estudo. A Tabela 1 apresenta os resultados dos intervalos para cada uma das 4 variáveis do IGC.

Tabela 1. Intervalos de classe para cada uma das 4 variáveis do IGC.

Rock Mass Rating (RMR)	Raio Hidráulico (RH)	Forma do Teto (FT)	Espessura do Teto (ET)
Muito bom (81 - 100)			
Bom (61-89)	Pequeno (0,0-0,91m)	Abóboda	Grande (0,0-3,31m)
Regular (41-60)	Médio (0,92-1,82m)	Planar	Média (3,32-7,64m)
Ruim (21-40)	Grande (1,83-3,0m)	Abóboda Invertida	Pequena (7,65-10m)
Muito ruim (0-20)			

Legenda: Melhor classe Média classe Pior classe

Ponderação das variáveis – Pesos teóricos

Para fundamentar a proposição dos pesos foram realizadas simulações que objetivaram representar o estado real de estabilidade das estruturas em campo, favorecendo uma primeira análise e classificação geotécnica dos vãos perante os esforços da mineração sobre as cavernas da amostra.

O Sistema IGC foi simulado com os pesos em 4 cenários para os vãos objeto de estudo, conforme apresentado na Tabela 2, cujos resultados foram inseridos e analisados no ábaco de estabilidade de Laubsher (1990).

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

Tabela 2. Distribuição dos pesos para as classes das variáveis IGC nos 4 cenários simulados.

Variável IGC	Classes	Cenário1 (peso proposto)	Cenário 2 (peso proposto)	Cenário 3 (peso proposto)	Cenário 4 (peso proposto)
Rock Mass Rating (RMR)	Muito ruim	0	0	0	0
	Ruim	6,25	12,5	21	21
	Regular	12,5	25	39	39
	Bom	18,75	37,5	54	54
	Muito bom	25	50	60	60
Raio Hidráulico (RH)	Pequeno	25	28	20	25
	Médio	12,5	14	12	15
	Grande	0	0	0	0
Espessura do Teto (ET)	Pequeno	0	0	0	0
	Médio	12,5	2,5	3	3
	Grande	25	5	5	5
Forma do Teto (FT)	Abóbada	25	17	15	10
	Planar	12,5	8,5	9	6
	Abóbada invertida	0	0	0	0

Legenda: Melhor classe Média classe Pior classe

Dessa forma, foi possível inferir as curvas correlatas às 5 classes do IGC, criando-se o ábaco denominado “Laubsher Adaptado”, apresentado na Figura 3.

Com a melhor aderência verificada para um dos cenários avaliados, os pesos propostos para melhor ajustar a correlação efetiva das variáveis que compõem o IGC passaram a ser considerados como pesos teóricos e foram utilizados na continuidade da construção do respectivo índice.

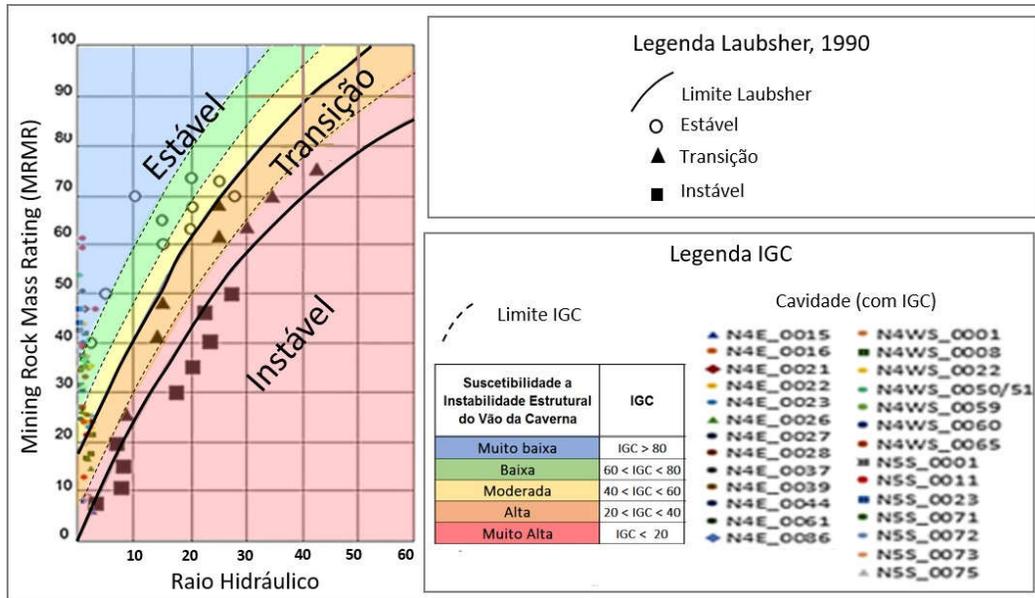


Figura 17. Ábaco de estabilidade de Laubsher adaptado com inferência das curvas das 5 classificações de suscetibilidade à instabilidade do IGC.

Pesos calibrados – ajustes após aplicação direta de campo

Este foi o último processo na construção do IGC, quando partiu-se para a aplicação direta, em campo, da classificação dos vãos, checando se os pesos teóricos definidos até então refletiam coerência com a realidade a partir do esforço da mineração, ou se ainda precisariam ser ajustados.

O mapeamento executado revelou necessidade de ajuste para tornar os pesos mais coerentes com a realidade de campo. A Tabela 3 apresenta a melhor alternativa implementada para os pesos calibrados (linhas em destaque amarelo).

A soma dos pesos das 4 variáveis é definida com o valor máximo igual a 100 (cem), que representa o melhor cenário do vão de muito baixa suscetibilidade à instabilidade estrutural. Por outro lado, o pior cenário é o valor mínimo 0 (zero), indicando muito alta suscetibilidade à instabilidade estrutural. A Tabela 4 traz as cinco classificações criadas para o IGC, segundo níveis de suscetibilidade à instabilidade estrutural dos vãos e seus respectivos intervalos de pesos e cores.

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

Tabela 3. Pesos calibrados do IGC após ajustes nos valores das classes dos pesos teóricos para as variáveis RMR, Espessura e Forma do Teto.

Variável IGC	Classe	Peso IGC (peso teórico)	Peso IGC (peso calibrado)	Variação (%)
Rock Mass Rating (RMR)	Muito ruim	0	0	
	Ruim	21	15	29
	Regular	39	30	23
	Bom	54	45	17
	Muito bom	60	60	
Raio Hidráulico (RH)	Pequeno	25	25	
	Médio	15	15	0
	Grande	0	0	
Espessura do Teto (ET)	Pequeno	0	0	
	Médio	3	2	33
	Grande	5	5	
Forma do Teto (FT)	Abóbada	10	10	
	Planar	6	4	33
	Abóbada invertida	0	0	

Legenda: Melhor Classe Média Classe Pior Classe

Tabela 4. Classes de intervalos de suscetibilidade à instabilidade do IGC.

Suscetibilidade à Instabilidade Estrutural do Vão da Caverna	IGC
Muito Baixa	IGC > 80
Baixa	60 < IGC > 80
Moderada	40 < IGC > 60
Alta	20 < IGC > 40
Muito Alta	IGC < 20

A partir do tratamento dos dados e acompanhamento em campo das deformações assistidas foi possível reconhecer e propor as melhores e piores classes para cada variável. Após a definição dos pesos calibrados, todas as 27 cavernas foram novamente mapeadas e classificadas pelo Sistema IGC, demonstrando uma maior assertividade entre os resultados das classificações e a realidade do campo.

Resultados do IGC e Aplicações no Planejamento de Lavra

Na avaliação da efetividade do sistema de classificação, as 27 cavernas com seus vãos classificados conforme o IGC tiveram acompanhamento de campo contínuo ao longo da pesquisa, associando o estudo geotécnico às operações de lavra, principalmente os desmontes por explosivos, com monitoramento sismográfico e geoestrutural contínuo. Esse monitoramento permitiu medir a efetividade do IGC via observação das alterações físicas dos vãos até o real colapso das estruturas, possibilitando o ajuste dos ponderadores das variáveis para que o índice refletisse o real estado de equilíbrio das estruturas avaliadas. Nessa fase do trabalho foi possível a análise de novos parâmetros técnicos da lavra associados à efetividade do IGC, como as variáveis dos planos de desmonte, por exemplo, permitindo que o IGC, junto a outras variáveis, pudesse também atuar como modelo preditivo de impactos, atingindo um dos objetivos da pesquisa.

Das 27 cavernas estudadas, os resultados obtidos foram:

- 8 cavernas (30%) não apresentaram quaisquer alterações físicas e permaneceram estáveis até sua supressão, realizada no último estágio por meio de operações mecanizadas (trator com escarificador);

- 11 cavernas (40%) ou 16 vãos foram suprimidos e apresentaram colapso direto, ou seja, não mostraram alterações físicas ou quaisquer comprometimentos da estabilidade até o momento do colapso, quando as operações ou estavam bem próximas ou por cima da caverna. Desses 16 vãos, 15 foram acertadamente classificados como de muito baixa a moderada suscetibilidade, ou seja, a eficiência do índice foi de 94%, indicando a efetividade do método na previsibilidade de impactos irreversíveis em cavernas próximas a detonações;

- 8 cavernas (30%) ou 26 vãos apresentaram alterações físicas localizadas. Essas alterações somam um total de 68 registros. Deste total de registros, 76% ocorreram em vãos acertadamente classificados com o IGC de Alta a Muito Alta suscetibilidade a instabilidade estrutural, atestando a confiabilidade e o grau de eficiência do método.

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

A Figura 4 mostra as plantas com a classificação IGC das 8 cavernas que apresentaram alterações físicas, do conjunto de 27 cavernas deste estudo. Os mapas trazem em detalhe a separação dos vãos e os locais de ocorrência das alterações físicas.

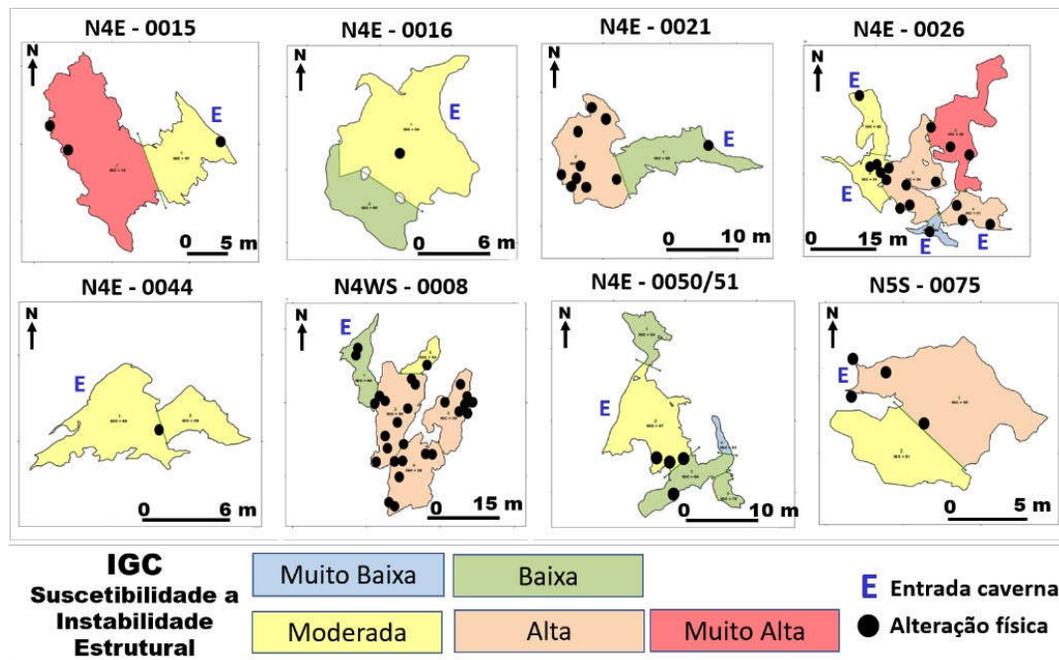


Figura 18. Plantas das cavernas com localização das alterações e respectiva classificação do IGC.

As cavidades apresentadas na Figura 4 se desenvolvem em litologias ferríferas da Formação Carajás (A4cj), que representa parte de um greenstone belt do Domínio Carajás. Nessa unidade estratigráfica estão incluídas formações ferríferas bandadas de fácies óxido com jaspilitos interdigitados e pacotes de metabasaltos e metavulcânicas ácidas, moderadamente a fortemente deformadas, metamorfasadas em fácies subxisto verde a anfíbolito (Justo & Lopes, 2014).

Os altos teores de Fe das litologias da Formação Carajás propiciam a formação de coberturas concrecionárias ferruginosas comumente denominadas “canga”. Esses depósitos de idade cenozóica ocorrem na forma residual quando formados in situ pela lixiviação das bandas de sílica dos jaspilitos ou de outros minerais/constituintes de outras rochas com teor expressivo de Fe; ou se estabelecerem na forma detrítica quando a rocha de origem (rica em Fe) é desagregada, transportada e posteriormente cimentada. Essas coberturas consistem de carapaças de alta rigidez e vêm a constituir de excelentes elementos de sustentação para os vazios subterrâneos. As referidas cavidades ocorrem na região do contato entre a formação

ferrífera e a canga. A descontinuidade que se dá por esse contato brusco representa um ponto de fragilidade estrutural na cavidade. As instabilidades observadas nessas cavernas estão quase sempre associadas a esse contexto.

A relação entre os registros de sismografia com o IGC é uma das formas mais diretas e assertivas de se assegurar que as operações mineiras podem ser adequadas às variáveis espeleológicas que circundam as minas em operação, garantindo uma lavra especializada e segura.

Correlacionando dados de sismografia obtidos ao longo de mais de 10 anos de monitoramento sismográfico, dados de interpretação de acordo com a observação levantada em campo e o Índice Geotécnico de Cavernas de alguns dos 63 vãos da amostra, foi possível desenvolver modelos matemáticos que correlacionam o valor de IGC do vão com a velocidade de vibração de partícula de pico, em mm/s (Figura 5).

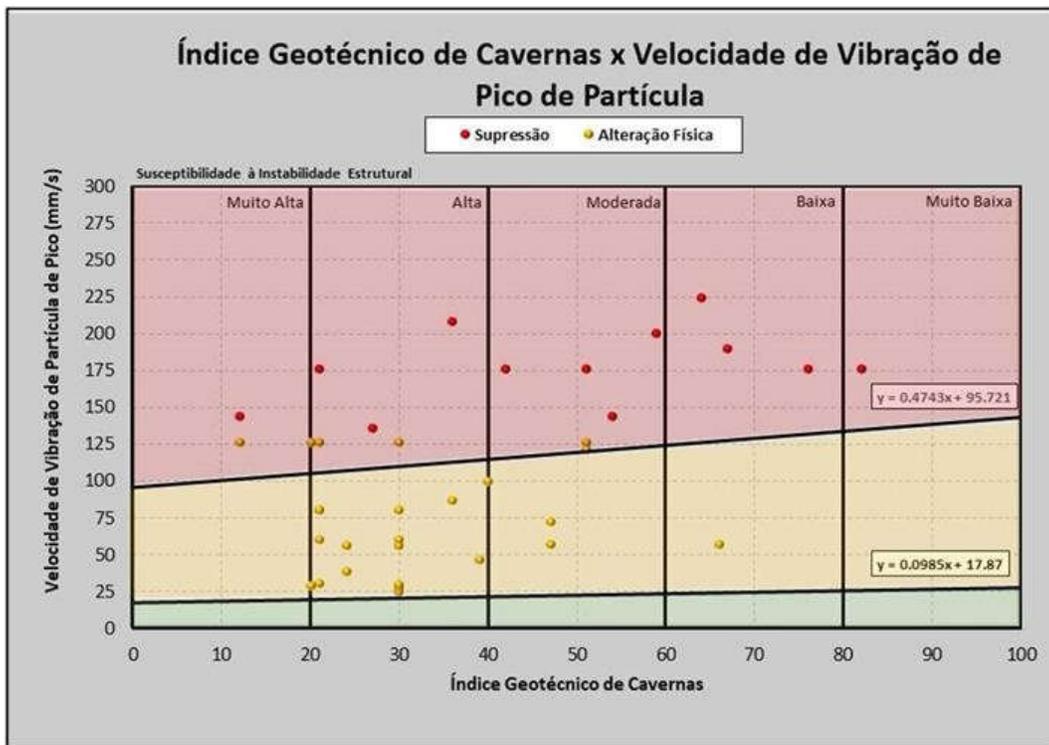


Figura 19. Ábaco de IGC versus Velocidade de Vibração de Partícula de Pico (mm/s).

Os dados em vermelho referem-se a medições de velocidade de vibração de partícula de pico em vãos de cavidades suprimidas por desmontes por explosivos. De forma similar, os pontos em amarelo no gráfico referem-se a dados onde houve alguma alteração física (deslocamentos localizados, abertura de trincas) nos vãos em questão.

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

As duas equações propostas são regressões lineares considerando o erro de 95% de confiança para o limite inferior, uma forma de se aplicar um teor conservador no valor de velocidade de vibração de partícula de pico limite para que não haja colapso do vão (zona vermelha) ou alterações físicas (zona amarela) - a zona verde refere-se à região onde não há instabilidade estrutural no vão da cavidade.

ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DO IGC NO CONTEXTO DE LAVRA

Este estudo de caso foi desenvolvido na porção norte da Mina N4E, Carajás, onde, a partir da autorização do IBAMA para se estudar a definição das áreas de influência de duas cavidades de máxima relevância, diversas pesquisas foram realizadas nos seus entornos (Figura 6).

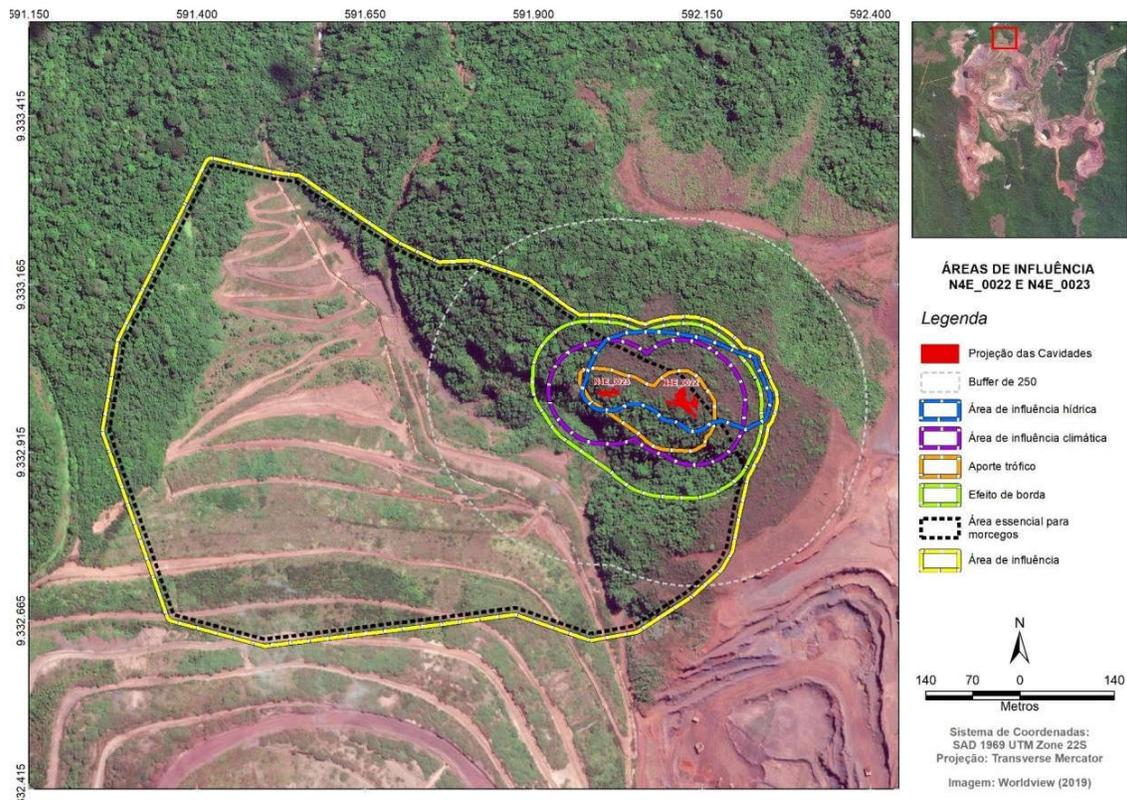


Figura 20. Localização das cavidades N4E_0022 e N4E_0023 na Mina N4E, Serra Norte – Carajás/PA.

Para a cavidade N4E_0022 foram mapeados 06 vãos e para a cavidade N4E_0023 foram mapeados 2 vãos com diferentes valores de IGC, conforme apresentado na Figura 7 e na Figura 8.

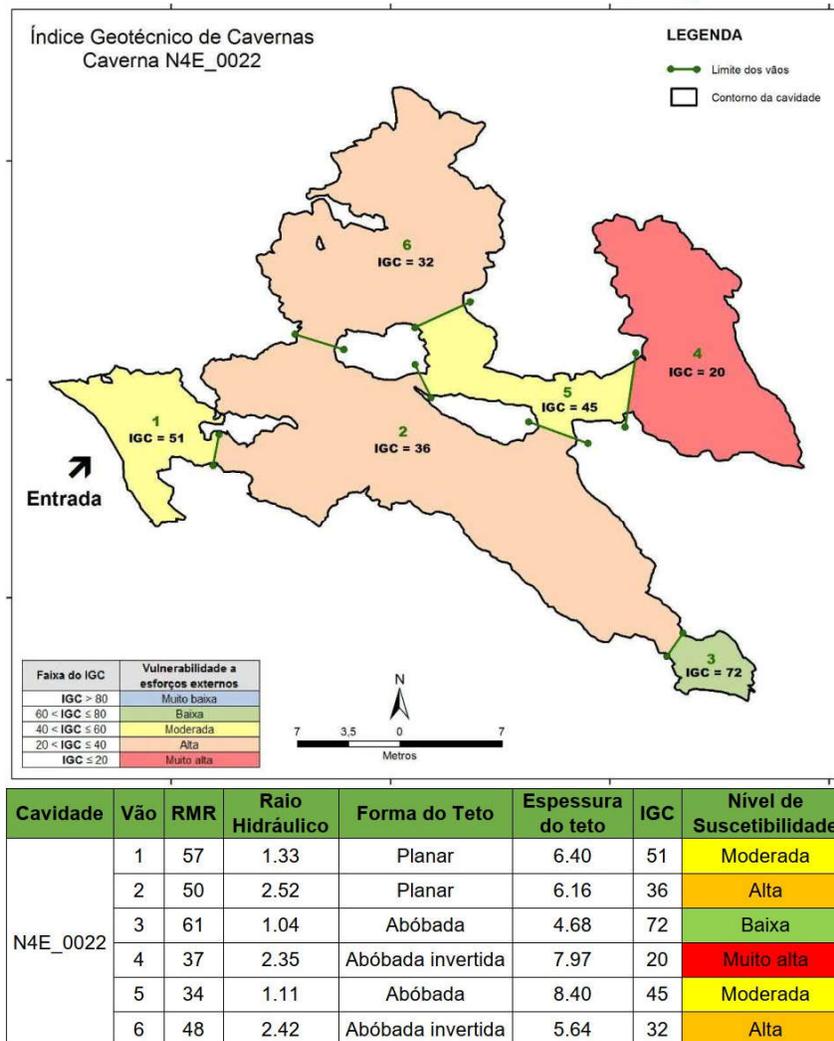


Figura 21. Índice Geotécnico de Cavernas para a cavidade N4E_0022.

IGC versus Velocidade de Vibração de Pico de Partícula

Para estabelecer o limite de velocidade de vibração de pico de partícula (PPV) aplicável à estas cavidades foi utilizada a recomendação do CECAV/ICMBio – Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico: Orientações Básicas à Realização de Estudos Ambientais (2016), que estabelece que a determinação do real critério de segurança de velocidade de vibração de pico de partícula proveniente de desmontes por explosivos para cavidades de máxima relevância pode ser definido a partir de diagnóstico geológico- geotécnico específico.

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

Portanto, foram considerados os valores mais conservadores (IGC mais baixo) de cada cavidade, quais sejam, 20 (Muito alta vulnerabilidade) para a cavidade N4E_0022 e 30 (Alta vulnerabilidade) para a cavidade N4E_0023.

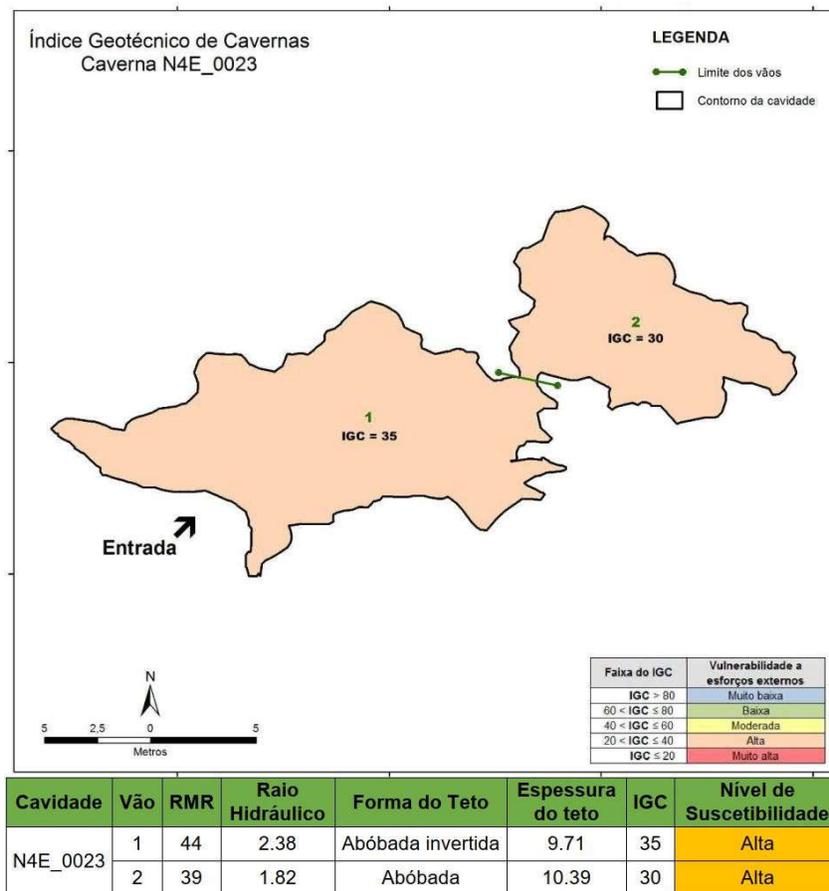


Figura 22. Índice Geotécnico de Cavernas para a cavidade N4E_0023.

Ao realizar a correspondência do valor de IGC definido para as cavidades N4E_0022 e N4E_0023 no ábaco de IGC vs. velocidade de vibração de partícula de pico, obtém-se os valores de 19.84 mm/s e 20.82 mm/s, respectivamente, como limite para que não ocorressem instabilidades estruturais nessas cavernas.

Adicionalmente, de forma a complementar os dados sismográficos, um sistema de monitoramento microsísmico operou de forma contínua na região norte da mina N4E, contemplando a área das cavidades em questão. A Figura 9 apresenta o arranjo e um exemplo de geofone empregados no monitoramento.

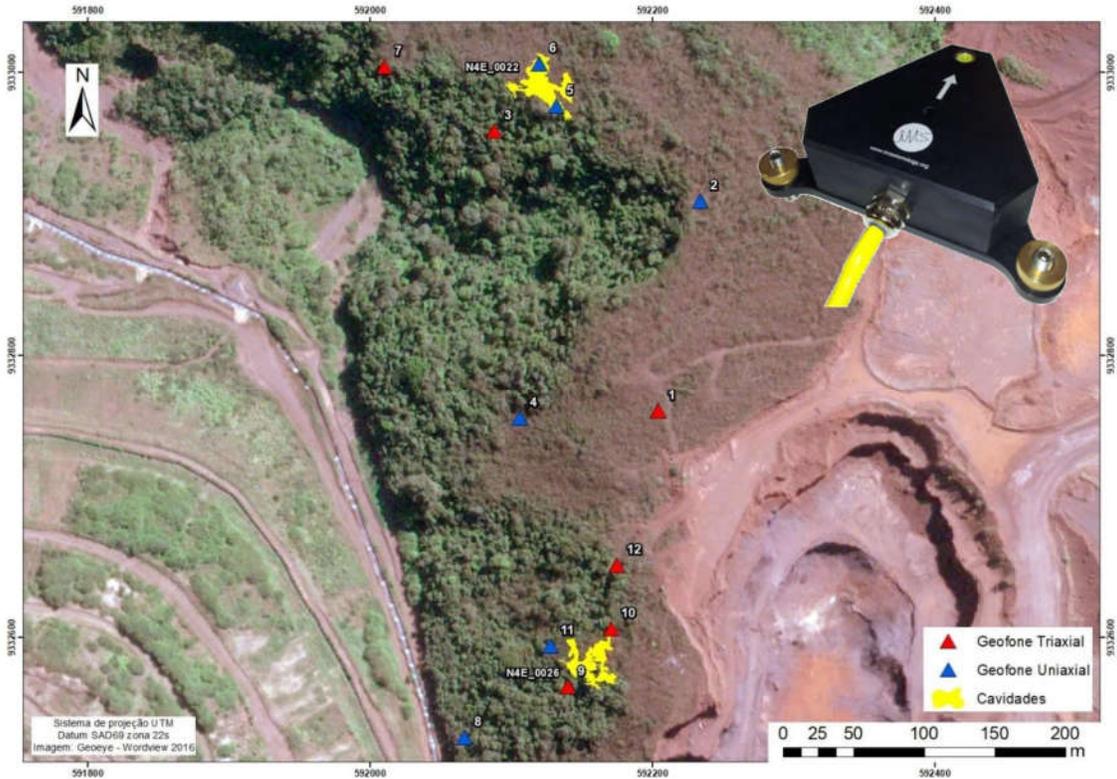


Figura 23. Arranjo microsísmico da porção norte mina N4E e exemplo de geofone empregado no monitoramento.

Durante o período de monitoramento, os geofones que compõem o sistema microsísmico registraram 669 vibrações. As vibrações registradas pelos sensores 2, 3, 5, 6 e 7, próximos às cavidades N4E_0022 e N4E_0023 foram inferiores a 5,37 mm/s, o que condiz com a grande maioria dos registros dos sismógrafos tradicionais. A Tabela 5 apresenta uma síntese dos resultados obtidos pelo monitoramento microsísmico.

Tabela 5. Síntese dos resultados obtidos pelo sistema de monitoramento microsísmico.

	# registros	PGV máximo (mm/s)	PGV médio (mm/s)
Todos os sensores	669	54,231	0,632
Site 1	63	52,882	1,704
Site 2	58	5,365	0,332
Site 3	64	4,716	0,314
Site 4	61	11,354	0,564
Site 5	48	3,029	0,303

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

Site 6	50	2,767	0,291
Site 7	54	2,897	0,313
Site 8	51	5,137	0,207
Site 9	56	12,936	0,462
Site 10	55	54,231	1,202
Site 11	56	10,615	0,291
Site 12	53	51,661	1,436

Planejamento de Lavra e Operação de Mina

Com base nos valores de referência de vibração estabelecidos para as cavidades no entorno da lavra e nas equações de atenuação de vibração, são planejadas as Cargas Máximas por Espera (CME) que deverão ser utilizadas nos desmontes com o uso de explosivos, quando necessários, para todas as cavidades presentes e objeto de monitoramento.

O planejamento de lavra prevê, como proposta alternativa, a utilização do Minerador Contínuo de Superfície, equipamento constituído por um trator sobre esteiras e um tambor giratório acoplado, de acionamento direto ou por corrente, e que possui bits de corte cuja função é fragmentar a rocha (Figura 10).



Figura 24. Minerador Contínuo de Superfície modelo Vermeer 1255D.

GEOLOGIA, AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE

A lavra na região dessas cavidades foi dividida em duas fases, conforme acordado com o órgão ambiental fiscalizador – IBAMA. Na Fase 1 foi determinado o avanço no raio de 300 a 250m de distância da projeção da cavidade, enquanto na Fase 2, de 250 a 200m (Figura 11).

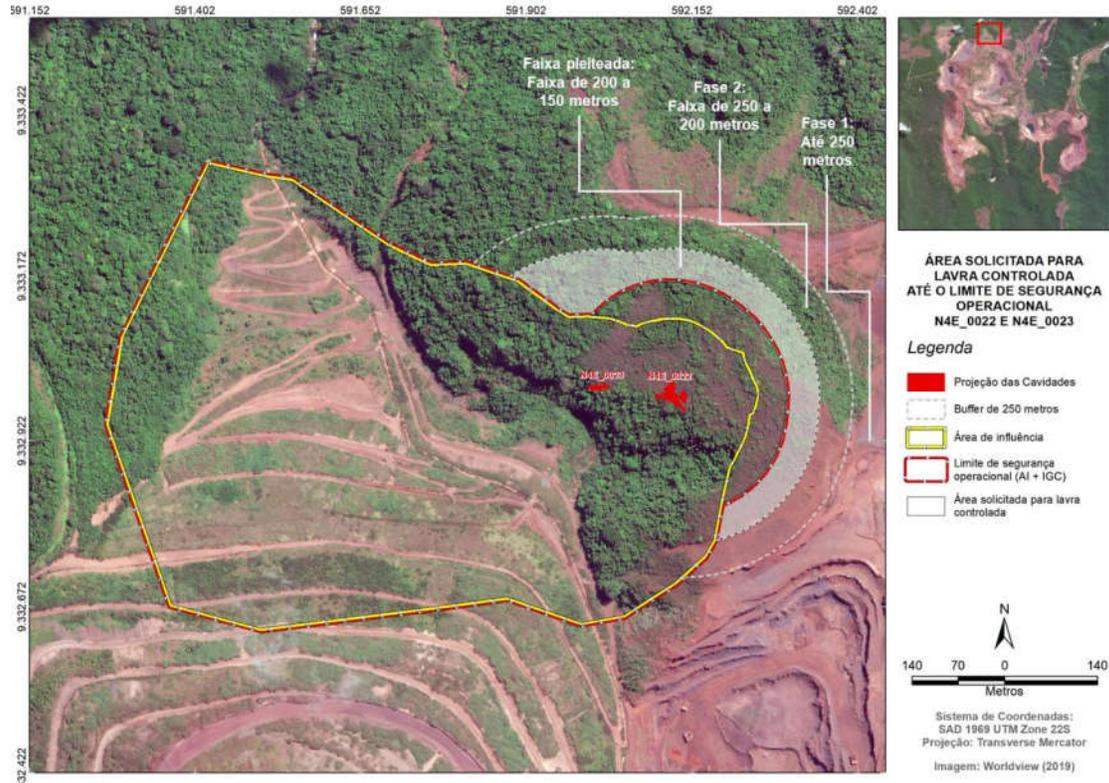


Figura 25. Fases do projeto e localização da cavidade N4E_0022.

Durante a execução do projeto em sua Fase 1, com avanço até 250 metros da cavidade N4E_0022, o monitoramento sismográfico indicou que a operação através do desmorte por explosivos, com as cargas determinadas de acordo com o ábaco calculado, foi efetiva para que as vibrações provenientes da lavra não causassem impacto às cavidades. O maior valor registrado durante o estudo foi de 11,1 mm/s, 57% abaixo do valor máximo recomendado inicialmente. Os registros sismográficos obtidos na cavidade N4E_0022 durante a execução dessa fase são apresentados na Figura 12.

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

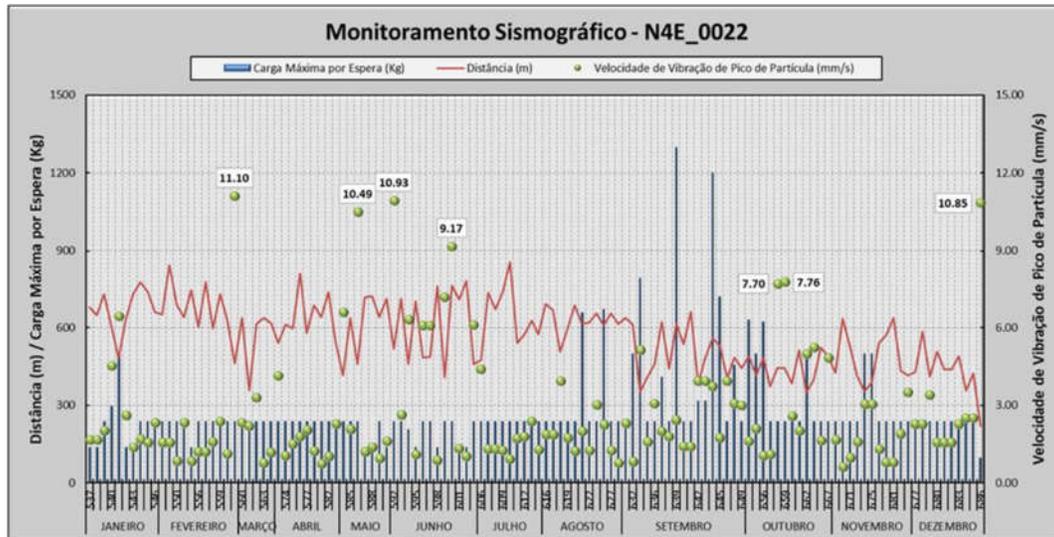


Figura 26. Dados de sismografia obtidos na cavidade N4E_0022 durante a Fase 1.

Ainda que os resultados da lavra controlada indicassem ser possível operar com desmorte por explosivos na execução da Fase 2 do projeto, como medida preventiva, optou-se pela lavra através de um minerador contínuo de superfície, como pode ser visualizado na Figura 13.



Figura 27. Lavra mecanizada dentro do buffer de 250 metros até a faixa de 200 metros das cavidades de máxima relevância N4E_0022 e N4E_0023.

Para a obtenção dos níveis de vibração gerados pelo equipamento, foi executado um monitoramento contínuo de vibrações provenientes da sua operação compreendida nos raios de 250 metros e 200 metros da cavidade N4E_0022. O sismógrafo foi instalado em pontos com distâncias escalonadas em relação à operação do minerador, visando determinar a menor distância para a qual o sismógrafo registra algum nível de vibração. Foram realizadas 249 medições, com distâncias de 10, 20, 30 e 50 metros do equipamento.

Os resultados apontaram que o maior valor de velocidade de vibração de pico de partícula registrado pelos sismógrafos foi de 1,49 mm/s, a uma distância de 15 metros do equipamento em operação. Além dos sismógrafos instalados ao longo da operação do minerador contínuo, havia um sismógrafo instalado no interior da cavidade N4E_0022, distante 200 metros da área. Não houve registro de vibrações relacionadas à operação do equipamento neste aparelho. Esta atividade, que envolveu ainda o uso de caminhões fora de estrada para transporte do material e tratores de esteiras para correções das praças de carga, também não gerou qualquer vibração perceptível no sismógrafo instalado no interior da cavidade N4E_0022.

CONCLUSÃO

A efetividade do IGC como instrumento de previsibilidade de impactos sobre patrimônio espeleológico tem trazido adequações nas operações da engenharia de minas importantes para a viabilidade da mineração em áreas com alta densidade de cavernas. Os resultados apresentados a partir da aplicação do IGC são animadores, visto a eficiência do método em torno de 94% quando avalia-se os vãos classificados com suscetibilidade entre muito baixa a moderada e o baixo registro de deformações nas cavidades submetidas a esforços até a supressão (colapso dos vãos).

Os estudos demonstram a alta estabilidade dos vãos espeleológicos de uma forma geral e que as estruturas mais suscetíveis a deformações estruturais podem ser classificadas com a aplicação da metodologia proposta no IGC, servindo de referência para aprimoramento do método de lavra para as regiões específicas das minas onde as cavernas são geotecnicamente mais frágeis e suscetíveis a deformações em suas estruturas.

O desenvolvimento de modelos de análise de riscos aplicados a espeleologia na indústria mineral é uma tendência atual e tem requerido cada vez mais o aprofundamento das pesquisas tanto da geologia estrutural como das variáveis dos planos de detonação ao entorno de cavernas. A adequação dos métodos de lavra com aplicação de tecnologias diferenciadas, visando a

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

otimização da exploração dos recursos e preservação ambiental são exemplos reais do exercício da sustentabilidade na mineração.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Vale S.A., ao IBAMA, ICMBio/CECAV e à UFOP pela oportunidade de realização dos trabalhos e parceria nos desafios técnicos pertinentes ao desenvolvimento do tema no campo da engenharia aplicada a geociências.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, R. N. **Levantamento de Parâmetros Geomecânicos de uma Caverna Natural Subterrânea Utilizando Tecnologias de Laser Scanner 3D e Realidade Virtual.** Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Pós-graduação em Geotecnia. 130 p., 2016.

ICMBIO - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico: Contribuição Técnica à Análise de Estudos Ambientais / Marcos Pinho. [et al.]** – Brasília: ICMBio, 2016. 47 p.

DE PAULA, A. Q.; PIRES, M. A.; CORREA, T. R.; BRANDI, I. V.; LIMA, H. M. **Natural caves empirical stability assessments application of Laubscher's diagram and Barton's support graph.** In: Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, 2018, Salvador. Anais do Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, 2018.

BARBOSA, M. R., BRAGA, M.A., DA GAMA, M.F., DE PAULA, R.G. BRANDI, I.V., DIAS L.S.O. Electrical resistivity contrasts in the geotechnical assessment of iron caves, N4EN mine, Carajás, Brazil. **Geophysics**, v. 85, n. 1. P. B1-B7, 2020.

BARBOSA, M. R., DA SILVA, A.D., DE PAULA, R.G. DUTRA G.M., BARATA, A. BRANDI, I.V., DA SILVA C.R.P., OSBORNE, R.A. Breakdown mechanisms in iron caves. An example from Brazil. **International Journal of Speleology**, v. 48 (2), 179-190. 2019.

BARTON, N.R., LIEN, R., UNDE, J. **Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics.** Vol. 6(4), p. 189-239, 1974.

BIENIAWISKI, Z. T. **Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering.** John Wiley & Sons, New York, USA, 251p., 1989.

BRANDI, I.V, BARBOSA, M. R., DE PAULA, R.G. ARAUJO, R.N., MOURA, A.S.V., LIMA, H.M. Instrumented geotechnical monitoring of a natural cave in a near mine operation – Towards a sustainable approach to mining and preservation of speleological heritage. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, 2019.

ISRM - International Society of Rock Mechanics. Basic geotechnical description of rock masses. **International Journal of Rock Mechanics.** Min. Sci. & Geom. Abstr., 18: 85- 110. 2014.

LAUBSHER, D. H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 90, n. 10. P. 257-273, 1990.

PECK, W. A., SAINSBURY, D. P., LEE, M. F. The importance of geology and roof shape on the stability of shallow caverns. **Australian Geomechanics Journal**, v. 48, n. 3, p. 1-14, 2013.

Capítulo 6

A rochagem como alternativa para agrossistemas tropicais

Calvin da Silva Candotti¹; Sônia Sena Alfaia¹; Fabricia Benda de Oliveira²; Vanessa Monteiro Pinto³

RESUMO. A agricultura e mineração são as atividades que impactam o meio ambiente, e isso é grave em solos tropicais, naturalmente frágeis e abrigo de muitas populações em vulnerabilidade social e que demandam alimentos de qualidade. A maior parte destes solos tem baixa fertilidade, os manejos tradicionais de regeneração da fertilidade estão se tornando ineficientes, e os fertilizantes industriais, além do poluentes, são ineficazes em garantir a fertilidade a longo prazo pois estão sujeitos, por exemplo, a lixiviação. As técnicas de manejo ecológico dos agrossistemas são mais eficientes para manter a fertilidade do solo a longo prazo, e o uso combinado de matéria orgânica e pós de rocha tem grande potencial ao enriquecer os solos e estimular a biodiversidade. Esse trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão sobre a técnica remineralizadora de solos conhecida como rochagem (uso do pó de rocha), sobre a sua inserção no pensamento agroecológico, a legislação que norteia a prática dessa técnica, as formas para potencializá-la, suas principais vantagens e desvantagens, e o potencial do estado do Amazonas em fornecer material para a prática. Foram consultados artigos científicos, cartilhas, dissertações, teses, leis, decretos, e relatórios de instituições. A rochagem tem grande potencial em recuperar a fertilidade dos solos, tem um princípio que se baseia na utilização de material descartado das atividades de mineração, e é importante para alavancar a produção agrícola orgânica, e por isso, é uma técnica agroecológica. O Amazonas apresenta rochas fornecedoras de poucos nutrientes para o solo. Mais pesquisas serão feitas para aprofundamento no assunto.

PALAVRAS-CHAVE. Agricultura; Sustentabilidade; passivo ambiental;

INTRODUÇÃO

A atividade econômica transforma cenários ecológicos ao utilizar o espaço e recursos naturais, a intensificação desse processo é considerada sinônimo de

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

desenvolvimento, e os setores que mais impactam o meio ambiente são a mineração e a agricultura: i) a mineração tem atuação pontual, transforma o solo e a água, e gera muito rejeito e; ii) a agricultura necessita de extensas áreas ser lucrativa, transformações para adequar a fertilidade, e da monocultura (THEODORO *et al.*, 2006). Isso é problemático em solos tropicais, que são espessos, profundamente intemperizados e sofrem os efeitos da antropofização, e para reverter essa situação, o setor agrícola precisa de alternativas baseadas no uso de recursos disponíveis em locais próximos às produções, sobretudo nas regiões tropicais, onde há pobreza, insegurança alimentar, degradação da terra, e necessidade de desenvolvimento social e ambiental de maneira sustentável (THEODORO *et al.*, 2006; FERNANDES, 2008; LUIZÃO *et al.*, 2009; BURBANO, 2020; THEODORO, 2020). Essas regiões são abrigo de povos que se utilizam de práticas agrícolas tradicionais, porém ecológicas, e que podem garantir a soberania alimentar saudável mundial (ALTIERI, 2012). Mas o que também ocorre em solos tropicais é o aumento da aplicação de insumos químicos para diminuir a acidez e toxidez associada ao Al^{3+} , e aumentar a fertilidade e a capacidade de troca catiônica (BURBANO, 2020). Dessa maneira, práticas e temas de trabalho que envolvam qualidade do solo em ecossistemas tropicais estão aumentando (ARAÚJO *et al.*, 2012).

A principal estratégia é o manejo com aplicação de matéria orgânica (MACHADO, 2001). Mas, embora um dos benefícios da adição de matéria orgânica seja a complexação do Al^{3+} , tornando o solo saudável (BURBANO, 2020), esta e outras práticas tradicionais de regeneração do solo, como uso de cinzas, estão se tornando ineficazes devido à intensificação do uso agrícola, sendo exigido novos métodos para recuperar a fertilidade, pois além disso, a regeneração da qualidade do solo por produtos químicos, embora garanta boas produções no início, é inviável devido aos altos custos, à redução da fertilidade com o tempo, e a contaminação de solos, produção e da água subterrânea (ALMEIDA; RARLISCH, 2006; ALMEIDA; RARLISCH, 2007; THEODORO; 2000; THEODORO *et al.*, 2006; THEODORO, 2020). Ainda, causam eutrofização de águas superficiais, liberam gases para a atmosfera, necessitam de combustíveis fósseis (escassos em alguns países e mal distribuídos pelo planeta) para seu processamento, e tem alto custo de aquisição, o que poderá tornar esse tipo de fertilizantes proibido em alguns países (CARVALHO, 2012), já que causa endividamento dos agricultores, dependência das plantas e artificialização do solo (BURBANO, 2020). No entanto, o uso dessas fontes mais solúveis aumenta a produção agrícola, como a soja e o

milho, e favorece a implantação de monocultivos (BURBANO, 2020), o que dá continuidade à sua aplicação.

Além de danoso ao meio ambiente, o uso de fertilizantes solúveis faz parte de um sistema produtivo que depende de tecnologias, de manejo constante e periódico, terras agricultáveis e insumos para produzir em larga escala, com aporte nutricional para as plantas ao invés de estímulos à fertilidade dos solos (BURBANO, 2020). Os atuais métodos de regeneração da fertilidade inserem no solo tropicais nutrientes que são removidos por lixiviação, erosão, ou que são fixados, tornando-se indisponíveis para as plantas, o que exige reposições para manter a capacidade produtiva dos solos nos sucessivos plantios; mas em manejos ecológicos de agrossistemas, a fertilidade dos solos é assegurada a longo prazo e mantém os processos biológicos que garantem a reciclagem dos nutrientes em formas orgânicas (ALMEIDA; RARLISCH, 2006; ALMEIDA; RARLISCH, 2007). Por exemplo, em manejos com utilização de plantas diferentes, os vegetais de maior porte acessam níveis profundos do solo para se nutrir e devolve ao solo pelas suas folhas e galhos, e também cria-se diversidade de microorganismos que liberam substâncias químicas, criando diferentes ambientes na rizosfera (BURBANO, 2020).

Buscando alternativas

Uma outra alternativa é o uso de pós de rochas moídas, que altera a fertilidade dos solos ao reproduzir o intemperismo, um processo marcado por lixiviação ou concentração dos elementos nutrientes para o desenvolvimento das plantas, e à nutrição, saúde e futuro da humanidade (THEODORO, 2020). É um processo natural, essencial à vida, pois altera os minerais que formam as rochas e permite a liberação de nutrientes, e que é beneficiado em regiões tropicais devido à maior incidência de luminosidade acentuando a fotossíntese e, por consequência, causando intensificação da atividade biológica (BURBANO, 2020). A intensão com o pó de rocha é reproduzir a fração silte de um solo jovem (FERNANDES, 2008). Ao contrário dos fertilizantes solúveis, que em solos tropicais perdem sua capacidade nutricional após o primeiro ano, os pós de rochas fornecem amplo aporte de nutrientes após o segundo ano (THEODORO, 2000). A prática de aplicação de pó de rocha é uma alternativa dos pequenos agricultores em várias regiões do planeta (ALTIERI, 2012), é antiga, mas foi esquecida com o advento dos fertilizantes solúveis (CARVALHO, 2012), embora, sabe-se que as rochas têm elementos químicos que

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

permitem o desenvolvimento de plantas, sendo que diferentes tipos de rochas podem ser substrato para vegetação e produção agrícola exuberante (THEODORO, 2000).

Manejos feitos com pós de rocha e matéria orgânica promovem a revitalização dos solos através da dinamização e aceleração da atividade ecológica que recicla nutrientes, evitando perdas por lixiviação e fixação, e que gera ácidos orgânicos que liberam os elementos nutrientes da rede cristalina dos minerais das rochas (ALMEIDA; RARLISCH, 2006; ALMEIDA; RARLISCH, 2007). Esse processo biogeoquímico de excreta de ácidos orgânicos é realizado por raízes, microorganismos do solo e da rizosfera (CARVALHO, 2012). Isso é importante pois os pós de rocha são considerados pouco eficientes devido à baixa solubilidade no solo quando comparados aos demais fertilizantes (BLASKOWSKI *et al.*, 2016; BLASKOWSKI, 2018), mas essa conclusão surge quando se considera esse insumo substituto dos insumos tradicionais e solúveis, quando na verdade, a utilização dos pós de rocha visa ser um complemento, e experiências com agricultores mostram bons resultados obtidos com essa técnica, contradizendo a ideia de baixa eficiência (ALMEIDA; RARLISCH, 2006; ALMEIDA; RARLISCH, 2007). A “desvantagem” é compensada pela disponibilização multivariada de nutrientes por mais tempo, intensificada pelo intemperismo, atividade de microorganismos e práticas de manejo, e por isso, os pós de rocha são considerados fertilizantes inteligentes ou de baixa solubilização (*slow-release*) (THEODORO, 2020).

Algumas outras situações desfavoráveis à qualificação do uso de pós de rochas (em especial, as silicatadas) está associada à experimentos de curta duração, solos ou substratos estéreis e/ou com baixa biodiversidade, clima temperado ou frio, baixa qualidade do material, granulometria grossa da rocha e a falta de práticas que aumentem a biodiversidade para acelerar a liberação dos nutrientes dos pós de rocha (CARVALHO, 2012). Vale lembrar que a disponibilidade dos nutrientes nas rochas depende da configuração tectônica e do clima: i) em limites divergentes e margens ativas os elementos crustais (silício, alumínio, potássio e sódio) são misturados com material mantélico contendo cálcio, magnésio, ferro, cobre, cobalto, níquel, enxofre, vanádio, cromo, e selênio trazidos de zonas profundas, expelidos por atividade vulcânica e formando terrenos férteis; ii) no interior das placas o intemperismo gera solos lixiviados, empobrecidos e com reduzida diversidade química; iii) o intemperismo químico é importante para a rochagem e depende do tamanho das partículas, permeabilidade, composição, nível do lençol freático, oxigênio, flora, fauna, e intemperismo mecânico; iv) o intemperismo químico é mais intenso na interação entre ar, água, vida e rochas, na

camada de formação do solo; v) em regiões de clima temperado úmido o intemperismo químico aparece na zona superior do solo, e em regiões tropicais com substrato rochoso antigo, com alterações entre estações seca e úmida, o intemperismo origina espessas camadas de lateritos (THEODORO, 2000).

ROCHAGEM

A técnica remineralizadora de solos agrícolas baseada na aplicação do pó de rocha é chamada de rochagem, e consiste na aplicação, com ou sem matéria orgânica, de rochas moídas nos solos para suprir o esgotamento nutricional, sendo que os minerais e rochas que contém os nutrientes utilizados pelas plantas, livres de elementos tóxicos e potencialmente tóxicos, são chamados de agrominerais (THEODORO, 2000; BLASKOWSKI *et al.*, 2016). Os agrominerais são uma opção aos fertilizantes químicos solúveis, que demanda importações, já que a produção brasileira é insuficiente, sendo um país (potência agrícola) dependente de produtos que pesam na balança (BLASKOWSKI *et al.*, 2016; BLASKOWSKI, 2018). A aplicação do pó de rocha atribui aos agricultores benefícios produtivos, sociais e ambientais, sendo considerada tecnologia social de baixo impacto, que rejuvenesce e recondiciona solos empobrecidos pelo uso intensivo (ALMEIDA; RARLISCH, 2006; ALMEIDA; RARLISCH, 2007) ou pelo intemperismo natural, e as rochas moídas devem ter macronutrientes (Ca, K, P e Mg) e micronutrientes (Co, Mb, Va, B, Cu, etc.) em quantidades suficientes para o bom desenvolvimento das plantas (THEODORO *et al.*, 2006). Os nutrientes devem estar alocados em minerais capazes de disponibilizá-los nos solos em tempo compatível com o crescimento das plantas (BLASKOWSKI *et al.*, 2016).

Sobre os macronutrientes: i) são fundamentais para o metabolismo e desenvolvimento das plantas; ii) são absorvidos em maior quantidade; iii) os principais a serem disponibilizados são o fósforo e potássio, obtidos nas rochas; iv) oxigênio, hidrogênio, e carbono são supridos através do ar e da água; v) enxofre, cálcio e magnésio são disponibilizados por fontes minerais; vi) fontes comuns de enxofre são a matéria orgânica e atmosférica via água da chuva; vii) nitrogênio pode ser obtido de produtos petroquímicos (BLASKOWSKI *et al.*, 2016; BLASKOWSKI, 2018; BURBANO, 2020). Os micronutrientes são elementos menos comuns na crosta terrestre, são conhecidos como elementos traços, e a absorção de quantidade pequenas (miligramas a microgramas) é suficiente para desempenhar atividades metabólicas específicas, que variam com a

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

espécie vegetal, e os disponibilizados para o solo através da rochagem são: boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio, zinco, micronutrientes essenciais; e sódio, cobalto, silício, níquel, vanádio, índio e selênio como micronutrientes benéficos (BLASKOWSKI *et al.*, 2016).

Algumas funções dos micronutrientes (BLASKOWSKI *et al.*, 2019): i) atuam na formação dos cloroplastos; ii) são essenciais para a fotossíntese; iii) produzem leg-hemoglobina, que é uma hemoproteína responsável pela fixação de nitrogênio; iv) o cobalto é necessário para a síntese da cobalamina (vitamina B12), que também participa dos passos metabólicos para a formação da leg-hemoglobina, auxilia no crescimento das raízes, e em conjunto com molibdênio, auxiliam na fixação simbiótica de nitrogênio; v) o boro auxilia nas divisões celulares, polinização, formação das paredes celulares, e translocação de açúcar; o cobre auxilia na formação de enzimas, metabolismo e fixação do nitrogênio; vi) o manganês controla a variação do sistema de oxi-redução e formação de oxigênio na fotossíntese; vii) o zinco auxilia na produção de enzimas, hormônios de crescimento, amido e formação de sementes e; viii) o silício aumenta a produtividade e a resistência ao ataque de pragas e doenças, além de reduzir os efeitos do excesso de metais potencialmente tóxicos, do estresse salino e da deficiência hídrica. No entanto, mesmo com tantas possibilidades, o Brasil importa a maior parte da quantidade de fertilizantes necessários aos solos, como o N, P, e K (BLASKOWSKI, 2018; BURBANO, 2020).

Assim, a rochagem é interessante, pois é considerada uma tecnologia que viabiliza a produção agrícola menos dependente de recursos, é livre de agroquímicos, é mais barata, possibilita manutenção e autonomia de pequenos agricultores, garante a segurança alimentar, diminui o uso desmedido de insumos químicos, é assimilada pelos agricultores devido aos princípios e custos da técnica, altera positivamente a fertilidade do solo sem afetar o ambiente, equilibra os agroecossistemas, produz alimentos de melhor qualidade, e alia a mineração e agricultura, haja vista que o excesso de rejeitos pode se transformar em fertilizantes (THEODORO *et al.*, 2006). A rochagem utiliza materiais com características físicas e/ou químicas específicas que favorecem a capacidade agrícola de solos ao corrigir o pH, melhorar a estrutura, aumentar a aeração e drenagem, proteção de cobertura em situações que agrominerais condicionam o solo, capacidade de troca catiônica, e geração de argilas 2:1 para incrementar condições físicas, e nessas condições, são considerados “condicionadores e melhoradores” de solos (BLASKOWSKI *et al.*, 2016; BLASKOWSKI, 2018). Outros desenvolvimentos são: i) aumentar a nutrição do solo; ii) diminuir a necessidade de calagem associada à fertilização; iii) facilitar o uso de

materiais alternativos (remineralização) em conjunto ou não com produtos orgânicos; iv) melhorar o condicionamento de solos ao promover melhorias de suas propriedades físicas, químicas e biológicas (BURBANO, 2020).

A rochagem incorpora princípios da Agroecologia pois prevê sustentabilidade ecológica e socioeconômica da produção ao atender os seguintes aspectos agroecológicos: descentraliza a produção de fertilizantes das grandes empresas; promove uma agricultura de baixo impacto ambiental, minimiza o uso de poluentes químicos na forma de insumos, utiliza práticas conservacionistas do solo, da água e da biodiversidade, intensifica o uso de insumos internos, favorece a ciclagem de nutrientes; resguarda a soberania alimentar, obtém excedentes para a geração de renda e utiliza tecnologias adequadas às realidades específicas, promovendo o controle local dos recursos agrícolas (THEODORO *et al.*, 2006; MEDEIROS *et al.*, 2022). As mudanças promovidas pela rochagem se manifestam na produtividade, nos padrões de fertilidade do solo, no perfilamento, enraizamento, produção de massa verde, desenvolvimento das plantas, ausência de pragas, umidade e opinião dos agricultores (ALMEIDA; RARLISCH, 2006; THEODORO *et al.*, 2006; ALMEIDA; RARLISCH, 2007; CARVALHO, 2012; CORREIA *et al.*, 2012).

Outros benefícios são: i) custos de aquisição são muito menores e seu efeito se estende por longo período (até quatro ou cinco anos como efeito residual); ii) os níveis de fertilidade nos solos são crescentes (oferta de P, K, Ca e Mg) após a aplicação; iii) rendimento comparável ao obtido pela fertilização convencional, ou melhor dependendo do tipo de remineralizador, forma de aplicação, e quantidade de elementos disponíveis; iv) as raízes das plantas são mais desenvolvidas do que nas plantas que recebem adubação química, devido à oferta de multinutrientes, à redução da toxidez de alumínio e correção do pH; v) a umidade é maior nas áreas onde se aplicam os remineralizadores, evidenciando grande capacidade de retenção de água; vi) as plantas tem mais massa verde, são mais exuberantes e apresentam maior perfilamento; vii) sem contaminação ou eutrofização dos recursos hídricos pois os pós de rocha têm solubilidade gradual, ao contrário dos fertilizantes convencionais; e viii) atende aos padrões exigidos para insumos utilizados na agricultura orgânica (BURBANO, 2020).

Rochagem é lucro

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

O principal objetivo da rochagem é equilibrar os nutrientes nos solos agricultáveis pela remineralização e rejuvenescimento direcionados ao aumento da fertilidade, e consequente transformação dos solos em meios sustentavelmente produtivos (THEODORO, 2000). Isso é importante para o Brasil; país situado em região tropical, tem demanda por alimentos, é diverso geologicamente, e produz rejeitos de mineração que podem ser destinados à agricultura na forma de novos produtos de valor econômicos, supressivos da demanda nutricional, e fomentadores da balança comercial (BLASKOWSKI, 2018), desde que atendidas as seguintes condições (THEODORO *et al.*, 2006; THEODORO, 2020):

- i) é preciso conhecer a rocha que se pretende usar, e os testes agrícolas devem considerar as ofertas dos nutrientes nos minerais, e as características físicas e químicas do solo;
- ii) as rochas com excesso de elementos tóxicos devem ser evitadas;
- iii) o material deve ser rico e conter quantidades mínimas de macro-elementos (a presença de micro-elementos também é importante) e livre de contaminantes;
- iv) deve estar disponível na própria região, caso contrário, o custo do transporte inviabiliza sua aplicação;
- v) análises de fertilidade do solo que receberá o material, e das rochas que serão utilizadas para fertilizar, pois assim é possível conhecer as variações da fertilidade do solo ao longo do tempo;
- vi) uso combinado dos pós de rochas com materiais de origem orgânica da compostagem ou da adubação verde; o material de origem mineral e orgânica pode ser incorporado em toda a área de plantios, ou ser distribuído nos sulcos e covas.

Embora tenham diferenças químicas que remetam a sua origem, a maioria das rochas contém macronutrientes e micronutrientes para a nutrição vegetal, e na ausência de determinado elemento essencial e/ou presença de uma rocha rica, como o kamaflugito (BLASKOWSKI *et al.*, 2016; BLASKOWSKI, 2019), sugere-se uma mistura de pós de rochas para disponibilizar os nutrientes necessários e criar um agromineral de maior capacidade agrícola (BLASKOWSKI, 2018), e também, a adição conjunta de compostagem e matéria verde como fonte de nitrogênio (THEODORO *et al.*, 2006). O rejeito da mineração está moído em frações que variam de argila até cascalho, e que estão prontas para uso pois a diversidade granulométrica melhora a permo-porosidade do solo

e garante nutrição por mais tempo, sendo importante considerar que: i) os materiais mais finos disponibilizam os elementos mais rápido, ii) os materiais grosseiros estendem a oferta de nutriente por mais tempo; iii) materiais mais finos aumentam a velocidade de dissolução dos minerais, mas, doses elevadas de material fino de baixa solubilidade alteram negativamente a porosidade do solo, prejudicando o crescimento de raízes (THEODORO *et al.*, 2006; CARVALHO, 2012). É importante ressaltar que quanto mais alta a temperatura de formação de rocha, mais fácil será o seu intemperismo, sendo as rochas mais ricas em nutrientes as que se alteram mais rápido (THEODORO, 2020).

Depois da sua primeira realização, a rochagem pode ser refeita após quatro anos devido à menor solubilidade natural dos minerais, o que é interessante para as plantas, que utilizam os nutrientes em quantidades necessárias, e para o agricultor, que economiza custos com adubação e insumos químicos, tornando-se menos dependente de financiamentos do governo (THEODORO *et al.*, 2006). A prática comum/empírica envolve aplicação de quantidades em torno de 4-7 t/ha, e a maneira correta é feita a partir de estudos sobre os teores de nutrientes, o quimismo do agromineral, o tipo de cultura, tempo de disponibilização, e efeito cumulativo (BLASKOWSKI *et al.*, 2016). Deve-se formalizar parcerias dos setores agrícolas próximos às minerações para que os rejeitos sejam doados ou vendidos a baixo custo, o que geraria renda extra para as mineradoras, minimização das pilhas de descarte, auxílio a pequenos agricultores, e melhoria da reputação da empresa perante à sociedade (THEODORO *et al.*, 2006). Dessa forma, as pesquisas de agrominerais favorecem à exploração mineral na medida em que o material de descarte gera uma fonte de renda adicional para as mineradoras, e destinar esse material para fertilização será uma solução do passivo ambiental da acumulação de resíduos sólidos (BLASKOWSKI, 2018), contribuindo para um desenvolvimento sustentável.

AGROECOLOGIA

A agroecologia soma alternativas em resposta ao acúmulo de problemas ambientais, sociais e de produção, que precisam ser enfrentados com princípios que assegurem a qualidade de vida, a segurança alimentar e a sustentabilidade dos ecossistemas, tratando-se de um ajuste tecnológico no padrão de produção, ou então, como uma transformação radical capaz de alterar bases estruturais e civis (ALTIERI, 2012; BURBANO, 2020). No Brasil, os sistemas agroecológicos contam com um

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

arcabouço legal regulamentado pelo Decreto nº. 7.794, de 20 de agosto de 2012 que instituiu a Política Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica, e de acordo com essa normativa, entre as várias práticas permitidas no condução deste sistema de produção, está o uso de insumos alternativos, por exemplo, os remineralizadores de solo (BRASIL, 2012; BURBANO, 2020). A agroecologia é o conjunto de saberes que incorpora princípios ecológicos, valores culturais e conhecimentos antropológicos, econômicos e tecnológicos na dinâmica dos agrossistemas, e a rochagem adere aos princípios dessa ciência, pois representa uma base de conhecimento tradicional que se alia aos métodos científicos das seguintes maneiras (THEODORO, 2020):

- 1) O entendimento das análises multidimensionais – econômica, social, ambiental, cultural, política e ética;
- 2) A integração de saberes;
- 3) O manejo e redesenho de agroecossistemas sustentáveis;
- 4) A incorporação do enfoque holístico e transdisciplinar na produção alimentar;
- 5) A compatibilização de conhecimentos empíricos e científicos;
- 6) A aglutinação e multiplicação de experiências bem-sucedidas de vários atores sociais;
- 7) As inovações tecnológicas alternativas;
- 8) O uso de novas abordagens e entendimentos;
- 9) O trabalho sob o enfoque de metodologias participativas;
- 10) A construção de pontes e interrelações (novas conexões);
- 11) O entendimento das limitações dos agroecossistemas, onde as interações ecológicas e os sinergismos entre componentes biológicos criem, eles próprios, a fertilidade do solo, a produtividade e a proteção de culturas;
- 12) O entendimento das adaptações bem-sucedidas capazes de permanecer com o passar das gerações

Alguns dos principais efeitos e benefícios das práticas agroecológicas: i) cobertura vegetal para proteger o solo; ii) sustentabilidade da produção e variedade constante de alimentos; iii) contribuição para a conservação do solo e dos recursos hídricos; iv) intensificação do controle biológico fitossanitário; e v) intensificação do uso múltiplo do território (BURBANO, 2020). A agroecologia estuda os sistemas agroalimentares para desenvolvê-los de forma sustentável, com resiliência ecológica, ciclagem de nutrientes, viabilidade econômica, justiça social, e as transformações sociais e ecológicas envolvidas

para otimizar a produção e venda de alimentos de qualidade, produzidos por técnicas tradicionais e sustentáveis de manejo de agroecossistemas (ALTIERI, 2012; MEDEIROS *et al.*, 2022). É uma proposta científica e política que questiona o modelo de produção nos atuais sistemas agroalimentares, sendo inseparável da prática agrícola, movimento social e político, pois é capaz de desenvolver um sistema agroalimentar soberano, com segurança nacional e justiça social em um país, usando como base, o diálogo entre o saber popular e o conhecimento científico (GLIESMMAN, 2000; MEDEIROS *et al.*, 2022).

O pesquisador deve se integrar nas relações comunitárias locais, entender como surgiu o saber agroecológico nesses lugares, e como culminou nos sistemas agroalimentares sustentáveis, e para isso, usa métodos sensíveis ao contexto ecológico e humano para compreender os seguintes aspectos do sistema agroalimentar: produção de alimentos, renda, acesso a mercados, qualidades dos produtos, saúde social, qualidade de vida, respeito aos direitos humanos, relações entre seres humanos, sustentabilidade econômica e conservação da biodiversidade, solo e água, e fornecimento da autonomia e da cultura dos territórios (CORREIA *et al.*, 2013). A pesquisa envolvendo o diálogo de saberes auxilia na resolução de problemas ambientais da agricultura atual, como a contaminação de solos e da água por agrotóxicos e fertilizantes solúveis, e das questões econômicas envolvidas, já que o Brasil depende da importação de grande parte dos fertilizantes, que têm preços dependentes do mercado internacional (MEDEIROS *et al.*, 2022). Essa situação exige alternativas mais sustentáveis, acessíveis localmente e financeiramente viáveis, e por isso a rochagem surge como uma boa proposta.

LEIS SOBRE REMINERALIZADORES DO SOLO

O uso dos remineralizadores é regulamentado pela Lei nº 12.890 de 10 de Dezembro de 2013, que altera a Lei nº 6.894 de 16 de Dezembro de 1980, e passa a incluir o remineralizador como uma categoria de insumos destinado à agricultura no Brasil (BRASIL, 2013; BLASKOWSKI *et al.*, 2016; THEODORO, 2020). O decreto nº 8.384, de 29 de Dezembro de 2014 (Decreto-Lei dos fertilizantes), informa que remineralizador é todo material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho de partícula por processos mecânicos e que, aplicado ao solo, altere os seus índices de fertilidade por meio de adição de macronutrientes e micronutrientes para as plantas, e promova a melhoria de propriedades físicas, físico-químicas ou da atividade biológica do solo (BRASIL, 2014).

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

O pó de rocha é um insumo que auxilia na regeneração bioquímica do solo, sendo permitido pela legislação que regula a agricultura orgânica, conforme a Lei nº 10.831 de 2003 (BRASIL, 2003; MEDEIROS *et al.*, 2022). A Instrução Normativa IN 05/2016, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, passou a incluir as rochas silicáticas, que contém a maioria dos nutrientes necessários às plantas (CARVALHO, 2012), como “Remineralizadores de Solos” e apresentou parâmetros e formas de apresentação comercial dos produtos, bem como estimula a prioridade em procurar novos insumos (MAPA, 2016; BLASKOWSKI, 2018; BLASKOWSKI *et al.*, 2019; THEODORO, 2020):

- 1) Esta instrução normativa estabelece especificações, garantias mínimas e tolerâncias para os produtos remineralizadores de solos;
 - a) A soma de bases (CaO+MgO+K₂O) deve ser $\geq 9\%$ em peso/peso com tolerância de deficiência de até 10% deste valor ou até 1, 5 unidades, o que for menor; a presença de no mínimo 1% peso/peso de K₂O é obrigatória;
 - b) Os micronutrientes devem apresentar os seguintes teores mínimos: P > 1%; Cl, Fe, Mn e Zn (>0,1%); B e Se (>0,03%); Cu e Si (>0,05%); e Co, Mo e Ni (0,005%);
 - c) Existem apenas valores mínimos tabelados (não restritivos) para alguns elementos (macronutriente fósforo e outros micronutrientes) que puderam ser inseridos nos rótulos dos produtos. Se declarados, podem variar em até 25% a menos do volume declarado;
 - d) Os nutrientes garantidos no rótulo do produto podem variar em até 25% para menos, em volume com relação ao valor declarado;
 - e) O conteúdo de SiO₂ (quartzo) deve ser obrigatoriamente inferior a 25% em volume do produto. O valor pode, contudo, variar no produto em até 20% a mais do declarado, desde que dentro dos limites máximos;
 - f) Os limites para Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) devem ser inferiores aos valores normatizados (Arsênio – 15ppm, Cádmio – 10ppm, Mercúrio – 0,1ppm e Chumbo – 200ppm), com tolerância para excesso aceitável em $\pm 25\%$ do valor limite na legislação;
 - g) O Potencial Hidrogeniônico (pH) de abrasão será declarado pelo registrante. Este valor terá tolerância de ± 1 .

O remineralizador de solo, é o material rochoso, que aplicado de forma moída a solos agrícolas, recompõe a fração de minerais intemperizáveis portadores de nutrientes

importantes para as plantas, tais como os macronutrientes (P, K, Ca, Mg e S), micronutrientes essenciais (B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn) e micronutrientes benéficos (Na, Co, Ni, Se e Si), recondicionando os solos para a produção (Blaskowski, 2018). As condições físico-químicas de formação e alteração dos minerais influenciam a liberação e fixação de nutrientes, as propriedades reativas corrigem a acidez, e alguns minerais agem na estrutura do solo (retenção de água e aeração) (BLASKOWSKI *et al.*, 2019). Os remineralizadores têm potencial de remineralizar os solos, melhorando a reserva nutricional e favorecendo o reequilíbrio do pH do solo, tornando-se uma alternativa viável em termos ecológicos, econômicos, sociais e de desenvolvimento local/regional: i) os nutrientes presentes nos pós de rocha são liberados gradualmente, reduzindo a lixiviação e favorecendo ação de longo prazo; ii) são subprodutos da exploração mineral que poderão gerar renda extra; iii) podem diminuir a dependência de fertilizantes importados; iv) deve-se usar material geológico disponível localmente e de fácil acesso pelos agricultores (MEDEIROS *et al.*, 2022).

POTENCIALIZANDO OS EFEITOS DA ROCHAGEM NO SOLO

As rochas mais férteis são as de origem vulcânica, como os basaltos, amplamente testados e com maiores possibilidade de fornecer nutrientes (Ca, Mg, Si, K e P) para o solo; as rochas metamórficas que sofreram hidrotermalismo com acúmulo de fósforo e cálcio; as rochas sedimentares fosfáticas também são interessantes para a remineralização de solo, sendo que a velocidade de disponibilização de nutrientes é vencida mediante a adoção de alguns mecanismos, por exemplo: i) uso de bactérias inoculantes e fixadoras de nitrogênio; ii) o uso de material orgânico compostado com a rocha e; iii) a adubação verde incorporada ao solo junto com os pós de rocha (THEODORO, 2020). O uso de plantas em sistema de rotação, sucessão ou consorciação para enriquecimento do solo com material orgânico, melhora as condições para a cultura principal, e amplia a atuação dos microorganismos no solo e geração de ácidos orgânicos que influenciam no pH e alteração dos pós de rocha (BURBANO, 2020).

Minerais de rochas máficas são mais susceptíveis à dissolução por ácidos orgânicos do que os minerais das rochas félsicas, mas é importante lembrar que a compostagem, vermicompostagem e biofertilizantes vai acelerar o intemperismo pois atenuam processos de aquisição de nutrientes pela microbiota, e as altas temperaturas aceleram a dissolução dos minerais; porém, deve-se manejar o solo devidamente, de

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

forma que potencialize a capacidade solubilizadora realizada pela biodiversidade, que vai agir da seguinte maneira: i) a biodiversidade altera o ambiente da rizosfera, promovendo mudanças no potencial eletroquímico, aumento na concentração de ácidos e quelantes orgânicos devido à liberação de H^+ , OH^- , e HCO^- das raízes durante a respiração e absorção de íons pelas células, elevando assim, a taxa de dissolução dos minerais e; ii) os fungos são mais eficientes do que as bactérias pois têm capacidade de colonização simultânea de vários ambientes, sendo as micorrizas e os líquens os mais vantajosos em decorrência da sua maior abundância na biomassa em ecossistemas agrícolas, contribuindo com larga contribuição de CO_2 para o solo, gerando ácido carbônico e reduzindo o pH (CARVALHO, 2012).

VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ROCHAGEM

A seguir, são resumidas as vantagens e desvantagens da rochagem (THEODORO, 2020):

A) Vantagens da rochagem

- 1) Os custos de aquisição dos pós de rocha são menores e seu efeito se estende por até 4 ou 5 anos consecutivos devido à disponibilização lenta dos nutrientes;
- 2) A produtividade mostra-se equivalente ou superior à obtida pela fertilização convencional – até 30% maior em culturas de ciclo longo;
- 3) O teor de umidade é maior nas áreas onde se aplica pó de rocha, o que mostra que os argilominerais presentes nas rochas (formados pelo intemperismo) possuem grande capacidade de retenção de água;
- 4) As raízes das plantas apresentam-se em maior quantidade e mais desenvolvidas do que as de plantas que recebem adubação convencional;
- 5) As culturas de ciclo longo (cana-de-açúcar e mandioca) e espécies florestais apresentam melhor desempenho pois se utilizam por mais tempo dos nutrientes disponibilizados na medida da necessidade das plantas;
- 6) As culturas de ciclo curto (milho e arroz) apresentam resultados com produção semelhante ou levemente superior quando comparadas à adubação química;
- 7) As plantas mostram maior quantidade de massa verde, são mais exuberantes e apresentam maior perfilhamento;
- 8) Pós de rocha são materiais disponíveis local ou regionalmente, o que facilita muitas vezes o transporte e manejo;

GEOLOGIA, AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE

- 9) A remineralização do solo possibilita o sequestro de dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera por meio de reações de carbonatação, favorecendo alternativas que inibem as mudanças climáticas;
- 10) A associação de pós de rocha com composto orgânico e/ou adubação verde (fonte de hidrogênio) mostra-se fundamental para o desenvolvimento das plantas, evidenciando que a associação das fertilizações organominerais suprem as necessidades de nutrientes das plantas.

B) Desvantagens da rochagem

- 1) A solubilidade e disponibilidade dos nutrientes é mais lenta e, portanto, os resultados poderão demorar um pouco mais para serem percebidos;
- 2) O custo de transporte do material pode inibir o uso em função do preço dos combustíveis e das distâncias;
- 3) A inexistência de crédito com a finalidade específica para aquisição de pó de rocha pode limitar a adoção da técnica;
- 4) Ainda percebe-se ausência de políticas públicas, ou de uma política nacional que incentivem o uso de remineralizadores de solo para a agricultura.

AGROMINERAIS NO ESTADO DO AMAZONAS E ROCHAS PORTADORAS

Fontes de Ca, K, P, Mg e C no Amazonas e tipos de ambientes favoráveis

O estado do Amazonas possui fontes para agrominerais nas sequências de rochas de idade do paleozóico inferior e superior das bacias sedimentares, em intrusões ígneas Mesozóicas que penetraram o embasamento proterozóico, e em sedimentos cenozóicos, e a seguir, é apresentada a relação entre a fonte de insumo e o tipo de ambiente favorável para sua presença (RIKER, 2001; SILVA *et al.*, 2003; REIS *et al.*, 2006; MATOS; MELLO, [2010-2023]):

AGROMINERAIS ASSOCIADOS ÀS SEQUÊNCIAS DO PALEOZÓICO INFERIOR: Ocorrem em domínio marcados por rochas sedimentares dispostas em camadas de diferentes espessuras empilhadas horizontalmente e sub-horizontalmente, pouco dobradas e metamorfizadas, compostas de sedimentos clastoquímicos de várias composições, depositadas em diferentes ambientes tectonodeposicionais associados ao desenvolvimento da Bacia do Tapajós; e a faciologia representante do agromineral são

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

as espessas e extensas camadas de rochas calcárias com intercalações subordinadas de sedimentos siltico-argilosos e arenosos, onde é possível encontrar recursos como calcário dolomítico e fosfato em rochas sedimentares. O calcário pode ser encontrado nas rochas carbonáticas das Formações Navalha e Terra Preta que afloram em faixas de calcário dolomítico intercalado por arenito e siltito; enquanto que o fosfato está nos arenitos da Formação Beneficente, e ocorre como partículas esféricas e ovóides de colofano, com teores de 0, 1 a 10%; o fosfato também pode ocorrer associado à níveis de carbonatos da Formação Beneficente.

AGROMINERAIS ASSOCIADOS ÀS SEQUÊNCIAS DO PALEOZÓICO SUPERIOR: Associam-se às coberturas sedimentares e vulcanossedimentares consolidadas mesoóicas e paleozóicas, associadas a grandes e profundas bacias sedimentares do tipo sinéclise, preenchidas por espessos e extensos pacotes de camadas horizontalizadas de sedimentos associados à Bacia do Amazonas, Solimões e Acre; e as faciologias representantes dos depósitos são: espessos pacotes com predomínio de sedimentos siltico-argilosos e rochas calcárias, camadas de evaporitos e calcários com intercalações irregulares de sedimentos siltico-arenosos; e espessas camadas de rochas calcárias intercaladas com finas camadas de sedimentos siltico-argilosos. Os recursos são: calcário calcítico/magnesiano da Formação Itaituba, e gipsita e silvinita da Formação Nova Olinda.

AGROMINERAIS EM ROCHAS IGNEAS MESOZÓICAS: Ocorrem no domínio geológico das suítes intrusivas alcalino-carbonáticas da Suíte Alcalinas Seis Lagos que intrudem gnaisses do Domínio Imeri da Província Rio Negro; e a faciologia é determinada pela favorabilidade para fosfato. Essas rochas distribuem-se em três estruturas circulares capeadas por canga lalerítica ferruginosa; possui relevo pseudo-cárstico; elevados teores de terras raras, nióbio, zircônio, vanádio e berílio; idades mesozóicas são associados aos corpos alcalinos Catrimani e Apiaú no Estado de Roraima.

TURFAS CENOZÓICAS: Ocorrem como pequenas lentes, com espessura média de aproximadamente 2 metros, intercaladas com siltes, argilas e areias; relacionadas à cobertura Cenozóica das bacias do Amazonas, Acre e Solimões.

CONCLUSÕES

A produção de alimentos é necessária, será contínua e considerar formas sustentáveis de realizá-la vai garantir um futuro melhor para a humanidade. É necessário, pois o modelo de produção agrícola atual é intenso, demanda extensas áreas, e utiliza insumos solúveis, que a longo prazo, atestam ser ineficazes e tóxicos para o meio ambiente. Essa forma de usar o solo tem comprometido a sua capacidade de revitalização promovida por práticas tradicionais de fertilização. Além do mais, o uso dos insumos promove consequências desastrosas para a vida financeira e alimentar dos agricultores, e embora alguns se utilizem do manejo da biodiversidade para estimular a produção, sempre serão necessárias mais tecnologias para a produção de alimentos para uma população mundial que aumenta cada vez mais. Os pós de rocha são uma alternativa viável, principalmente quando combinados com matéria orgânica, pois juntos dinamizam a biodiversidade do solo, que regula os níveis de pH, aumentando ou diminuindo o potencial de solubilização do material moído. Dessa forma, são fertilizantes inteligentes de solubilização lenta e, em complementação, controlada.

Os experimentos sobre o potencial do uso dos pós de rocha devem considerar o efeito à longo prazo, e à condições de aplicação da técnica, como a aplicação com matéria orgânica, pois a maioria dos materiais geológicos contém os elementos nutrientes para as plantas, o que precisa se fazer é acelerar a liberação desses elementos das rochas. Alguns pós de rochas podem se portar como agrominerais fornecedores da maioria dos macronutrientes e micronutrientes indispensáveis ao desenvolvimento dos seres vivos e de alimentos de melhor qualidade. Assim, a rochagem é interessante, pois é considerada uma tecnologia que viabiliza a produção agrícola menos dependente de recursos e mais promissora em termos de produção, haja vista que otimiza as características químicas, físicas e biológicas do solo, que são fatores diretamente relacionados ao desenvolvimento das plantas e produção de alimentos.

Porém, ainda que o dinamismo ecológico, a sustentabilidade e as mudanças promovidas pela rochagem assegurem-na como uma técnica agroecológica, e economicamente rentável (agricultor e minerador), antes da sua prática, devem ser conhecidos os materiais que serão utilizados e o substrato onde serão aplicados. Estabelecer leis, decretos e diretrizes que assegurem limites e condições de uso dos pós de rocha como remineralizadores é uma forma de validar o valor desse insumo e garantir que o seu uso seja feito de forma segura. Um fator importante e que deve ser considerado relevante pela legislação e agricultores, é considerar que, talvez, sempre será necessário a aplicação com matéria orgânica para se obter os melhores resultados. Nesse sentido, os

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

experimentos, instruções e técnicas de cultivo agroecológicas poderiam se aproveitar mais dos fungos micorrizicos, são mais eficientes do que as bactérias no processo de alteração do ambiente da rizosfera. Adicionalmente, algumas maneiras de superar as desvantagens da rochagem seriam: dinamizar a biodiversidade, transporte de material realizado por instituições do governo (exército), maior incentivo das instituições de créditos e um maior incentivo, por parte do governo, ao uso dos remineralizadores

O estado do Amazonas apresenta variedade de rochas portadoras de agrominerais que podem ser utilizados para rochagem. Porém, a maioria delas, com exceção dos carbonatitos, tem uma oferta quase “monoelementar” pois fornecem apenas um ou dois elementos importantes para as plantas. No entanto, a busca por fontes de remineralizadores deve ser incessante, e novas ações serão realizadas para elucidar os seguintes aspectos: i) problemas envolvendo o modelo atual de produção de alimentos, sobretudo nos solos tropicais, as alternativas adotadas, e o papel da rochagem nesses contextos; ii) significados de rochas, intemperismo, sedimentos, solos e fertilidade das plantas; iii) aprofundamento sobre a rochagem, buscando apontar primeiras experiências, princípios, e o que são e qual é a importância dos macronutrientes e micronutrientes das rochas para as plantas, alimentos e seres humanos; iv) a agroecologia e o pensamento ecológico que norteia a rochagem; v) principais leis, decretos e normas que estipulam os meios legais para aplicação da rochagem; vi) as principais rochas utilizadas para rochagem; vii) os principais métodos para se qualificar rochas como portadoras de agrominerais; viii) os principais tipos de manejo que podem potencializar a dissolução dos pós de rocha; xi) o estado do Amazonas, abordando clima, relevo, vegetação, aspectos sociais e econômicos, geografia, geomorfologia, geologia, recursos minerais disponíveis e atividades minerais;

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E.; SILVA, F. J. P.; RALISCH, R. **Revitalização dos solos em processos de transição agroecológica no sul do Brasil**. *Agriculturas*, 4(1), 2007.

ALMEIDA, E.; SILVA, F. J. P.; RALISCH, R. **Powdered rock to revitalize soils**. *LEISA*, 22(4), 12:13, 2006.

ALTIERI, M. **Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável.** Expressão popula/AS-PTA, São Paulo/Rio de Janeiro, SP/RJ, Brasil. 400pp., 2012.

ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. **Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação.** Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias, 5(1), 187-206, 2012.

BLASKOWSKI, A. E.; BERGMANN, M.; CAVALCANTE, O. A. **Projeto agrominerais da região de Irecê-Jaguarari.** Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Salvador, Bahia, BR. 107pp., 2016.

BLASKOWSKI, A. E. **Caracterização petrológica e química das rochas de rejeito da mina de Ipueira e seu potencial agromineral.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia. 190pp., 2018.

BLASKOWSKI, A. E.; RIOS, D. C.; CONCEIÇÃO, H.; MARIANI, B. B. **Potencial agromineral das rochas de descarte da mina de cromita de Ipueira, Bahia.** Anuário do Instituto de Geociências, 42(1), 355:373, 2019.

BRASIL. **Lei nº 10.831, de 23 de dezembro de 2003.** Dispõe sobre agricultura orgânica e dá outras providências. 2003.

BRASIL. **Decreto nº 7.794, de 20 de agosto de 2012.** Institui a Política Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica. 2012.

BRASIL. **Lei n. 12.890, de 10 de dezembro de 2013.** Inclui os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências. 2013.

BRASIL. **Decreto nº 8.384 de 29 de dezembro de 2014.** Altera o anexo ao decreto nº 4.954 de 14 de janeiro de 2004, que aprova o regulamento da lei nº 6.894 de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da aprovação e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura. 2014.

Otimização dos métodos de lavra a céu aberto considerando conceitos de geotecnia aplicados à espeleologia – estudo de caso da mina de n4e – Carajás - PA

BURBANO, D. F. M. **Uso de rocha basáltica como remineralizador de solo em sistema de rotação de cultivos com quinoa.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal. 83 pp., 2020.

CARVALHO, A. M. X. **Rochagem e suas interações no ambiente solo: contribuições para aplicação em agroecossistemas sob manejo agroecológico.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 129pp., 2012.

CORREIA, J. R.; BUSTAMANTE, P. G.; EMPERAIRE, L.; MITJA, D. **Desafios da pesquisa participativa e restituição em projetos de pesquisa junto a pequenos agricultores, estudo de caso: Projeto Rio Pardo, Embrapa/Brasil.** Cahiers des Amériques Latines, 72-73, 123-139, 2013.

FERNANDES, M. M. **Viabilidade agrônômica do uso de rejeito de garimpos do Distrito Pegmatítico de Araçuaí, MG.** Tese do Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais. 190pp., 2008.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. 637pp., 2000.

LUIZÃO, F. J.; FEARNside, P. M.; CERRI, C. E. P.; LEHMANN, J. **A Manutenção da Fertilidade do Solo em Sistemas Manejados na Amazônia.** Geophysical Monograph, 2009, DOI: 10.1029/2008GM000742.

MACHADO, P. L. O. A. **Manejo da matéria orgânica em solos tropicais: abrangência e limitações.** Rio de Janeiro: Brasil, 2001.

MAPA. **Instrução Normativa MAPA nº 5 de 10 de março de 2016.** Estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para as plantas, destinados à agricultura. 2016.

MATOS, G. M. M., MELLO, I. S. C. [2010-2023]. **Mapa de ambientes geológicos favoráveis para agrominerais fontes de P, K, Ca, Mg, escala 1:5.000.000. [...]: CPRM.**

GEOLOGIA, AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE

MEDEIROS, F. P.; SILVA, R. F.; AMORIM, G. D.; CARVALHO, A. M. X.; CARDOSO, I. M. **Pós de rocha: uma tecnologia que auxilia nos processos de transição agroecológica.** Revista Brasileira de Agroecologia, 17(3), 242-262, 2022, DOI: <https://doi.org/10.33240/rba.v17i3.23504>.

REIS, N. J., ALMEIDA, M. E., RIKER, S. L., FERREIRA, A. L. **Geologia e recursos minerais do estado do Amazonas, 1:1.000.000.** Manaus: CPRM, 125p., 2006.

RIKER, S. R. L. **Mapa de insumos minerais para agricultura e áreas potenciais nos Estados do Amazonas e Pará, escala 1:2.500.000.** Manaus: CPRM, 2001.

SILVA, A. J. P.; LOPES, R. C.; VASCONCELOS, A. M.; BAHIA, R. B. C. Bacias Sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores. *In*: Bizzi, L. A.; Schobbenhaus, C.; Vidotti, R. M.; Gonçalves, J. H. (Eds). **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil.** Rio de Janeiro: CPRM, p. 55-85, 2003.

THEODORO, S. C. H. **A fertilização da terra pela terra: uma alternativa para a sustentabilidade do pequeno produtor rural.** Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal. 240pp., 2000.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O.; ROCHA, E. L.; REGO, K. G. **Experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes.** Espaço & Geografia, 9(2), 263:292, 2020.

THEODORO, S. H. **Cartilha da Rochagem.** Gráfica e Editora Ideal, Brasília, BR. 32pp., 2020.