



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Ariadne Marra de Souza

**Estudo isotópico e geoquímico dos sedimentos costeiros da Costa Verde do Estado do Rio de Janeiro para identificação de atividades antrópicas.**

Rio de Janeiro

2015

Ariadne Marra de Souza

**Estudo isotópico e geoquímico dos sedimentos costeiros da Costa Verde do Estado do Rio de Janeiro para identificação de atividades antrópicas.**

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciência, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias.

Orientador: Prof. Dr. Mauro César Geraldês

Rio de Janeiro

2015

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

S729

Souza, Ariadne Marra de.

Estudo isotópico e geoquímico dos sedimentos costeiros da Costa Verde do Estado do Rio de Janeiro para identificação de atividades antrópicas / Ariadne Marra de Souza. – 2015. 221 f.

Orientador: Mauro Cesar Geraldês.

Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Geoquímica ambiental – Ilha Grande, Baía da (RJ) – Teses. 2. Geologia isotópica – Ilha Grande, Baía da (RJ) – Teses. 3. Sedimentos (Geologia) – Ilha Grande, Baía da (RJ) – Teses. 4. Metais pesados – Teses. I. Geraldês, Mauro Cesar. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. III. Título.

CDU 550.42:504(815.3)

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Ariadne Marra de Souza

**Estudo isotópico e geoquímico dos sedimentos costeiros da Costa Verde do Estado do Rio de Janeiro para identificação de atividades antrópicas.**

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciência, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias.

Aprovada em 17 de abril de 2015

Banca Examinadora:

---

Dr. Prof. Mauro César Geraldês (Orientador)  
Faculdade de Geologia da UERJ

---

Dr. Prof. Alessandro Mendonça Filippo  
Faculdade Oceanografia da UERJ

---

Dr. Prof. José Antônio Baptista Neto  
Instituto de Geociências da UFF

---

Dr. Prof. Miguel Ângelo Mane  
Faculdade de Geologia da UERJ

---

Dr. Prof. Sérgio William de Oliveira Rodrigues  
Faculdade de Geologia da UERJ

Rio de Janeiro  
2015

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho àqueles que me acompanharam em minha vida acadêmica de muitas formas.

Aos meus pais: Maria da Conceição Marra de Souza e Alvimar Calazans de Souza Filho; meus irmãos: Alana Keli Marra de Souza, Demetrius Marra de Souza, Camila Corrêa e Souza e Letícia Calazans de Souza e; meu sobrinho: André Luiz de Menezes Marra.

A minha família de sangue e de coração (meus queridos amigos).

Aos excelentes orientadores com que trabalhei: Ambrosina Helena Pascutti Gontijo, Carla Semiramis Silveira, Cláudio Limeira Mello, Mauro Cesar Geraldês e Ronaldo Mello Pereira.

E ao Amor primordial sob seus muitos nomes.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu orientador Mauro César Geraldes, por sua disponibilidade, paciência e valiosa orientação; Agradeço também a instituição CAPES pelo apoio financeiro sob a forma de bolsa de estudos e a Instituição FAPERJ pelo financiamento do projeto dentro do qual essa tese foi desenvolvida.

Agradeço a Bruno Alcântara, Bruno Saliba, Alan Martins e alunos de graduação dos cursos de Oceanografia e Geologia da UERJ pela ajuda na coleta e preparação das amostras.

Aos funcionários da secretaria acadêmica de pós-graduação Roberto Raphael Carvalho e Diogo Ferreira e posteriormente a Juçara e Mariane pelo apoio administrativo e gentileza.

A Gabriela e Sandro pela preparação das amostras.

Aos Professores Silvia Pereira, Renata Rebouças, Luiz Saavedra, Alessandro Mendonça Filippo, José Baptista Neto, Ronaldo Mello Pereira, Carla Semiramis Silveira e Marshal Costa Leme por importantes contribuições a essa tese.

A Dra. Mariza Franklin, pela disponibilização da dissertação que auxiliou na interpretação dos resultados.

Meus sinceros agradecimentos a todos que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Quanto maiores somos em humildade, tanto mais próximos estamos da grandeza”.

*Rabindranath Tagore*

“Tente mover o mundo. O primeiro passo será mover a si mesmo”.

*Platão*

“Um raciocínio lógico leva você de A a B. A imaginação te leva a qualquer lugar que você quiser”.

*Albert Einstein*

## RESUMO

SOUZA, Ariadne Marra de. **Estudo isotópico e geoquímico dos sedimentos costeiros da Costa Verde do estado do Rio de Janeiro para identificação de atividades antrópicas**. 2015. 221f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

A Costa Verde se localiza no estado do Rio de Janeiro, onde também está localizada a Ilha Grande, importante polo turístico do estado. É composta pelas baías Sepetiba e Ilha Grande, que podem ser compartimentadas em diversas enseadas. As principais enseadas são Sepetiba, Marambaia, Mangaratiba, Angra dos Reis, Ribeira, Frade e Paraty. O presente estudo foi realizado nas enseadas de Mangaratiba, Angra dos Reis e Ribeira e foram compilados dados de Sepetiba e Marambaia estudado por outros autores. O objetivo do estudo destas enseadas foi identificar os metais e suas fontes e os mecanismos que os controlam, além de propor novos parâmetros de concentração de metais que indiquem processos de contaminação. O método utilizado foi a coleta de sedimento de fundo através da utilização de *Van Veen* e analisados por digestão total em espectrômetro de massa da qual se obteve a concentração dos elementos Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Pb, Na, Ni, Sr, S, U, V e Zn, além das razões isotópicas de chumbo, com prioridade da razão  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ . Foram obtidos resultados que indicam que a enseada de Mangaratiba apresenta as maiores concentrações de metais e com predominante contribuição antrópica cujas fontes são, os empreendimentos localizados na costa dessa enseada, incluindo o TEBIG. A enseada de Angra dos Reis também apresenta concentrações elevadas de metais, provenientes de efluentes domésticos, rejeito industrial ao qual se inclui o estaleiro Verolme e com forte controle do embasamento da enseada. A enseada da Ribeira tem seus metais fornecidos pelo porto de Bracuhy e uma fonte desconhecida que são controlados, em parte, pelos efluentes da CNAAA. Em relação a interação entre as cinco enseadas existe mútua troca de metais controlados pela dinâmica da Costa e acentuada pelo Canal de Ilha Grande (que liga as duas baías), onde a dispersão dos metais também é controlada por temperatura, fração sedimentar, profundidade e salinidade. Os principais metais relacionados às fontes antrópicas na Costa Verde são Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn. As concentrações hoje apresentadas na resolução CONAMA não atendem a realidade da Costa Sul brasileira, sendo então propostos novos parâmetros de controle, menos permissivo.

Palavra-chave: Geoquímica Ambiental, Geologia Isotópica, Metais Pesados, Geologia Costeira.



## ABSTRACT

SOUZA, Ariadne Marra de. **Isotope and geochemical study to costal sediment from Costa Verde at Rio de Janeiro state to identify anthropic activity**. 2015. 221f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

The Costa Verde is located in Rio de Janeiro State, it were located the Ilha Grande, an important tourist hub of the state. It is composed of Sepetiba and Ilha Grande bays, which be compartmentalize in several coves. The main inlets are Sepetiba, Marambaia, Mangaratiba, Angra dos Reis, Riberia, Frade and Paraty. This study was conduct in the coves of Mangaratiba, Angra dos Reis and Ribeira and wish was compiled Sepetiba and Marambaia data studied by other authors. The survey intends identify metals, their sources, and the mechanisms that control of those coves, also proposal a new concentration values than indicate contamination processes. The method involve collected of bottom sediment using van Veen and analyzed by total digestion in the mass spectrometer which was obtained Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Pb, In, Ni, Sr, S, U, V and Zn concentration, in addition to the lead isotope ratios, main  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  ratio. The results shown wish were Mangaratiba cove has the highest metals concentrations and they are predominantly anthropogenic whose sources are the developments located on the shore of this bay, including TEBIG. The Angra dos Reis cove also features high metals concentrations, from domestic sewage, industrial waste that includes the Verolme shipyard and strong control of the cove basis. Ribeira cove has its metals provided by Bracuhy port and an unknown source that controlled by the CNAAA effluents. Regarding the interaction between the five coves it was a mutual exchange of metals controlled by the Coast dynamics and pronounced by the Ilha Grande Channel (connecting the two bays), where the dispersion of metals are also controlled by temperature, sediment fraction, depth and salinity. The main metals related to anthropogenic sources in Costa Verde are Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn. Concentration used by CONAMA resolution do not comply a reality South Brazilian coast, than are proposal a new values of control less permissive.

Key words: Environmental Geochemistry, Isotopic Geology, Heavy Metal, Coastal Geology

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Níveis de contaminação por metais pesados em sedimento na costa do Rio de Janeiro.....	28
Figura 2 - Elementos traços nas águas superficiais do Pacífico Norte.....	34
Figura 3 - Mapa de localização da área de estudo, com destaque as usinas (NPP) e descarga de efluentes (DP).....	37
Figura 4 - Mapa de distribuição de fácies sedimentares.....	41
Figura 5 - Mapa batimétrico digital da região do canal central da baía da Ilha Grande. Tamanho de célula 45m e intervalo de contorno 3m. Métodos de gridagem utilizados: kriging e mínima curvatura (mascarado). Re-processamento do gride original do mapa batimétrico de Dias et. al. (1990).....	42
Figura 6 - Batimetria da baía de Sepetiba, com destaque aos principais rios e estações de controle de corrente e qualidade de água.....	43
Figura 7 - Mapa geológico adaptado de CPRM (2000) e imagem de radar da região da Costa Verde (a) Coluna estratigráfica. (b) Mapa Geológico.....	52
Figura 8 - Mapa de distribuição de pontos.....	55
Figura 9 - Distribuição dos pontos de coleta das enseadas de Sepetiba e Marambaia....	63
Figura 10 - Mapa de distribuição da concentração de chumbo, urânio e assinatura isotópica para as enseadas de Sepetiba e Marambaia.....	64
Figura 11 - Distribuição das razões $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ em relação ao número de observações.....	67
Figura 12 - Relação entre assinatura $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ e a concentração de chumbo, com destaque ao intervalo exclusivo a enseada de Sepetiba e as curvas de comportamento da enseada de Marambaia.....	68
Figura 13 - Pontos de amostragem na enseada de Mangaratiba.....	72
Figura 14 - Mapa de distribuição das concentrações de chumbo e assinaturas isotópicas.....	73
Figura 15 - Distribuição das concentrações de metais na enseada de Mangaratiba. a) cádmio; b) cobalto; c) cobre; d) cromo; e) enxofre; f) estrôncio; g) manganês; h) níquel; i) vanádio e urânio; j) zinco.....	74

Figura 16 - Diagrama de cluster para enseada de Mangaratiba.....	80
Figura 17 - Assinatura isotópica Pb/Pb para enseada de Mangaratiba em relação ao número de observações.....	84
Figura 18 - Correlação entre assinatura isotópica $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ e concentração de chumbo, com destaque a três grandes grupos.....	84
Figura 19 - Assinatura isotópica da enseada de Mangaratiba. a) $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ x $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ; b) $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ x $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ .....	85
Figura 20 - Distribuição das concentrações de Pb e Zn e a linha de tendência polinomial de ordem 4. a) Concentrações de chumbo com destaque às amostras com valores aberrantes positivos (em vermelho). b) Concentrações de zinco com destaque às amostras com valores aberrantes positivos (em vermelho) e negativos (em preto).....	87
Figura 21 - Assinaturas isotópicas e suas fontes para enseada de Mangaratiba.....	93
Figura 22 - Pontos de amostragem na enseada de Angra dos Reis.....	96
Figura 23 - Mapa da distribuição de concentrações de chumbo, urânio e assinaturas isotópicas $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ da enseada de Angra dos Reis.....	98
Figura 24 - Distribuição da concentração de metais na enseada de Angra dos Reis. a) cobalto; b) cobre; c) cromo; d) enxofre; e) manganês; f) níquel; g) vanádio; h) zinco e cádmio. ....	98
Figura 25 - Diagrama de cluster para enseada de Angra dos Reis.....	104
Figura 26 - Razão isotópica $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ da enseada de Angra dos Reis em relação ao número de observações.....	107
Figura 27 - Correlação entre as concentrações de chumbo e assinaturas $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ na enseada de Angra dos Reis.....	108
Figura 28 - Assinatura isotópica de Pb para enseada de Angra dos Reis. a) $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ x $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ com destaque aos dois grupos observados; b) $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ x $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ com destaque aos três grupos observados.....	108
Figura 29 - Distribuição das concentrações de Pb e Zn. a) Concentrações de chumbo com destaque às amostras com valores aberrantes positivos (em vermelho). b) Concentrações de zinco com destaque às amostras com valores aberrantes negativos (em preto) com destaque a sua média.....	110
Figura 30 - Assinaturas isotópicas e as fontes identificadas para enseada de Angra dos Reis.....	118

Figura 31 - Pontos de amostragem na enseada da Ribeira.....	121
Figura 32 - Mapa de distribuição de Pb, U e assinaturas isotópicas $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ da enseada da Ribeira.....	123
Figura 33 - Concentração de metais na enseada da Ribeira. a) Cobalto; b) cobre; c) cromo; d) enxofre; e) estrôncio; f) manganês; g) níquel; h) vanádio e urânio; i) Zinco.....	124
Figura 34 - Diagrama de cluster da enseada da Ribeira.....	130
Figura 35 - Assinatura isotópica Pb/Pb para enseada da Ribeira em relação ao número de observações.....	133
Figura 36 - Dispersão de chumbo em função da razão $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ .....	133
Figura 37 - Gráfico de dispersão das razões isotópicas da enseada da Ribeira com destaque aos três grupos formados. a) $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ x $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ . b) $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ x $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ .....	134
Figura 38 - Distribuição das concentrações de Pb e Zn com destaque às amostras com valores aberrantes positivos (em vermelho). a) Concentrações de chumbo e linha de tendência em polinomial de ordem 6. b) Concentrações de zinco e linha de tendência em polinomial de ordem 4.....	135
Figura 39 - Assinaturas isotópicas e as fontes identificadas para a enseada da Ribeira...	143
Figura 40 - Mapa de concentração e distribuição espacial de urânio (mg/Kg).....	149
Figura 41 - Mapa de concentração e distribuição espacial de zinco (mg/kg).....	152
Figura 42 - Distribuição de cádmio na Costa Verde.....	153
Figura 43 - Concentração de enxofre na Costa Verde.....	154
Figura 44 - Concentração de Vanádio na Costa Verde.....	155
Figura 45 - Mapa de concentração e distribuição espacial de chumbo (mg/kg).....	156
Figura 46 - Mapa de concentração e distribuição espacial de cobalto (mg/kg).....	159
Figura 47 - Mapa de concentração e distribuição espacial de níquel (mg/kg).....	160
Figura 48 - Distribuição das concentrações de manganês na costa verde. Não há dados quanto às concentrações na enseada de Sepetiba.....	163
Figura 49 - Concentrações de cobre ao longo da Costa Verde.....	165
Figura 50 - Mapa de concentração de cromo na Costa Verde.....	166
Figura 51 - Concentrações média do perfil de sedimentos em g/kg para Al, Mg, K, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Zn, Sr e Ba, em mg/Kg para os demais elementos.....	167

Figura 52 - Concentração de estrôncio para a Costa Verde. Não há dados para a enseada de Sepetiba.....	168
Figura 53 - Curva de distribuição da Razão $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ na baía de Sepetiba, enseadas de Mangaratiba, Marambaia e Sepetiba.....	174
Figura 54 - Curva de distribuição da Razão $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ na baía de Ilha Grande, enseadas de Angra dos Reis e Ribeira.....	174
Figura 55 - Comparação das assinaturas encontradas na Costa Verde com diversos autores.....	175
Figura 56 - Razão $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \times ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ da baía da Ilha Grande para as enseadas de Angra dos Reis e Ribeira.....	177
Figura 57 - Razão $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \times ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ da baía de Sepetiba para as enseadas de Mangaratiba, Marambaia e Sepetiba.....	177
Figura 58 - Distribuição das assinaturas isotópicas $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ da Costa Verde.....	178
Figura 59 - Correlação das assinaturas $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ e concentrações de chumbo das enseadas estudadas na Costa Verde.....	180
Figura 60 - Concentrações de metais (Pb, Zn e Mn) e assinatura isotópica ( $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ) da Costa Verde.....	185
Figura 61 - Gráfico da concentração de cádmio (mg/Kg), o número de observações com caracterização dos intervalos Background, influência antrópica e contaminação e nível 1 da resolução CONAMA.....	185
Figura 62 - Gráfico da concentração de Cobre (mg/Kg), o número de observações com caracterização dos intervalos Background, influência antrópica e contaminação e níveis 1 e 2 da resolução CONAMA.....	185
Figura 63 - Gráfico da concentração de chumbo (mg/Kg), o número de observações com caracterização dos intervalos Background, influência antrópica e contaminação e nível 1 da resolução CONAMA.....	186
Figura 64 - Gráfico da concentração de cromo (mg/Kg), o número de observações com caracterização dos intervalos Background, influência antrópica e contaminação e o nível 1 da resolução CONAMA.....	186
Figura 65 - Gráfico da concentração de manganês (mg/Kg) e o número de observações com caracterização dos intervalos Background, influência antrópica e contaminação. ....	186

- Figura 66 - Gráfico da concentração de níquel (mg/Kg), o número de observações com caracterização dos intervalos Background, influência antrópica e contaminação e os níveis 1 e 2 da resolução CONAMA..... 187
- Figura 67 - Gráfico da concentração de vanádio (mg/Kg) e o número de observações com caracterização dos intervalos Background, influência antrópica e contaminação..... 187
- Figura 68 - Gráfico da concentração de Zinco (mg/Kg), o número de observações com caracterização dos intervalos Background, influência antrópica e contaminação e os níveis 1 e 2 da resolução CONAMA..... 187

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Precipitação padrão no Município de Angra dos Reis (RJ).....	44
Tabela 2 -	Concentrações de metais na enseada de Sepetiba.....	65
Tabela 3 -	Concentração de metais na enseada da Marambaia.....	65
Tabela 4 -	Razão isotópica de chumbo por enseada (Sepetiba e Marambaia).....	66
Tabela 5 -	Concentração de metais e enxofre na enseada de Mangaratiba.....	73
Tabela 6 -	Fator de correlação para enseada de Mangaratiba.....	81
Tabela 7 -	Matriz de correlação entre os elementos analisados na enseada de Mangaratiba.....	82
Tabela 8 -	Razões isotópica de chumbo para a enseada de Mangaratiba.....	83
Tabela 9 -	Concentração de metais na enseada de Angra dos Reis.....	97
Tabela 10 -	Fator de correlação enseada de Angra dos Reis.....	104
Tabela 11 -	Matriz de correlação entre os elementos analisados da enseada de Angra dos Reis.....	105
Tabela 12 -	Razões isotópicas de chumbo da enseada de Angra dos Reis.....	106
Tabela 13 -	Concentração de metais na ensada da Ribeira.....	122
Tabela 14 -	Fator de correlação da enseada da Ribeira.....	130
Tabela 15 -	Matriz de correlação entre elementos analisados na enseada da Ribeira....	131
Tabela 16 -	Assinatura isotópica Pb/Pb da enseada da Ribeira.....	132
Tabela 17 -	Concentrações máximas e mínimas na Costa Verde por enseada dos elementos Cd, Co, Cu, Cr, Mn, Ni, Pb, U, V e Zn e seus respectivos coeficientes de variação.....	147
Tabela 18 -	Comparação das concentrações de metais (mg/Kg) em diversas baias.....	171
Tabela 19 -	Padrão de concentração de Cd, Cu, Cr, Mn, Ni, Pb, V e Zn em sedimentos dragados em águas salinas, compartimentados em três categorias.....	188

## LISTA DE ABREVIACÃO E SIGLAS

ActLabs	<i>Activation Laboratory</i>
CNAAA	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DHN	Diretório de Hidrografia e Navegação
Eh	Potencial de Oxiredução
GIS	<i>Geographic Information System</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP-MS	Espectrômetro de Massa por Plasma Indutivamente Acoplado
INB	Indústria Nuclear Brasileira
LD	Limite de detecção
MBR	Mineração Brasileiras Reunidas
NIST	National Institute of Standards and Technology
pH	Percentual Hidrogeniônico
ppb	Parte Por Bilhão
ppm	Parte Por Milhão
ppt	Parte Por Trilhão
TD-ICP	Digestão Total Por Plasma Indutivamente Acoplado
TEBIG	Terminal da Baía da Ilha Grande
TIMS	Espectrômetro de Massa por Ionização Térmica



## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	19
1.	<b>OBJETIVOS.....</b>	21
2.	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	22
3.	<b>METAIS.....</b>	24
3.1.	<b>Comportamento dos metais.....</b>	24
3.1.1.	<u>Análise.....</u>	26
3.2.	<b>Acidentes e Vazamentos com Metais Pesados.....</b>	27
3.3.	<b>Razões isotópicas de chumbo aplicadas ao meio ambiente.....</b>	29
4.	<b>AMBIENTE MARINHO.....</b>	31
4.1.	<b>Dispersão geoquímica em ambiente marinho.....</b>	33
5.	<b>ÁREA DE ESTUDO.....</b>	36
5.1.	<b>Localização.....</b>	36
5.2.	<b>Aspectos Socioeconômicos.....</b>	38
5.2.1.	<u>Empreendimentos da Costa Verde e seus efluentes metálicos associados..</u>	38
5.3.	<b>Geomorfologia.....</b>	40
5.4.	<b>Clima.....</b>	43
5.5.	<b>Hidrologia.....</b>	45
5.6.	<b>Dinâmica Costeira.....</b>	45
5.6.1.	<u>Maré.....</u>	46
5.6.2.	<u>Densidade, temperatura e salinidade.....</u>	46
5.6.3.	<u>Correntes.....</u>	47
5.7.	<b>Geologia.....</b>	48
5.7.1.	<u>Geologia Regional.....</u>	48
5.7.2.	<u>Geologia Local.....</u>	50
6.	<b>MÉTODO.....</b>	53
6.1.	<b>Coleta das amostras.....</b>	53
6.2.	<b>Preparação de amostras.....</b>	56
6.3.	<b>Análise química.....</b>	56
6.3.1.	<u>ICP-MS.....</u>	59

6.4.	<b>Geoprocessamento.....</b>	60
6.5.	<b>Geoestatística.....</b>	60
7.	<b>COMPILAÇÃO: Enseadas de Sepetiba e de Marambaia.....</b>	62
7.1.	<b>Material e métodos.....</b>	62
7.2.	<b>Resultados.....</b>	63
7.2.1.	<u>Metais.....</u>	63
7.2.2.	<u>Assinatura Isotópica.....</u>	66
7.3.	<b>Discussão.....</b>	68
7.4.	<b>Considerações.....</b>	70
8.	<b>RESULTADOS: Baía de Sepetiba - Enseadas de Mangaratiba.....</b>	71
8.1.	<b>Introdução.....</b>	71
8.2.	<b>Amostragem.....</b>	71
8.3.	<b>Resultados.....</b>	72
8.3.1.	<u>Metais.....</u>	72
8.3.2.	<b>Assinatura Isotópica.....</b>	83
8.4.	<b>Discussão.....</b>	86
8.4.1.	<u>Metais.....</u>	86
8.4.2.	<b>Assinatura Isotópica.....</b>	91
8.5.	<b>Conclusões Parciais.....</b>	93
9.	<b>RESULTADOS: Baía de Ilha Grande - Enseadas de Angra dos Reis..</b>	95
9.1.	<b>Introdução.....</b>	95
9.2.	<b>Amostragem.....</b>	95
9.3.	<b>Resultados.....</b>	96
9.3.1.	<u>Metais.....</u>	96
9.3.2.	<b>Assinatura Isotópica.....</b>	106
9.4.	<b>Discussão.....</b>	109
9.4.1.	<u>Metais.....</u>	109
9.4.2.	<u>Assinatura Isotópica.....</u>	114
9.5.	<b>Conclusões Parciais.....</b>	118
10.	<b>RESULTADOS: Baía de Ilha Grande - Enseadas da Ribeira.....</b>	120
10.1.	<b>Introdução.....</b>	120
10.2.	<b>Amostragem.....</b>	120
10.3.	<b>Resultados.....</b>	122

10.3.1.	<u>Metais</u> .....	122
10.3.2.	<u>Assinatura Isotópica</u> .....	132
10.4.	<b>Discussão</b> .....	134
10.4.1.	<u>Metais</u> .....	134
10.4.2.	<u>Assinaturas isotópicas</u> .....	140
10.5.	<b>Conclusões Parciais</b> .....	143
11.	<b>COSTA VERDE: Integração entre as baías e enseadas</b> .....	145
11.1.	<b>Concentrações</b> .....	145
11.1.1.	<u>Associação dos resultados obtidos na Costa Verde à Literatura</u> .....	169
11.2.	<b>Assinaturas Pb/Pb</b> .....	173
12.	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	181
	<b>CONCLUSÃO</b> .....	191
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	193
ANEXO A –	<b>Concentrações definidas pela Resolução CONAMA n.º 344/2004</b> .....	202
ANEXO B –	<b>Amostras analisadas para razão isotópica e suas respectivas razões</b> ....	203
ANEXO C –	<b>Concentrações de metais de cada amostra coletada</b> .....	206
ANEXO D –	<b>Mapas de modelagem de Corrente por Franklin (2001)</b> .....	220

## INTRODUÇÃO

*Existe apenas um bem, o saber; e apenas um mal, a ignorância.*  
Sócrates

O crescimento industrial acelerado e a ocupação desordenada do solo atualmente são responsáveis pelo lançamento de inúmeras substâncias tóxicas nos afluentes que deságuam no mar. Destacam-se como poluentes, entre outros, os metais, sendo o processo industrial uma das principais fontes desses metais de origem antrópica.

Os metais Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Ni, Sr, U, V e Zn podem ser caracterizados como elementos traços (teores abaixo de 0,1%) na crosta terrestre, no entanto podem ter seus teores aumentados no meio ambiente por atividades antrópicas, também são denominados como metais pesados por apresentarem peso atômico entre 63,5 e 200,6 e densidade superior a 4,0g/cm<sup>3</sup>. Portanto neste trabalho a expressão metais pesados, metais e elementos traços fazem referência a esses elementos.

O estudo aqui apresentado foi realizado na zona costeira do estado do Rio de Janeiro compreendida entre os municípios do Rio de Janeiro, Angra dos Reis e Paraty, denominada Costa Verde. Esses municípios estão localizados no mais importante entorno geoeconômico do Brasil, que abrange as cidades do Rio de Janeiro, São Paulo, Belo Horizonte e Vitória e vem sendo considerada uma área potencialmente catalisadora de desenvolvimento, despontando como um dos polos industriais do estado do Rio de Janeiro.

No município de Angra dos Reis estão instaladas as Usinas Termonucleares Angra 1 e Angra 2 e, em vias de instalação a Angra 3. Influência antrópica ao longo dos últimos 30 anos foi identificada por Pereira e Poços (2009), sendo este período coincidente com o início das operações da usina Angra 1 entre 1982 e 1985 (ELETRONUCLEAR, 2011), que favoreceu uma rápida urbanização da região.

As usinas nucleares não são os únicos empreendimentos que podem impactar o ambiente. Portos, marinas e as próprias cidades costeiras configuram possíveis fontes de contaminantes com maior tempo e frequência de atividade. Estes empreendimentos contribuem com uma grande gama de contaminantes de fácil assimilação pela biota e de mais difícil rastreamento, uma vez que envolvem metais que também são fornecidos por fontes naturais. As contaminações muito superiores às de usinas termonucleares em relação à área de atuação e o número de ocorrências, são de metais, geralmente correlacionados aos empreendimentos supracitados.

A região da Costa Verde conta com mais de 100 companhias de média a grande porte

de atividades industriais diversas, responsáveis por lançar efluentes nas baías de Ilha Grande e Sepetiba com diversos compostos químicos e metais pesados (DE SOUZA LIMA et al., 2002).

Os metais pesados também são relacionados a centros urbanos, conforme descrito por Conceição (2005) e Carvalho et al. (1993), onde os centros urbanos podem se caracterizar como outra fonte potencialmente poluidora não só de metais, mas também de complexos orgânicos, dificultando sua identificação e controle.

Desta forma, o atual estudo pretende contribuir na compreensão da influência antrópica na Costa Verde e, o papel da dinâmica marinha na dispersão de possíveis poluentes provenientes das atividades antrópicas, bem como identificar as fontes poluidoras de metais. O entendimento do controle da dispersão e da permanência dos metais pesados em ambiente marinho representa um desafio bastante significativo, pois são difíceis de serem mensurados por terem valores abaixo dos limites de detecção dos equipamentos analíticos mais utilizados.

Uma ferramenta muito utilizada para a identificação das fontes de metais no meio ambiente é a análise dos isótopos estáveis presentes no ambiente de estudo, estes isótopos normalmente se apresentam em concentrações de ppm (parte por milhão) a ppt (parte por trilhão), exigindo equipamentos de alta resolução.

Uma vez que sejam identificadas as fontes de metais, as informações obtidas no estudo proposto servirão como subsídio e fonte de consulta para necessárias remediações e projeções de consequências em médio e longo prazo.

## 1. OBJETIVOS

*Quando atingimos o objetivo, convencemo-nos de que seguimos o bom caminho.*  
Paul Valéry

O objetivo do presente trabalho é identificar possíveis contaminações de metais a partir de atividades antrópicas na Costa Verde. A caracterização de possíveis contaminações permite a definição da abrangência desta contaminação, assim como identificar as possíveis fontes antrópicas a partir de assinaturas isotópicas de chumbo (Pb). Para tanto é necessário entender as fontes dos metais e o comportamento desses elementos no ambiente.

### 1.1. Objetivos Gerais

- Identificar as concentrações dos metais Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Ni, Sr, U, V e Zn na Costa Verde do Rio de Janeiro;
- Identificar as prováveis fontes de metais na Costa Verde do Rio de Janeiro;
- Montar uma base de consulta para definição de *background* regional na Costa Verde do Rio de Janeiro;
- Identificar o papel da dinâmica costeira na dispersão de metais na Costa Verde do Rio de Janeiro.

### 1.2. Objetivos Específicos

1. Realizar amostragem de densidade que permita uma caracterização de possíveis contaminantes Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Ni, Sr, U, V e Zn;
2. Analisar as concentrações de metais em sedimentos de fundo;
3. Analisar os de isótopos de Pb em sedimentos de fundo;
4. Propor parâmetros de normatização para contaminação por metais na Costa Sul do Brasil.

## 2. JUSTIFICATIVA

*Uma vida sem desafios não vale a pena ser vivida.*  
Sócrates

A região da Costa Verde contém duas baías de grande importância para o estado do Rio de Janeiro, são elas a baía da Ilha Grande à oeste e a baía de Sepetiba à leste, ambas compartimentadas em diversas enseadas e ligadas pelo Canal da Ilha Grande. O presente estudo busca a caracterização dos metais pesados nessas baías, bem como sua origem e comportamento.

Os metais pesados podem ser altamente tóxicos e o aumento de sua concentração na atmosfera e hidrosfera pode caracterizar uma poluição local com alto risco ambiental, pois muitas vezes estes metais podem se apresentar na forma biodisponível.

Em áreas industriais e em áreas portuárias, como é o caso da Costa Verde, inúmeras são as fontes antrópicas que podem liberar poluentes para o ambiente, principalmente elementos traços, sendo grande a dificuldade de se distinguir essas fontes, bem como quantificar suas contribuições. Contudo os estudos podem ser complementados pela identificação de isótopos radiogênicos/radioativos, sejam naturais ou não.

A definição das concentrações de metais e assinaturas isotópicas identificadas na Costa Verde pode funcionar como um *background* para região que é passível de acidentes industriais e nucleares, além de compreender o impacto causado pela expansão dos empreendimentos na área.

Os resultados apresentados também podem ser correlacionados a trabalhos anteriores e posteriores de maneira que permita compreender a evolução temporal do comportamento, abrangência e concentrações de metais.

Na baía da Ilha Grande, Franklin (2001) e Gomes et al. (2011) caracterizaram o fracionamento de radionuclídeos na enseada de Ribeira, afirmando que não existem maiores emissões de metais dos efluentes das usinas nucleares, porém não estudaram o comportamento dos metais disponíveis no ambiente frente às mudanças de temperatura gerada pelos efluentes das usinas.

A enseada da Ribeira foi caracterizada por Lacerda et al. (1982) e Cardozo et al. (2001) como não afetada por atividades antrópicas, classificando-a como uma área de referência para estudos na região da Costa Verde, contudo Carvalho et al. (2013) consideram que a instalação da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) na região provocou importantes

perturbações na enseada.

A baía de Sepetiba como um todo é definida como uma área altamente contaminada (BARCELLOS, 1995), que já apresentava características de contaminação desde a década de 1980, segundo Larceda et al. (1987). No entanto sua contaminação não é restrita aos empreendimentos às suas margens, havendo contribuições da bacia hidrográfica do rio Guandu.

As baías de Ilha Grande e Sepetiba apresentam empreendimentos, centros urbanos e alta circulação de embarcações de forma que seria necessário identificar o que as diferencia sob a ótica ambiental. Principalmente quanto a capacidade do ambiente em trabalhar esses metais fornecidos, identificar se o aporte de metais tem como principal fornecedora as atividades antrópicas e qual a influência das fontes naturais.

Na Costa Verde existem duas usinas term nucleares (e uma terceira em fase de construção) que compõe a CNAAA e cuja existência representa uma potencial influência ao ecossistema marinho, como indicam trabalhos sobre a variação térmica da água do mar no entorno da Usina de Angra. O elemento combustível utilizado em usinas nucleares é enriquecido no isótopo  $^{235}\text{U}$  em relação ao isótopo  $^{238}\text{U}$ , pois o  $^{235}\text{U}$  é mais leve, físsil e, capaz de sustentar uma reação em cadeia nos reatores nucleares (INB, 2012).

Os isótopos  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{63}\text{Ni}$  e  $^{90}\text{Sr}$  são resultados da irradiação de nêutrons no material do reator. As usinas são providas de reforçado sistema de segurança e os reservatórios de água naturais (no caso brasileiro a água do mar) são utilizados como mecanismo de resfriamento das usinas. Diversas razões isotópicas são utilizadas a fim de identificar as fontes que contribuem com elementos químicos em determinado ambiente. A IAEA (2009) correlaciona razões  $^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$  específicas de cada tipo de reator do modelo *Light Water Reactor* - LWR (utilizado nas usinas Angra I e II), cuja razão está associada ao bombardeamento da chuva de nêutrons na planta da usina.

O conhecimento do ecossistema da região da Costa Verde, baseado em um conhecimento detalhado da circulação marinha, do transporte e deposição de sedimentos, é de suma importância para o planejamento e desenvolvimento sustentável dos recursos da região, bem como de ações mitigadoras de impactos ambientais ora observados. Também permite identificar a dispersão e abrangência de possíveis contaminantes provenientes de atividades antrópicas e possíveis influências das usinas Angra 1 e Angra 2, assim como os processos de mobilização de sedimentos na área.



### 3. METAIS

*Somente se aproxima da perfeição a que se procura com constância, sabedoria e, sobretudo humildade.*  
Jigoro Kano

Os metais são o maior grupo representado na tabela periódica onde, à exceção dos metais alcalinos e alcalinos terrosos, têm um comportamento químico estável.

Segundo Niencheski et al. (2008), para estudos ambientais o grupo dos metais pesados (elementos com peso atômico entre 63,5 e 200,6 e densidade superior a  $4,0\text{g/cm}^3$ ) pode ser subdivididos em dois grupos: a) metais transicionais, sendo estes elementos essenciais ao metabolismo quando em baixas concentrações, porém se tornando tóxico quando em concentrações mais altas, como exemplo pode-se citar Co, Cu, Fe e Mn; b) Metalóides que não apresentam função metabólica e são tóxicos em qualquer concentração, como exemplo tem-se Cd, Pb, Hg, Se e Sn. Os metais podem formar associação com compostos orgânicos denominados organometálicos e organometaloides (STUMM; MORGAM, 1996).

#### 3.1. Comportamento dos metais

Os elementos químicos são distribuídos na natureza segundo ciclos geoquímicos e bioquímicos, sendo que, as intoxicações decorrentes por contaminação de metais pesados ocorrem mais comumente por Al, Ba, Be, Cd, Pb, Hg e Ni, pois esses elementos alteram as estruturas celulares, as enzimas e substituem metais essenciais nos organismos (PASCALICCHIO, 2002). A capacidade de metais pesados formarem espécies químicas diferentes (estado eletrônico ou de oxidação e/ou estrutura molecular ou complexo definido) definirá sua distribuição geoquímica no ambiente, sua biodisponibilidade e o nível de toxicidade (NIENCHESKI et al. 2008).

Segundo Cesar et al. (2011) os metais pesados são elementos de elevada toxicidade e com grande capacidade de causar danos aos organismos, são originários tanto de fontes naturais como, rochas e atividades vulcânicas, como por atividades antrópicas, como rejeitos domésticos, indústrias (químicos, agroquímicos e metalúrgicos) e atividades agrpecuárias. Destacam-se dos demais poluentes por não serem biodegradáveis, tendo a água como o principal responsável por sua dispersão, a partir de onde têm sua toxicidade controlada por suas formas físico-química (NIENCHESKI et al. 2008).

Segundo Wasserman e Wasserman (2008) a presença de metais não representa

necessariamente uma ameaça se estiverem inertes, ou seja, contidos na matriz mineral. Contudo o risco existe quando estão na forma metabolizável ou biodisponíveis, podendo ocorrer na forma dissolvida, complexos ionizáveis, íons adsorvidos, associados à quelados ou associados a compostos de alto peso molecular, sendo metabolizados por alguns organismos. Também oferecem risco quando associados a fases móveis do sedimento estando muito reativos e facilmente deslocados para fases biodisponíveis.

Os metais estão presentes no retículo cristalino dos minerais que compõem os sedimentos, sendo liberados para o meio ambiente ao longo do tempo geológico (WASSERMAN; WASSERMAN, 2008) conforme a susceptibilidade ao intemperismo das fases minerais que os contêm. Em ambiente aquático a coluna d'água é responsável pela mobilidade e biodisponibilidade de metais para os organismos, enquanto os sedimentos são responsáveis pela fixação dos metais durante um período prolongado, podendo ser enriquecidos por metais de origem antrópica ao longo de seu transporte (WASSERMAN; WASSERMAN, 2008).

A presença dos metais em ambientes aquáticos ocorre ora por processos naturais como, o intemperismo e transporte a partir de solos e rochas, ora por atividade artificial que se diferenciam por magnitude, frequência e duração do impacto ocasionado, sendo a de origem antrópica de maior impacto (NIENCHESKI et al. 2008). Segundo Carvalho et al. (1993) os metais pesados apresentam concentrações na ordem de parte por bilhão (ppb) em ambientes aquáticos em relação as fontes naturais, sendo necessários métodos analíticos de alta sensibilidade.

Dentre os metais com maior impacto tem-se o Pb, que não possui função alguma no organismo humano. Por sua afinidade com os grupos sulfídricos, danifica inúmeras enzimas e estruturas celulares, como as mitocôndrias e, quando no organismo é comumente cancerígeno, imunossupressor e mutagênico. O Pb é um elemento que, assim como o cádmio (Cd), tende a se acumular em sedimentos, podendo formar complexos ou ser transportado por diversos elos da cadeia biológica (NIENCHESKI et al. 2008). A fração de Pb a ser absorvida depende principalmente da forma física e química (especialmente do tamanho das partículas) e da solubilidade de componentes específicos.

No Brasil as principais fontes antrópicas de poluição por Pb estão associadas à mineração e ao despejo inadequado de rejeitos industriais e metalúrgicos, incluindo a galvanoplastia. O níquel (Ni) por sua vez, que é um metal não-essencial, tem como importantes fontes de poluição a mineração e as atividades industriais envolvendo o processamento do metal (CESAR et al. 2011).

O zinco (Zn) e o cobre (Cu) são considerados micronutrientes essenciais, portanto desempenham papel importante no metabolismo de diversos organismos. Porém, em elevadas concentrações, podem causar efeitos adversos. As principais fontes de contaminação de Cu e Zn estão relacionadas aos rejeitos de indústrias químicas e metalúrgicas, bem como à aplicação de pesticidas, herbicidas e fertilizantes, que contêm elevadas concentrações de sais de Zn e arsenatos de Cu (CESAR et al. 2011).

Em ambiente oxidado, Cu e Zn podem co-precipitar em estruturas de oxi-hidróxidos de ferro (Fe) e manganês (Mn) ficando, então mais imobilizados, contudo, a redução do ambiente resulta na dissolução e liberação desses óxidos e hidróxidos (WASSERMAN; WASSERMAN, 2008).

### 3.1.1. Análise

Para análises em estudos ambientais e identificação de contaminações por processos antrópicos, usualmente são amostradas água, sedimento e material biológico, uma vez que podem representar os processos em superfície e a interação entre as esferas exógenas. Amostras de rocha podem ser utilizadas com a finalidade de se definir um *background* natural para a região em estudo, permitindo assim obter o enriquecimento em metais na região.

Segundo Wasserman e Wasserman (2008) as espécies metálicas podem ser identificadas por procedimentos de especiação tais como: frações isotópicas, estado de oxidação, complexos inorgânicos, complexos orgânicos e organometálicos e, complexos metálico-macromoleculares (proteínas). Para as frações isotópicas e concentrações absolutas a determinação tem sido feita a partir de espectrometria de massa, onde o equipamento mais utilizado é o ICP-MS.

As amostras de água contêm elementos em solução de fácil absorção pela cadeia trófica, enquanto o sedimento pode conter tanto material natural – representado na composição do sedimento, quanto o material adsorvido em sua superfície que ali foi depositado por precipitação. Sendo assim, para amostras de sedimentos cuja finalidade é a identificação e mensuração de contaminantes, procura-se utilizar amostras de sedimentos em frações inferiores a areia muito fina, preferencialmente silte ou argila, devido ao alto poder de adsorção dessas partículas.

As amostras de água têm maior versatilidade, pois podem ser amostradas ao longo da lâmina d'água e podem ser filtradas ou não. Caso a água não seja filtrada, as concentrações encontradas representam também as partículas em suspensão que são incorporadas aos

resultados das análises.

Wasserman e Wasserman (2008) abordam dois métodos que permitem avaliar a mobilidade e a biodisponibilidade de elementos químicos com procedimentos que são definidos como fracionamento e especiação. O primeiro é definido como um método operacional, não sendo possível distinguir as espécies presentes na amostra, mas sim, definir grandes grupos, enquanto a especiação engloba procedimentos que determinam as concentrações das espécies e determinam a forma metálica (e.g. Cr(III) de Cr(IV)) ou associação de compostos (e.g. metilmercúrio).

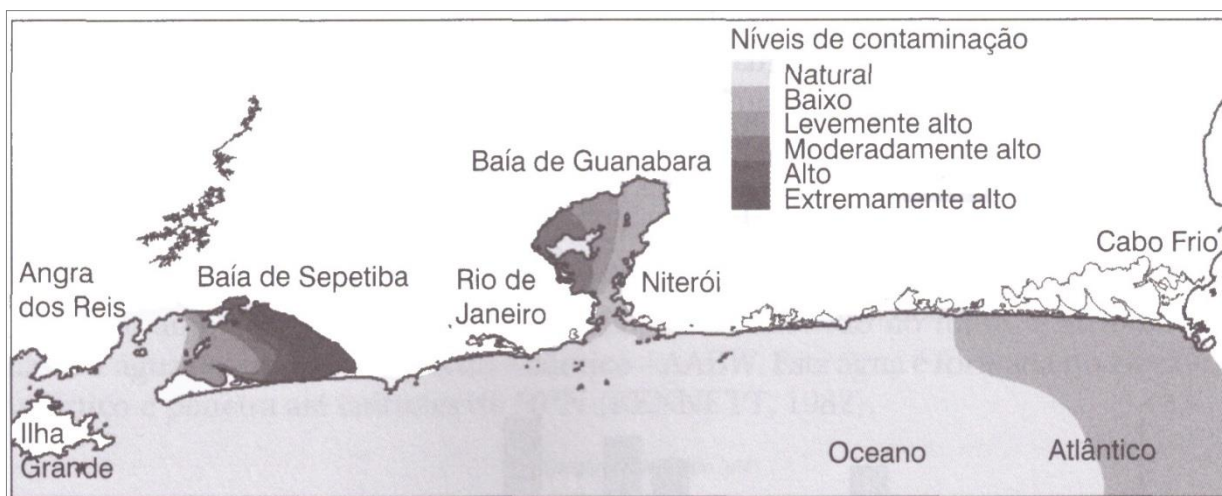
O comportamento biogeoquímico e a distribuição de metais em sedimentos dependem das propriedades físicas, químicas e mineralógicas do meio e de suas inter-relações com o substrato aquoso e a biota. Portanto, variações de textura (fração granulométrica), pH, condutividade elétrica, matéria orgânica, Potencial de oxirredução (Eh), mineralogia das argilas, capacidade de troca catiônica (CTC) e concentração de oxi-hidróxidos de ferro e alumínio podem afetar a fixação e a disponibilidade de metais no ambiente. Fontes difusas de contaminação, associadas à presença de diferentes espécies químicas, podem influenciar a sua toxicidade e sua distribuição (CESAR et al. 2011).

### 3.2. Acidentes e Vazamentos com Metais Pesados

Segundo Pascalicchio (2002) os processos industriais, dentre eles a confecção de ligas com Cu, Mg, Mn, Si e Zn utilizadas nas fabricações de materiais de construção, cabos, embalagens, utensílios domésticos, refratários, têm aumentado a exposição do meio ambiente a esses metais, assim como a exposição ao alumínio (Al). Carvalho et al. (1993) identificaram contaminações advindas de empreendimentos industriais e da expansão urbana na baía de Sepetiba e enseada de Angra dos Reis resultando em alterações nos ecossistemas locais, sendo que, essas contaminações envolviam a presença de Cd, Cu, Ni, Mn, Pb e Zn.

Altas concentrações de Zn vêm sendo identificadas na região de Sepetiba, tanto em sedimentos (ROCHA, 2011) quanto em organismos marinhos (CARVALHO et al. 1993), estes últimos também identificado em Angra do Reis. Carvalho et al. (1993) identificaram a influência dos processos industriais através das concentrações expressivas de Cd na região de Sepetiba, enquanto em Angra dos Reis a maior influência está associada a efluentes de esgoto doméstico por análise da concentração de Cu (Figura 1).

Figura 1 - Níveis de contaminação por metais pesados em sedimento na costa do Rio de Janeiro



Fonte: DORNELLES, (1993 apud WASSERMAN; WASSERMAN, 2008)

Em compilação bibliográfica realizada por Morales (2012) foram levantados cerca de 400 empreendimentos industriais na área da baía de Sepetiba com potencial de poluição de cerca de 6,2 t/ano de metais tóxicos liberados na água. Segundo a autora, a Companhia Mercantil Ingá, hoje desativada, contribuiu enormemente para a contaminação da baía, sobretudo com concentrações de Cd e Zn. Na década de 1990 houve um rompimento do dique de contenção do rejeito dessa indústria durante um forte período de chuva liberando grandes concentrações de Cd e Zn na baía.

Os metais podem ainda ser introduzidos nos ambientes marinhos através de emissários submarinos e descarga industrial direta (NIENCHESKI et al. 2008), caracterizando um vazamento contínuo, com um impacto mais localizado. Outro ambiente que pode ser fortemente afetado por incremento de metais são as bacias hidrográficas, principalmente àquelas associadas a áreas de mineração, dentre os quais se inclui a mineração de urânio - como uma importante etapa no ciclo de combustível nuclear.

A Unidade Caldas/INB, localizada no município de Caldas (MG), pode ser citada como um exemplo, sendo ela pertencente às Indústrias Nucleares do Brasil, onde a mineração de urânio (U) se iniciou. Uma vez que, na época de sua implantação, a legislação ambiental não era tão rigorosa, a implantação desta unidade, bem como o tratamento das pilhas de rejeito era inadequada. Contudo Fraenkel et al. (1984) menciona que foram tomadas medidas de controle como a impermeabilização da base dessas pilhas. Ainda assim Souza et al. (2013) identificaram concentrações elevadas de U, Sr e Ba nas águas, tanto dentro quanto fora das dependências da unidade, com indício de uma mesma fonte de contribuição, identificada como as pilhas de rejeito.

Cada uma das atividades que impactam o meio ambiente, como o ciclo do U (mineração, beneficiamento, queima e estocagem de rejeito), empreendimentos portuários, metalúrgicos e afins, resulta em uma assinatura geoquímica e isotópica própria, permitindo que se identifique ou infira a origem das possíveis contaminações.

Dentre as assinaturas isotópicas (razões isotópicas) conhecidas, as mais utilizadas são as assinaturas dos isótopos estáveis de Pb, embora outras possam ser usadas conforme abundância e importância na fonte que se deseja estudar. As razões de Pb têm obtido resultados satisfatórios quanto ao rastreamento de fontes isotópicas como gasolina, emissões industriais, esgoto e empreendimentos costeiros, bem como a diferenciação de fontes naturais.

A razão isotópica mais utilizadas para estudos ambientais são  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ , utilizada por Souza (2011) para identificar as fontes de contaminação na Bacia Hidrográfica de São Domingos, pois ambos isótopos têm concentração similar na natureza e são resultado do decaimento do mesmo elemento químico, o U, o que faz com que a dispersão e processos geoquímicos sejam equivalente em proporção.

### 3.3. Razões isotópicas de chumbo aplicadas ao meio ambiente

Além dos usos convencionais de datação, o método de razões de Pb (Pb/Pb), através da assinatura isotópica, pode ser utilizado para: identificar a relação entre as fontes poluentes; definir a taxa de migração dos contaminantes; identificar a assinatura dos reservatórios; definir a influência da poluição advinda de áreas vizinhas; biomarcadores e traçadores biológicos e; através de análises de lixiviação definir a biodisponibilidade do Pb no ambiente.

As fontes que fornecem metais ao meio também podem ser classificadas como fontes pontuais, fontes disseminadas ou uma mistura de ambas. A identificação das fontes naturais é possível devido a características próprias de cada depósito de Pb, que varia de acordo com idade, condição física e geológica no momento da formação (FAURE, 1988), enquanto as características antrópicas são ligadas às matérias-primas utilizadas e processo de manufatura.

A taxa de migração no solo do Pb pode ser definida a partir de sua assinatura isotópica, assim como a fonte desse elemento, seja ela antrópica ou natural. Chow e Earl (1970), por exemplo, identificaram que os poluentes atmosféricos de Pb oriundos da queima de carvão podem ser diferenciados do Pb da gasolina através da assinatura mais radiogênica (razões com valores mais altos) do carvão.

Nas últimas duas décadas a concentração atmosférica de Pb tem diminuído em todo mundo, pois muitos países estão optando por remover o Pb-tetraetila da gasolina (principal fonte emissora por aerossóis), porém ainda há a exposição ao Pb de diversas fontes, tais como: residencial (pelo uso de tintas, produção de lixo, esgoto e afins), contaminação em alimentos, emissões industriais, mineração, exposição a pesticidas etc.

Os equipamentos analíticos para a identificação da assinatura isotópica são os mesmos utilizadas para datação: com a utilização de *Thermal Ionization Mass Spectrometry* (TIMS) e *Inductive Coupled Plasma – Mass Spectrometry* (ICP-MS), porém para a identificação do Pb antropogênico é recomendado também a análise por lixiviação de sedimentos e/ou análises de aerossóis.

#### 4. AMBIENTE MARINHO

*O mar não é um obstáculo: é um caminho.*  
Amyr Klink

Carbonel (2008) considera como ambiente marinho as unidades estuários, zona litorânea, plataforma interna e plataforma intermédia, onde estas podem ser resumidas como: estuário, sendo o ambiente de transição entre o rio e o mar; a zona litorânea representa uma zona marinha que se estende até 1 km da linha de praia; por sua vez a plataforma interna se estende da zona litorânea até a profundidade de 10 a 20m e; a plataforma intermédia se estende da plataforma interna até o talude continental.

O ambiente costeiro é condicionado por diversos agentes e processos, ao qual se inclui taxas de variação do nível do mar, o potencial do fluído disponível para o transporte de sedimentos, o tamanho do fluxo de entrada e de grãos de sedimentos, além da geologia, no fornecimento de explicações para as diferentes paisagens costeiras, resultando em uma série de alterações ao longo do tempo (DOMINGUEZ, 2009).

Com relação à elevação do nível médio do mar, esta pode colocar em contato sedimentos continentais ou estuarinos contaminados com águas salinas, provocando uma mobilização de elementos químicos para a coluna de água (BARCELLOS, 1995). Outros aspectos a serem considerados são as influências de ecossistemas específicos na região costeira, ao qual se inclui mangues (ecossistemas que ocorrem em zonas de maré formando-se em regiões de mistura de água doce e salgadas como estuários, lagoas e baías – ALVES-NETO et al. 2014) e restingas. Clima e aspectos oceanográficos, tais como maré e corrente, são influenciadas por três componentes essenciais: frente fria, regime de ventos e zonas de convergência intertropical e também devem ser considerados (DOMINGUEZ, 2009).

Águas costeiras são sujeitas a mesma sazonalidade de aquecimento e resfriamento que o mar aberto assim como às temperaturas que podem se alternar entre a superfície e profundidade (MANN; LAZIER, 2005), ou seja, o regime térmico das águas depende das condições climáticas, das características hidrodinâmicas e das temperaturas das fontes de calor.

Em caso de poluição térmica (9°C a 22°C a mais que o estado natural), que pode ter origem em diversas fontes, ao qual se inclui refinarias e termoelétricas, essa modificação pode afetar a velocidade de sedimentação. O incremento de temperatura resulta em menor densidade e viscosidade do meio o que fará com que a velocidade de sedimentação aumente



em decorrência da diferença de densidade entre o meio e a partícula (CARBONEL, 2008).

A poluição térmica também resulta em precipitação dos principais óxidos que são misturados ao material particulado, sendo constituído de sulfato e persulfato de amônio (FIGUEIRA; CUNHA, 1998). Também ocorre modificação no processo de precipitação/evaporação, além de modificação no metabolismo de diversos organismos, podendo em casos mais extremos resultar em proliferação e/ou extinção de alguns deles, principalmente dos mais especializados. Tal modificação se configura como um importante impacto ambiental em sua área de atuação, tanto que Godoy (2009) define a poluição térmica como um dos mais importantes impactos provenientes das usinas Angra I e Angra II.

O Ambiente marinho tem como processo controlador a estratificação por longo tempo, onde os nutrientes trocados na coluna d'água podem ser depletados e a renovação pode ser inibida de maneira que a produção primária seja deprimida. A estratificação é quase sempre influenciada pela diferença de temperatura ao longo da coluna d'água, funcionando como camadas estratificadas. Para entender a estratificação da coluna d'água, devem ser considerados os fatores, biológicos e físicos e o fluxo de água doce, que funcionam como grande gerador de estratificação, essa estratificação pode ser destruída pela ação de vento e da maré através da turbulência gerada na água (MANN, LAZIER, 2005).

O aporte de água doce tem salinidade próxima a zero, ou seja, muito inferior a salinidade do mar, sendo esta característica a mais importante nos estuários (CARBONEL, 2008). A água doce é menos densa, concentrando-se na superfície e criando uma inclinação ao longo do fluxo de água gerando estratificação. Esta pode ser independente da diferença de temperatura entre as camadas (MANN, LAZIER, 2005), configurando um sistema complexo de dispersão e acumulação.

Os complicadores no processo de estratificação são: a) as misturas de componentes que podem se estender para o fundo, como a morte de organismos se comportando como material detrítico biológico que tende a se acumular e se decompor no fundo onde os nutrientes gerados podem ser carregados para a superfície e serem rapidamente utilizados na fotossíntese; b) presença de correntes de maré que criam turbulências nas águas, onde a turbulência induz a uma mistura que se estende até a superfície; c) barreira de advecção, a exemplo das águas superficiais que se dirigem para costa por ação dos ventos e, só tem como caminho se deslocar de cima para baixo se a superfície for rica em nutrientes (MANN, LAZIER, 2005).

#### 4.1. Dispersão geoquímica em ambiente marinho

No ambiente marinho os elementos químicos podem ser dispersos, diluídos, redistribuídos e finalmente acumulados no ecossistema, seus processos de dispersão, acúmulo e transporte são influenciados por fatores físicos, químicos e biológicos, sendo o mais complexo o fator biológico (FIGUEIRA; CUNHA, 1998).

O ambiente marinho contém diversas particularidades, que abrangem, desde processos de dispersão e modificação química, até migração mecânica influenciada pela dinâmica das correntes e variações de maré, este ambiente se configura como um ambiente altamente dinâmico com grandes variações horizontais e verticais na distribuição de elementos.

O transporte dos elementos químicos dissolvidos na água ocorre em função de processos próprios da movimentação da massa d'água, sejam eles, difusão e/ou advecção (GOMES, 2010). Os elementos químicos também sofrem processos típicos da sedimentação que incluem reações orgânico-inorgânico co-responsáveis por processos de solubilidade, precipitação, cristalização, compactação, cimentação e gênese de alguns novos minerais e decomposição de degradação de outros.

Os metais em forma dissolvida podem interagir com minerais e componentes húmicos que afetam as propriedades físicas dos argilo-minerais, alterando o comportamento geoquímico de sedimentos marinhos (RASHID, 1985). Nas zonas costeiras, a desembocadura dos rios pode afetar as concentrações de metais no ambiente.

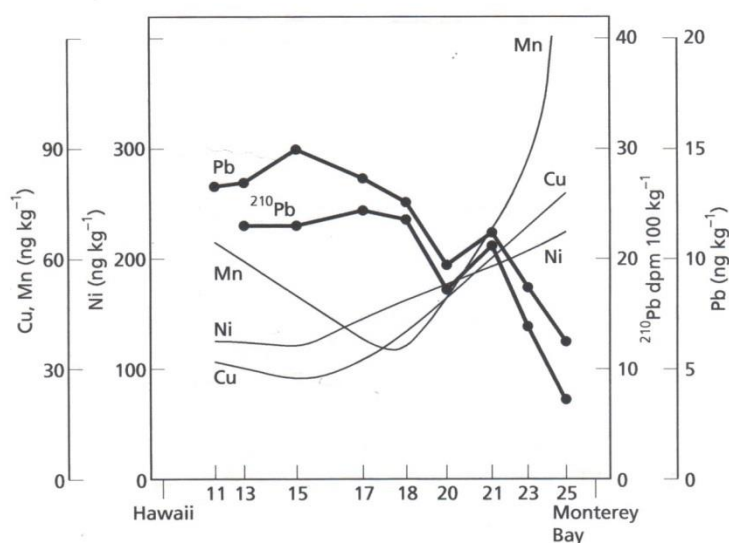
A distribuição de elementos traços na superfície marinha ocorre de acordo com três fatores, segundo Chester (2000): suas fontes, ou seja, fornecimento e entrada de elementos; a remoção dos elementos através de sua reciclagem sob a forma de nutrientes e; circulação superficial de águas oceânicas que superpõem os mecanismos de entrada e saída de elementos. Os ciclos de suspensão e ressuspensão de material particulado também devem ser considerados, pois resultam em uma redistribuição interna de sedimento podendo promover o deslocamento de elementos traços por longas distâncias.

Tanto a superfície como as zonas mais profundas do ambiente marinho são reativas a elementos traços, sua distribuição vertical é governada pelas espécies químicas que eles formam, incluindo nutrientes, associados a ciclos biogeoquímicos, oxigênio dissolvido e suas reações redox e, material particulado (CHESTER, 2000). Os processos de dispersão e advecção também podem ser afetados, segundo estudo realizado por Gomes (2010), por variações meteorológicas. Ainda assim, as águas próximas à costa são enriquecidas em compostos húmicos que são capazes de reagir com diversos constituintes inorgânicos e cuja

reação vai depender da natureza e característica desses compostos, natureza das argilas, composição da água e condições de pH, norteadas inclusive a condição de estabilidade das ligações químicas formadas (RASHID, 1985).

Os elementos C, Co, Ni e Sr que também têm relação com usinas nucleares, terão comportamento definido (de forma geral), onde elementos como C e Ni são acumulados nos oceanos como nutrientes disponíveis ou na forma biótica, enquanto Co, Pb e Sr são depletados ao longo da coluna d'água (Figura 2) (CHESTER, 2000).

Figura 2 - Elementos traços nas águas superficiais do Pacífico Norte



Fonte: CHESTER, 2000

Nos oceanos e mares os radionuclídeos artificiais dispersos provêm de testes e acidentes nucleares e, da liberação de material radioativo de efluentes de reatores e usinas de reprocessamento, sendo distribuídos pelo *fallout* (fenômeno que ocorre em uma explosão nuclear, onde todo o material é vaporizado pelo intenso calor gerado) e circulação oceânica (FIGUEIRA; CUNHA, 1998).

Os principais radionuclídeos introduzidos por “*fallout*” nesses ambientes são: <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, e <sup>239</sup>Pu, onde o <sup>137</sup>Cs se encontra presente na coluna d'água como íons simples, e estão sob ação de dispersão em função da diluição no mar, podendo participar de reações de troca com partículas em suspensão, principalmente argilas. O <sup>90</sup>Sr por sua vez pode participar em reações de equilíbrio com carbonato e devido a similaridade química com o cálcio (Ca), sofrer uma ação de fixação no meio marinho por vezes sendo adsorvido em sedimentos, ossos, carapaças e corais (FIGUEIRA; CUNHA, 1998).

O fornecimento de Ni nos mares se dá por deposições atmosféricas e difusão de

sedimentos, onde seu transporte horizontal para o oceano franco ocorre por processos de difusão e advecção (CHESTER, 2000). O tempo de residência de elementos como Co, Cs, Ni, Pb, Th e U variam conforme suas propriedades químicas, incluindo estado de valência e solubilidades, contudo, em compilação de dados de diversos autores, Chester (2000) observou tempo de residência na ordem de  $10^4$  a  $10^6$  anos para Cs, Ni e U, e na ordem de  $10^2$  a  $10^3$  anos para Co, Pb e Th. Compreendendo a dinâmica de dispersão dos elementos químicos no mar, é possível rastrear suas prováveis fontes, assim como a abrangência de sua influência e, compreender o comportamento dos elementos que terão impacto direto nos ecossistemas locais.

Uma vez definido o comportamento de um elemento químico de forma geral, sabe-se que a diferenciação posterior de seus isótopos será em função de sua característica isotópica, sendo assim, diversos isótopos podem ser utilizados. Contudo os isótopos mais estudados em ambiente marinho, geralmente são isótopos estáveis, pois as características de seu fracionamento são bem definidas. Os isótopos são escolhidos em função de sua grande abundância como oxigênio (O) e hidrogênio (H) (e deutério) ou devido a sua aplicação nos processos biogeoquímicos, como enxofre (S) e nitrogênio (N).

O fracionamento isotópico entre duas substâncias ou fases obedece, segundo Burdige (2006), a três processos: equilíbrio entre reações isotópicas, que envolve a redistribuição de isótopos de um elemento em diferentes moléculas que os contêm; processos cinéticos irreversíveis, cujas taxas de reação são dependentes da composição isotópica do reagente e do produto e; processos físico-químicos cuja difusão ou evaporação/precipitação são controlados pela relação entre diferença de massa e temperatura ou concentração dos isótopos em questão.

Parte da radiação e elementos radioativos encontrados em regiões costeiras, não se restringe a atividade antrópicas, ocorre por vezes ligado à concentração de minerais enriquecidos nestes elementos. Como exemplo tem-se areias monazíticas (fosfato de terras raras), que são enriquecidas em  $^{232}\text{Th}$  e  $^{238}\text{U}$  e que, segundo Freitas e Alencar (2004) são encontradas em abundância no Brasil (Ilha Grande e adjacências, Guarapari, etc.), Índia, Bangladesh e Sul da Austrália.

## 5. ÁREA DE ESTUDO

*Uma vez por ano vá a algum lugar onde nunca esteve antes.*  
Dalai Lama

### 5.1. Localização

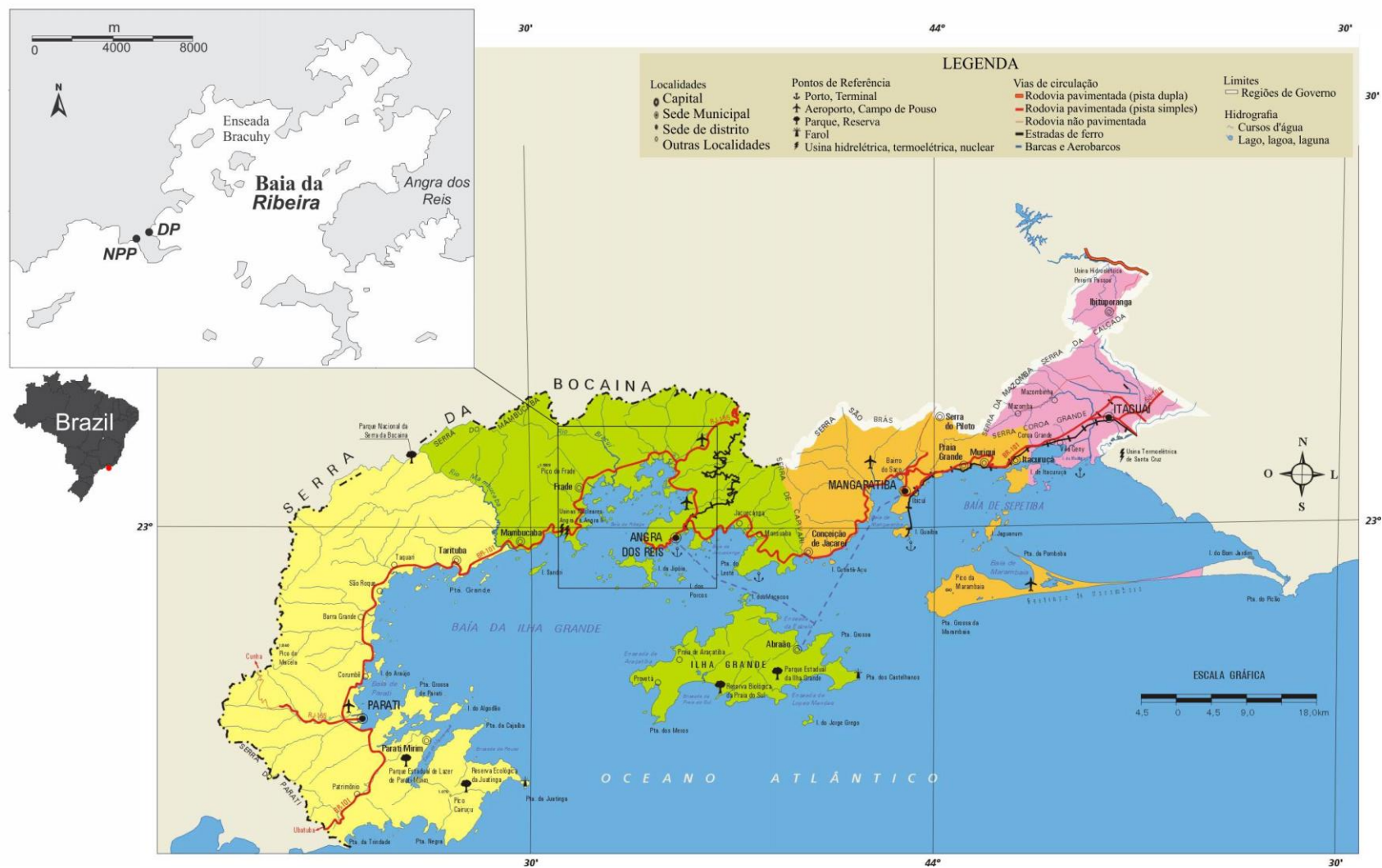
A área de estudo se situa na Costa Verde do estado do Rio de Janeiro (Figura 3), que abrange desde o município do Rio de Janeiro, na região de Sepetiba ao município de Paraty. Os dois municípios são interligados pela Rodovia Federal – BR101 (conhecida como Rio-Santos). A Costa Verde se configura como uma costa composta por corpo de água separado do mar aberto pela Ilha Grande, que a divide em dois corpos menores (porção Leste e Oeste) interligados pelo Canal Central da Baía de Ilha Grande (MAHIQUES 1987).

Segundo a definição da Marinha do Brasil a baía da Ilha Grande se estende desde a ponta da Guaratiba até a ponta da Juatinga e é composta por outras baías menores como Sepetiba, Mangaratiba, Jacuacanga, Ribeira e Paraty (DHN, 2013). Contudo para fins de melhor visualização, neste trabalho foi denominada como baía de Sepetiba a área compreendida entre o canal da Ilha Grande e a ponta de Guaratiba e, como baía de Ilha Grande a área entre a ponta de Juatinga e o canal da Ilha Grande. Cartograficamente, estão localizadas na folha Ilha Grande (1:250.000 / SF-23-Z-C) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A porção Oeste (baía de Ilha Grande) se estende desde o município de Paraty até o município de Angra dos Reis, onde estão situadas as enseadas (embora alguns autores as definam como baías) de Paraty, Ribeira e Angra dos Reis, além da praia do Frade e de Itaorna. A porção Leste (baía de Sepetiba) se estende do município de Angra dos Reis até o município do Rio de Janeiro, sendo a localidade das enseadas de Sepetiba, Marambaia e Mangaratiba.

As usinas Angra 1 e Angra 2 formam a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) e ficam localizadas no município de Angra dos Reis, na Praia de Itaorna cujo acesso também se dá pela rodovia BR-101. O resfriamento da usina é feito na água do mar, onde o deságue de seus efluentes é no Saco de Piraquara de Fora na enseada da Ribeira (GODOY, 2009; GOMES, 2010).

Figura 3 - Mapa de localização da área de estudo, com destaque as usinas (NPP) e descarga de efluentes (DP).



Fonte: Modificado de FUNDAÇÃO CIDE (2013) e GOMES et al. (2011).

## 5.2. Aspectos Socioeconômicos

A urbanização da área de estudo resultou em uma ocupação do solo de forma desordenada com o conseqüente aumento da concentração populacional em torno das sedes municipais e que não foi acompanhado dos devidos investimentos no setor de saneamento básico. Atualmente estima-se que os esgotos domiciliares, produzidos pela população local, degradam diretamente a qualidade sanitária das águas que fluem no lençol freático.

As duas porções da Costa Verde (leste e oeste) têm atividades predominantes distintas. A baía de Sepetiba (a leste) é predominantemente pesqueira, industrial e portuária, enquanto na baía de Ilha Grande (a oeste) o predomínio é de atividade turística, embora também existam portos e atividade pesqueira na região.

### 5.2.1. Empreendimentos da Costa Verde e seus efluentes metálicos associados

A maior parte das empresas que se situam na Costa Verde se instalou no final do século 20 (ALVES-NETO et al. 2014). As atividades industriais e portuárias da região encontram-se concentradas nos distritos industriais de Queimados, Itaguaí, Campo Grande e Santa Cruz na baía de Sepetiba e enseada de Angra dos Reis. A região contém ainda núcleos urbanos e bacia hidrográfica dos rios que ali deságuam com uma crescente atividade agrícola (de frutas e hortaliças) e pesca, além de importantes resquícios de vegetação primária como a mata atlântica (na encosta da Serra do Mar), restinga (em Marambaia) e mangue (BARCELLOS, 1995).

Segundo Morales (2012) e Alves-Neto et al. (2014) a região apresenta um histórico de contaminação em Zn e Cd, além de concentrações significativas de Pb, Hg, dentre outros metais. A principal responsável pelos níveis elevados desses elementos é a Companhia Mercantil e Industrial Ingá ao qual se estima que foram descarregados cerca de, 24 toneladas de Cd e 3660 toneladas de zinco por ano na baía de Sepetiba, sendo o Zn introduzido em 1966 e o cádmio em 1974. Tal indústria iniciou sua construção no final da década de 1950 e encerrou suas atividades no ano de 1997. Cd e Zn também são fornecidos por empreendimentos situados ao longo do rio Guandu, principal rio a desaguar na baía de Sepetiba (ALVES-NETO et al. 2014).

Outro empreendimento de importância na região de Sepetiba tem relação com a importação de fertilizantes fosfatados utilizado na agricultura sendo então incorporado ao sistema de drenagem da baía, além de lixo doméstico, embora essa fonte seja considerada de

menor impacto (BARCELLOS, 1995).

Barcellos (1995) e Alves-Neto et al. (2014) afirmam que diversos elementos-traço (Pb, Cd, Zn, Cu, Cr e Hg além de As) são acumulados nas margens nordeste e leste da baía de Sepetiba, onde ocorre uma alta ressuspensão de sedimentos juntamente com a uma elevada produção e acumulação de matéria orgânica, que contribuem para o processo de adsorção. Contudo Barcellos (1995) afirma que o Pb é retirado da coluna d'água da região de Sepetiba através da dinâmica de sedimentação.

Por sua vez a região de Angra dos Reis, além das usinas Angra I e II e sua estação de arrefecimento na enseada da Ribeira, apresenta o Porto de Angra dos Reis, o Terminal da Baía da Ilha Grande (TEBIG) e o Estaleiro Verolme. O estaleiro Verolme se instalou em 1959, resultando em um crescimento populacional na região; em 2000 foi vendido para Keppel Fels Brasil S.A., passando a se chamar BrasFels cujo principal objetivo é atender ao mercado de construção naval e *offshore* de óleo e gás. A fabricação de navios pode resultar em contaminação, por diversos metais, aos quais se destaca o manganês (Mn) (RAMOS, 2013).

O TEBIG foi desenvolvido para atracação de navios petroleiros e funciona como área de estocagem e transporte de óleo e petróleo, recebe 18 navios por mês. O porto de Angra dos Reis trabalha com produtos específicos, principalmente trigo por importação e exportação de produtos da Companhia Siderúrgica Nacional. Na construção naval as principais etapas que resultam em exposição a metais são: jateamento, tratamento de superfícies, goivagem e solda, processos que liberam particulados, poeiras e fumos no ar, contendo elementos como o Cd, Cu, Mn, Pb, entre outros (MIRANDA, 2013).

Na indústria naval, o Pb está presente nos processos de solda e de pintura das estruturas navais (MIRANDA, 2013) e devido ao seu baixo ponto de fusão e à facilidade de trabalho tem sido usado em folhas de Pb, produtos de latão e bronze, entre outros (MOREIRA; MOREIRA, 2004).

O Mn é usado em várias ligas com Al, Cu, Fe, Pb, Sn e/ou Zn, onde a maior parte do Mn produzido no mundo, é utilizada em metalúrgicas, fabricação de ligas ferromanganês e ferrosílicomanganês, além de produção de esmalte porcelanizado e fósforo de segurança. Na forma de minério: em pilhas secas; cerâmica; suplementos alimentares; fertilizantes; fungicidas; eletrodos de solda; ligas de Cu e Ni utilizadas na indústria elétrica; entre outras (MIRANDA, 2013).

O Cd não é encontrado puro na natureza, mas associado a sulfetos em minérios de Cu, Pb e Zn. Industrialmente, é empregado sob a forma de compostos, utilizados em pigmentos e produtos químicos. Sua utilização é restrita, com aplicações principalmente em cinco



categorias: (a) revestimento do aço e ferro; (b) estabilizador para cloreto de polivinila (PVC); (c) pigmentos para plástico e vidro; (d) baterias de níquel-cádmio; (e) ligas e outros usos tais como fotocélulas, semicondutores e reatores nucleares, entre outros (CARDOSO; CHASIN, 2001. MIRANDA, 2013).

Por sua vez o Cu é amplamente utilizado na indústria elétrica e na fabricação de ligas metálicas como o latão (Cu e Zn), bronze (Cu, Sn e Zn), alumínio bronzeado (Al e Cu), cobre-níquel, entre outros, pois o Cu é um excelente condutor de calor e eletricidade (FIT, 2012). Por fim o níquel (Ni) é utilizado principalmente nas ligas de aço inoxidável e em outras ligas resistentes à corrosão em indústrias de maquinaria pesada, automóveis e componentes elétricos (MIRANDA, 2013).

### 5.3. Geomorfologia

A Ilha Grande apresenta altitude máxima de 1.031m, sendo uma área bastante montanhosa. Ocorrem formações sedimentares continentais, marinhas, lagunares e paludais de idades entre Pleistoceno e Holoceno (AMADOR, 1988).

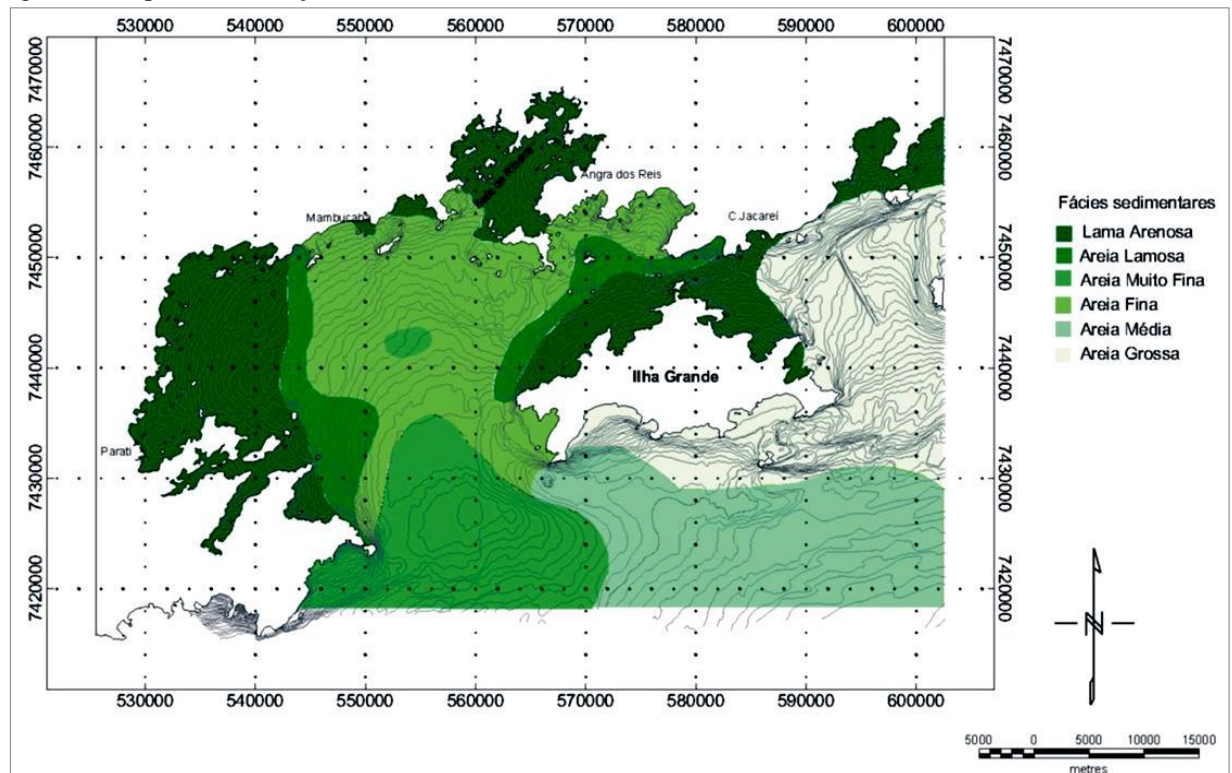
A baía da Ilha Grande apresenta uma área de 1125 km<sup>2</sup>. A parte oeste costuma ser dividida em três partes – a enseada de Paraty, de Angra dos Reis e de Ribeira. A costa litorânea de Paraty é bastante recortada, com extensão aproximada de 180 km. Segundo Amador (1988) mudanças paleoambientais, dentre elas variações do nível do mar e climáticas, são responsáveis pela construção da morfologia atual.

Nos locais onde a serra e o mar se encontram, existe, junto a linha d'água, um nível cascalhoso (cujos seixos são provenientes das montanhas e são retrabalhados por ação das águas). Na parte sul do litoral de Paraty as montanhas da Serra do Mar terminam diretamente no oceano, nesse trecho o fundo do mar é formado, em sua maior parte, por areia () e, a vegetação no continente é a floresta da Mata Atlântica. Na parte norte existe uma planície separando o mar das montanhas, neste trecho, as marés mais altas invadem a planície, originando uma vegetação típica de mangue.

Gomes et al. (2011) afirmam que o aporte de sedimento na área da baía pode ter duas fontes, uma é da Ilha Grande e outra de escoamentos e deslizamentos das adjacências, como ocorrido em 1985, que destruiu a antiga estação de monitoramento da usina e a estrada de acesso. Conjuntamente há interação entre os sedimentos das baías Ilha Grande e Sepetiba que têm como sedimentação areia, responsáveis pela formação de bancos de areia, silte e argila

com uma taxa de sedimentação 0,30 a 1,0 cm por ano (GOMES, 2010. ALVES-NETO et al. 2014), nessa região Belo et al. (2002) identificou oito faces sedimentares.

Figura 4 - Mapa de distribuição de fácies sedimentares

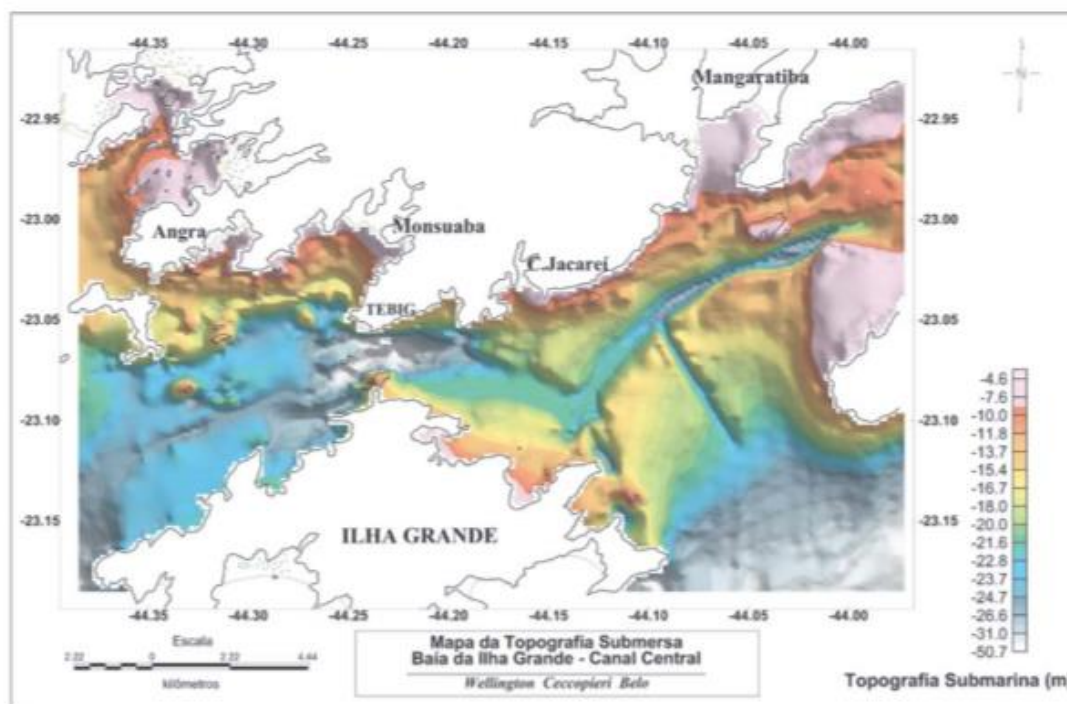


Fontes: DIAS et al. (1990) apud GOMES (2010). MEDEIROS; DIAS, 2005.

Belo et al. (2002) confeccionou um mapa batimétrico da região do canal da Ilha grande que abrange as enseadas de Mangaratiba, Angra dos Reis e Ribeira (Figura 5). Segundo Franklin (2001) o leito marinho da baía de Ilha Grande apresenta profundidades de até 45m. Na porção central da baía se destaca maior variação granulométrica segundo mapa de Dias et al. (1990 apud Gomes, 2010).

O canal da Ilha Grande que conecta ambas as baías (Ilha Grande e Sepetiba) apresenta, segundo Belo et al. (2002) uma profundidade de 55 metros, onde no lado oeste do canal as profundidades variam entre 20 e 30 metros e no lado leste 10 a 25 metros. Ainda segundo os autores são observados dois canais dragados com profundidade entre 24 e 25 metros para acesso ao Porto de Sepetiba e a TEBIG, respectivamente.

Figura 5 - Mapa batimétrico digital da região do canal central da baía da Ilha Grande.



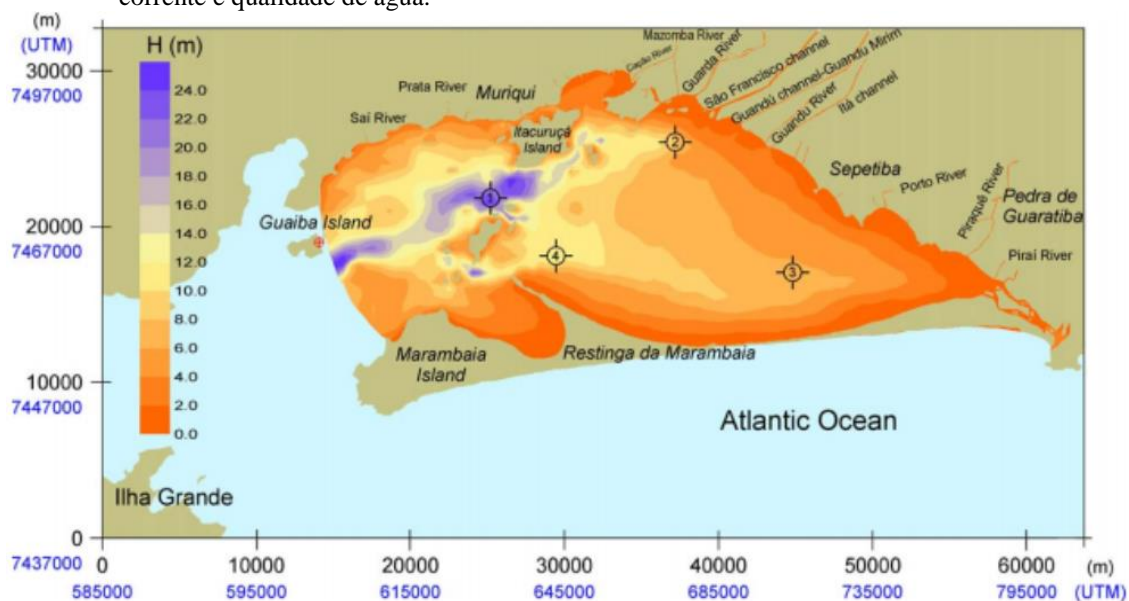
Nota: Tamanho de célula 45m e intervalo de contorno 3m. Métodos de gridagem utilizados: kriging e mínima curvatura (mascarado). Re-processamento do gride original do mapa batimétrico de Dias et. al. (1990).

Fonte: BELO et al. 2002.

Na baía de Sepetiba há uma intensa deposição de sedimentos na área litorânea central, junto às embocaduras dos rios, além de simultaneamente erosão do sedimento de fundo da porção sul, junto à Restinga de Marambaia. Os sedimentos de origem fluvial encontram-se restritos às áreas costeiras e à porção leste da baía, com grandes extensões de bancos de areia próximas às ilhas de Jaguanum e Itacurussá e região vizinha à Restinga de Marambaia. Uma região intermediária, dominada pela fração silte, ocupa o centro da baía de Sepetiba (BARCELLOS, 1995), enquanto o fundo da baía apresenta fração argilosa (VILLENA et al. 2003).

A baía de Sepetiba apresenta até 30m de profundidade na enseada de Mangaratiba, na enseada de Sepetiba é observada o predomínio da fração argilosa. Contudo junto à restinga da Marambaia existe um gradiente mais elevado (VILLENA et al. 2003). Segundo mapa confeccionado por Cunha et al. (2006) a área da baía de Sepetiba apresenta profundidade crescente a partir do fundo da baía (junto ao continente e restinga de Marambaia) em direção a enseada de Mangaratiba junto a ilha Guaíba (Figura 6).

Figura 6 - Batimetria da baía de Sepetiba, com destaque aos principais rios e estações de controle de corrente e qualidade de água.



Fonte: Cunha et al. 2006

Na região de estudo o processo de erosão tem sido acentuado em função de diversas atividades antrópicas, ao qual se inclui construção de portos, dragagem de canais, desmatamento e rodovias (PEREIRA; POÇOS, 2009).

#### 5.4. Clima

A principal estação meteorológica da área de estudo se localiza no município de Angra dos Reis. O índice pluviométrico varia entre 343 a 734 mm, onde as épocas de estiagem estão compreendidas entre os meses de maio e novembro e os meses de chuva entre os meses de dezembro e abril (Tabela 1).

Segundo Oliveira Júnior et al. (2010) a região de Angra dos Reis apresenta um comportamento meteorológico complexo, influenciados pela topografia, interação oceano-continente e atuação de sistemas de mesoescala. O regime de ventos é constante com velocidades acima de 0,36 m/s, direção predominante S-N e com maior instabilidade durante o verão, sobretudo no período entre 12 e 18h (em média).

Os ventos definem a temperatura e a claridade da água: os ventos sul e sudoeste aumentam a turbidez e esfriam a água, enquanto os de leste e norte esquentam e diminuem a turbidez da água (GOMES, 2010). A baía da Ilha Grande é uma baía fechada, abrigada do mar aberto por várias ilhas e penínsulas, apresenta-se como um local ideal para o cultivo

marinho. No município de Paraty existem cinquenta e cinco ilhas, dez lajes cujas pontas estão acima do nível d'água e dezessete lajes submersas e mais afastadas da costa.

Tabela 1 - Precipitação padrão no Município de Angra dos Reis (RJ)

<b>Climatologia da Faixa Normal (Tercil Médio)</b>			
<b>- Referência para o Prognóstico Climático -</b>			
<b>Dados da Estação</b>			
NOME	Angra dos Reis		
UF	RJ		
Código	83788		
Latitude (°)	-23,0167		
Longitude (°)	-44,3167		
Altitude(m)	3		
Trimestre	Precipitação Acumulada no Período (mm)*		
	Limite Inferior da Faixa Normal	Média	Limite Superior da Faixa Normal
jan-fev-mar	613	675	788
fev-mar-abr	522	615	719
mar-abr-mai	431	503	540
abr-mai-jun	281	343	386
mai-jun-jul	189	248	229
jun-jul-ago	183	221	247
jul-ago-set	254	256	294
ago-set-out	302	349	405
set-out-nov	375	433	490
out-nov-dez	490	592	617
nov-dez-jan	570	695	788
dez-jan-fev	642	734	801

Fonte: INMET (2012), dados de 1961 a 2010.

Segundo Franklin (2001) comparando os resultados das diferentes estações meteorológicas, pode-se perceber a existência de diferentes domínios de ventos, quais sejam: ventos de circulação geral e ventos de regime local. Tal fato ocorre em função da área estudada possuir uma topografia acidentada, com uma linha de costa irregular. As montanhas favorecem seu próprio regime local de ventos diurnos e noturnos e o oceano por sua vez, forma as brisas do mar com alcance de mesoescala. Os regimes de vento desses sistemas interagem com o sistema de ventos da circulação do Planeta.

## 5.5. Hidrologia

As águas costeiras da baía da Ilha Grande estão sujeitas ao aporte intenso de sedimentos, em função de eventos frequentes de deslizamentos de encostas e de margens fluviais. Isto é consequência do desmatamento e do regime pluviométrico, resultando em processo de assoreamento de origem antrópica, o que influencia na dinâmica sedimentar da área e que pode receber aporte de sedimento da baía de Sepetiba (GOMES, 2010). A baía de Sepetiba recebe um grande volume de água do rio Guandu pelo sistema Paraíba do Sul e contribuições das bacias hidrográficas dos rios Cabuçu-Piraquê, Portinho e Piracão, (ALVES-NETO et al. 2014).

Os municípios com maior média de pluviosidade anual se configuram como uma das regiões de maior entrada de água no sistema aquífero cristalino, na qual a região de Paraty e Angra dos Reis são contempladas com as classes de recarga alta a muito alta devido a presença da Serra do Mar nesta localidade (CARDOZO et al. 2011). Segundo Barcellos (1995) a entrada anual de água doce para a Baía de Sepetiba é de  $7,6 \times 10^9 \text{ m}^3$ , correspondente a um tempo de residência de 4 dias. Cerca de 75% desta vazão ( $5,7 \times 10^9 \text{ m}^3$ ) tem origem no exterior da bacia de drenagem de Sepetiba, através da transposição de águas do Rio Paraíba do Sul, sendo esta uma contribuição que diminui o efeito de chuvas locais sobre o regime hidrológico e atenua as possíveis flutuações sazonais de aporte de água doce.

## 5.6. Dinâmica Costeira

Franklin (2001) realizou um estudo de estado da arte, no qual descreveu que, Matsuura (1986) diferenciou as massas de água da região em: “1- Água Tropical (AT) - definida por uma salinidade superior a 36 e uma temperatura acima de 20°C, demarcando o limite da Corrente do Brasil; 2- Água Central do Atlântico Sul (ACAS) - é definida como uma massa de água fria, com temperaturas variando entre 14°C e 18°C, proveniente do talude continental a uma profundidade de 200 a 300 m; 3- Água Costeira (AC) – definida como uma massa de água que margeia a linha de costa, com temperatura e salinidade superiores a 15°C e 35, respectivamente. 4- Água de Plataforma (AP) – definida como uma massa de água proveniente da ACAS misturadas com AC e AT. São caracterizadas por temperaturas variando entre 20°C a 26°C e uma salinidade intermediária entre 35 e 36”, onde as correntes do Brasil viriam do norte em direção a sudoeste e paralela ao talude continental.

### 5.6.1. Maré

Segundo a DHN (2013) a região da Costa Verde apresenta maré com característica de desigualdades diurnas, o nível médio da maré fica 0,8m acima do nível de redução da carta, no porto de Itaguaí e na ilha da Madeira; e 0,7m na ilha Guaíba e no porto de Angra dos Reis. As correntes são geralmente causadas pelos ventos fortes, principalmente nos canais mais estreitos.

Na Baía de Ilha Grande a maré da região é semidiurna caracterizada pela ocorrência de duas preamares e baixas-marés ao longo do dia, onde há uma grande paridade dos valores de amplitudes e fases das constantes harmônicas homólogas, sendo a maré lunar com maior amplitude. Na baía é observada uma velocidade média de corrente de 0,10 m/s, o sentido é horário, influenciada pela maré (FRANKLIN, 2001. CORRÊA, 1994).

Outro importante aspecto da circulação local é a presença de oscilações periódicas observadas em um período de 24h a uma profundidade superior a 10 m, obtidas a partir de estações oceanográficas ao redor da Ilha Grande. Todos os registros apresentavam uma oscilação de duração entre 10 a 20 minutos, que aconteciam em intervalos de uma hora, podendo atingir o período de 6 horas no canal central (IKEDA; STEVENSON, 1980 apud FRANKLIN, 2001). O período de oscilação de 6 horas com o mesmo intervalo de observação foi obtido por Corrêa (1994), podendo atingir 4,8 horas no canal da Ilha Grande e 3,4 horas na baía de Sepetiba.

A maré da baía de Sepetiba é semidiurna apresentando duas preamares e duas baixas-marés, do tipo micromaré, com os períodos de maré influenciados pela morfologia da costa e pela batimetria. A diferença de altura entre as marés é provocada pela diferença entre intensidades de correntes vazante e enchente (VILLENA et al. 2012. ALVES-NETO et al. 2014).

### 5.6.2. Densidade, temperatura e salinidade

A densidade das águas do ambiente marinho aumenta com a profundidade, mas não de uma forma uniforme. Nas regiões equatorial e tropical: há uma camada superior de densidade praticamente uniforme, depois há uma camada na qual a densidade aumenta rapidamente com a profundidade, chamada pycnoclina; abaixo desta, a densidade aumenta lentamente com a profundidade (FRANKLIN, 2001).

Miranda et al. (1977) realizou levantamento de temperatura e salinidade com medição de 12 horas (8h às 20h30) onde obteve temperaturas em águas superficiais entre 20,2°C e

20,6°C e salinidade 35,4 a 35,6 na região entre a restinga da Marambaia e a enseada de Paraty. Teixeira et al. (2009) obteve na enseada da Ribeira salinidade de 34,5, enquanto Guimarães e Penna-Franca (1985) obtiveram temperatura média de 26°C e salinidade entre 28 e 36.

Franklin (2001) levantou informações de correntes em que foram medidas velocidades entre 0,06 e 0,08 m/s na região de Piraquara de Fora (ANEXO IV), ao qual atribuiu a descarga das usinas Angra I e Angra II, com medição de 10 horas e amostragem a cada meia hora. Acredita-se que a circulação local induzida pela maré seja bastante fraca. Os efluentes da CNAAA têm, segundo Teixeira et al. (2009) vazão de 40 e 80 m<sup>3</sup>/s para Angra I e Angra 2, respectivamente, e temperatura entre 29,5°C e 36,5°C de acordo com a sazonalidade.

Segundo Suzuki et al. (2013) e Cunha et al. (2006) na baía de Sepetiba a temperatura fica em torno de 26°C, enquanto a salinidade média é de 32, com variações apenas nas zonas estuarinas.

Há diversos indícios de interação entre as baías da Ilha Grande e Sepetiba. Segundo Miranda et al. (1977) existe uma frente salina entre a Ilha Grande e a Restinga de Marambaia onde um fluxo d'água de baixa salinidade tem interação com as águas costeiras mais salinas, assumindo que as água da baía da Ilha Grande são mais salinas e mais quentes do que as águas da baía de Sepetiba. Segundo Gomes (2010) a água salgada da plataforma continental, entraria na baía através da Baía de Ilha Grande, circundando em seguida a Ilha Grande, para então entrar em contato com água com menor grau de salinidade, proveniente da Baía de Sepetiba, retornando, ao oceano.

### 5.6.3. Correntes

Estudo realizado por Corrêa (1994), com observação de 24h em cinco estações oceanográficas em diferentes profundidades, identificou que existem diferenças entre a velocidade e direção de corrente na superfície e junto ao fundo das baías. Segundo o autor, na Costa Verde predomina a velocidade de corrente de 0,10 m/s e direção com sentido nordeste na superfície, ou seja, para dentro das baías. Há preferência do sentido sul das correntes junto ao fundo, sendo a velocidade na baía de Sepetiba de 0,11 m/s e na baía de Ilha Grande de 0,05 m/s.

Guerra e Marques (2005) analisaram séries temporais coletadas em 1994 na região do Canal Central da Ilha Grande com 340 horas de medição, e observaram a presença de um padrão bidirecional das correntes com assimetria para leste, tanto em superfície como



próximo ao fundo e, velocidade que pode atingir 0,70 m/s na superfície (5 m). Por outro lado Corrêa (1994) afirma que neste canal o padrão é unidirecional de oeste para leste no Canal da Ilha Grande com velocidade de corrente em 0,30 m/s. Ainda no Canal Central, fundeio de curta duração (20 a 25 horas), documentaram eventos em que correntes dirigidas para oeste-noroeste, são associadas a valores mais elevados de Material Particulado em Suspensão – MPS (GUERRA; SOARES, 2009).

Na baía de Sepetiba, Villena et al. (2012) afirmam que os picos de velocidade máxima das correntes ocorrem próximo a metade do período de enchente ou vazante. Os valores são 0,40m/s e 0,60m/s respectivamente, segundo Cunha et al. (2006) com período de observação de 16 dias. Villena et al. (2012) descrevem ainda que, na área de estreitamento da restinga da Marambaia formam-se duas correntes, a primeira costeando o litoral e a outra cruza a baía em direção a restinga, gerando uma corrente bifurcada para leste e para oeste.

## 5.7. Geologia

A geologia regional da área compreende unidades do embasamento pré-Cambriano, corpos alcalinos Cretáceos e planícies litorâneas Quaternárias. As rochas do embasamento são representadas por gnaisses charnockíticos e granitos intercalados de rochas máficas provavelmente de idade Neoproterozóica. Os sedimentos Quaternários compreendem planícies costeiras abrangendo sedimentos fluviais, de canais de maré e de mangue. O arcabouço geomorfológico da região possui íntima relação com as direções das estruturas observadas nas rochas Pré-Cambrianas. Os sedimentos apresentam disposição que indica o alinhamento a estruturas rúpteis Mesozóicas ou Cenozóicas que devem ter orientado a evolução do relevo na região (PEREIRA, 1998).

As sequências sedimentares Quaternárias e Neógenas apresentam continuidade na direção da plataforma continental da Bacia de Santos, onde ocorrem outras sequências sedimentares mais antigas (Paleógenas e Cretáceas), englobadas nas fases rifte transicional evaporítica e marinha (transgressiva e regressiva) da margem continental (PEREIRA, 1998).

### 5.7.1. Geologia Regional

A província Mantiqueira foi formada durante a orogênese Brasileira, no qual se localiza no Sul e Sudeste do Brasil, sendo caracterizada como um sistema orogênico de idade Neoproterozóico (HEILBRON et al. 2004, homólogo sul-americano da orogênese Pan-

Africana (HEILBRON; MACHADO, 2003). Está associada à amalgamação do Gondwana e, se deu pela convergência entre os blocos dos crátons do Congo-Kalahari (lado africano) e do São Francisco-Rio De La Plata/Paraná (lado sul-americano) mantido estável até 520 Ma (TEIXEIRA; GAUCHER, 2004).

A província Mantiqueira se divide em três segmentos: a) setentrional: Orógeno Araçuaí; b) central: Orógenos Ribeira, Apiaí e a porção sul do Orógeno Brasília; c) meridional: Orógenos Dom Feliciano e São Gabriel (HEILBRON et al. 2004), sendo que geologicamente a área de estudo se insere no Orógeno Ribeira, também denominado Faixa Ribeira.

A Faixa Ribeira se sub-divide em cinco terrenos tectono-estratigráfico descritos por Heilbron et al. (2004) e Eirado et al. (2006) como: Klippe Paraíba do Sul, caracterizada por uma estrutura sinformal sobrejacente ao domínio Juiz de Fora, sendo composto de ortognaisses Paleoproterozoico e rochas metasedimentares, metamorfisados fácies anfíbolito; Terreno Embu formado por granitoides sin-orogênicos; Terreno Cabo Frio que é composto de ortognaisses de composição graníticas a granodiorítica cortado por ortoanfíbolitos, cuja idade U/Pb em zircões detríticos é determinada por Schmitt et al. (2004) em 2,5 Ga (rochas arquenais), 2,0 Ga (paleoproterozóicas) e de 1,0 Ga e 800-600 Ma (neoproterozóicas); Terrenos Ocidental e Oriental, separados zona de cisalhamento, na borda noroeste do Arco Magmático Rio Negro.

#### Terreno Oriental

A área de estudo se localiza na porção sul da Faixa Ribeira, está inserida no Terreno Oriental, especificamente no Domínio Costeiro. Este terreno abriga o Arco Magmático Rio Negro, com idade entre 610 e 580 Ma (TUPINAMBÁ et al., 1998), está compartimentado em três Domínios Tectônicos distintos que, da base para o topo, são: Domínio Tectônico Cambuci, Domínio Tectônico Costeiro e *Klippe* Italva (MARQUES, 2009).

As principais associações litológicas identificadas neste terreno são anfíbolito, gnaisses intercalados com quartzitos, mármore e camadas calcissilicáticas foliado e; rochas graníticas não-foliadas. Em contraste com os Terrenos Ocidental e Cabo Frio, todas as rochas deste Terreno são Neoproterozóico ou mais jovens (HEILBRON; MACHADO, 2003).

O Domínio Cambuci tem como litologia rochas metamorfisadas em fácies anfíbolito superior a granulito, cujo protólito é uma sucessão vulcano-sedimentar (TUPINAMBÁ et al., 2007), sendo estruturado por zonas de cisalhamento de baixo a médio ângulo, intensamente redobrada (MARQUES, 2009). O Domínio Costeiro, tal como o Domínio Cambuci,

apresenta rochas metamorfisada em fácies anfibolito superior a granulito, cujo protólito sedimentar tem interação com granitoides do Arco Rio Negro e cuja afinidade é Calcioalcalina. A Klippe Italva apresenta como litologia dioritos e gabros sob o Grupo Italva composto por conjunto vulcano-sedimentar, com abundante ocorrência de mármore e anfibolito (MARQUES, 2009).

### 5.7.2. Geologia Local

Na região são identificadas suítes emersas Neoproterozóicos a Fanezoróico (Cambriano) com plútons correlatos das fases pré, sin e tardi-colisional (CPRM, 2000).

#### Domínio Costeiro

Segundo Heilbron e Machado (2003) o Domínio Costeiro apresenta alto grau de anatexia formando paragêneses típicas de metatexito e diatexito. Estruturalmente está justaposto ao terreno Ocidental, limitado por uma zona milonítica. O Domínio Costeiro inclui duas associações metassedimentares intrudidas pelo Arco Magmático Rio Negro, além de outras intrusões graníticas mais recentes (HEILBRON; MACHADO, 2003). Estes granitoides do estágio pré-colisional ocorrido em 790-605 Ma estão alojados nos paragnaisses do Domínio Costeiro (HEILBRON, 2007).

Os litotipos do Domínio Costeiro são compostos por rochas metapelíticas com principais paragêneses dos minerais K-feldspato-sillimanita-granada, cujo regime metamórfico indica pressão intermediária e condições termais transicionais da facies anfibolito para a granulito, ocorrido durante o estágio colisional (HEILBRON, 2007).

Associado a plutonismo de idade entre 510 e 480 Ma, também são encontrados corpos básicos em associação com magmatismo observado em Paraty, Ilha Grande, Pedra Branca, dentro outros (HEILBRON, 2007). Por sua vez o Arco Magmático Rio Negro iniciou sua evolução a 630 Ma com a geração de rochas de afinidade calcialcalina e no qual o avanço para o estágio sin-colisional resultou em migmatização, dando origem a leucognaisses a 600 Ma. Este arco apresenta uma associação ortoderivada cuja litologia incluem diorito, granodioritos e tonalitos, mas localmente ocorrem monzodioritos e monzogranitos (HEILBRON; MACHADO, 2003).

O Mapa geológico disponibilizado pela CPRM (2000) apresenta as seguintes unidades na área em estudo: Depósito Colúvio-Aluvionar; Depósito Marinho e Flúvio-Marinho; Depósito de Restinga; Granitoides pré a sin-colisionais (Unidade Duas Barras); Granitoide

tardi-colisionais: Suíte Serra dos Órgãos – Unidade Serra dos Órgãos, Suíte ilha Grande e Suíte Serra das Araras; Granitóides Cambrianos tardi-tectônio: Suíte Getulândia (Figura 7).

Segundo Cardoso et al. (2001) a mineralogia predominante das argilas é clorita e smectita, enquanto a fração arenosa foi definida por Medeiros e Dias (2005) como subarcoreana com alto teor de minerais pesados.

Figura 7a – Coluna estratigráfica da região da Costa Verde

CENOZÓICO	
Qha	<b>Depósito Colúvio-Aluvionar</b> Depósitos fluviais e flúvio-marinhos areno-siltico-argilosos com camadas de cascalheiras associados a depósitos de tálus, e sedimentos lacustri e de manguezais re trabalhado
Qphm	<b>Depósito Marinho e Flúvio-Marinho</b> Depósitos flúvio-marinhos siltico-areno-argilosos, ricos em matéria orgânica, englobando linhas de praia atuais a antigas, além de manguezais
Qphr	<b>Depósito de Restinga</b> Depósitos de areias quartzosas, desagregadas, homogêneas, sem estrutura. Constituem campos de dunas recentes (depósitos eólicos)
PALEOZÓICO	
GRANITÓIDES TARDI-TECTÔNICOS LATE-TECTONIC GRANITOIDES	
ε <sub>γ</sub> 4g	<b>Suíte Getulândia</b> (Hornblenda)-biotita granito, tipo-I, de granulação média, porfirítico (porfiro clástico), foliado a isotrópico, com manchas localizadas de charnokitização <i>in situ</i> , localmente com autólitos quartzo-dioríticos <b>Plútons correlatos</b> Granito Vassouras (ε <sub>γ</sub> gv); Granito Serra da Bocaina (ε <sub>γ</sub> 4gs); Granito Parati (ε <sub>γ</sub> 4gp); Granito Serra do Ipiranga (ε <sub>γ</sub> 4gsi); Granito Arrozal (ε <sub>γ</sub> 4a)
NEOPROTEROZÓICO (BRASILIANO III)	
GRANITÓIDES TARDI-COLISIONAIS (TRANSCORRENTES)	
N <sub>γ</sub> 3p	<b>Suíte Pedra Selada</b> Biotita granitóide tipo-I, com textura equigranular seriada a porfirítica com sobreposição local de textura milonítica, de granulação grossa, rico em lentes e enclaves de composição máfica ou quartzodiorítica. Alguns plútons exibem foliação de borda <b>Plútons correlatos:</b> Granito Serra do Lagarto (N <sub>γ</sub> 3ps); Granito Paiol Velho (N <sub>γ</sub> 3pv)
N <sub>γ</sub> 3a	<b>Suíte Serra das Araras</b> (Granada) granito a duas micas tipo-S com granulação grossa, equigranular a porfirítica, com foliação transcorrente, rico em enclaves de paragnaisse fácies leucogranítica a sillimanita-granada-muscovita-biotita com turmalina negra como mineral acessório <b>Plútons correlatos:</b> Granito Quebra Cangalha (N <sub>γ</sub> 3aq); Granito Lagoinha (N <sub>γ</sub> 3al); Granito Serra das Abóboras (N <sub>γ</sub> 3as); Granito Serra da Concórdia (N <sub>γ</sub> 3asc); Granito Serra das Frecheiras (N <sub>γ</sub> 3af); Granito Parati-Mirim (N <sub>γ</sub> 3ap)
N <sub>γ</sub> 2i	<b>Suíte Ilha Grande</b> Hornblenda-clinopiroxênio-ortopiroxênio charnockito e norito com participação menor de quartzodiorito e quartzomangerito de granulação média a grossa, com texturas magmáticas e discreta foliação. Ocorrem domínios granodíferos localizados <b>Pluton Correlativo:</b> Charnquito Ubatuba (N <sub>γ</sub> 2iu)
N <sub>γ</sub> 2s	<b>Suíte Serra dos Órgãos</b> <b>Unidade Serra dos Órgãos</b> Hornblenda-biotita granitóide de granulação grossa e composição expandida de tonalítica a granítica, composição cálcio-alcálica. Texturas e estruturas magmáticas preservadas com foliação tangencial em estado sólido superimpostas. Localmente podem observados enclaves paleodiques sanfibolíticos
GRANITÓIDES PRÉ A SINCOLISIONAIS PRECOSES	
N <sub>γ</sub> 1p	<b>Leucogranito gnaíse da Serra do Paquequer</b> Muscovita-biotita leucogranito, sillimanita-granada-biotita, granito tipo-S de granulação grossa, com forte foliação tangencial, rico em restos de paragnaisse
N <sub>γ</sub> 1r	<b>Complexo Rio Negro</b> <b>Unidade Rio Negro</b> Ortognaisse bandado, TTG, de granulação grossa, texturas porfiríticas recristalizadas e <i>augen</i> , com forte foliação tangencial. Intercalações de metagabro e metadiorito deformados (anfibolito) ocorrem localizadamente. Intrusões de granada leucogranitos tipo-S e de apófises de granitóide do batólito Serra dos Órgãos ocorrem regionalmente <b>Plútons correlatos:</b> Gnaíse Archer (N <sub>γ</sub> 1ra); Gnaíse Tingüi (N <sub>γ</sub> 1rt); Complexo Trajano de Moraes (N <sub>γ</sub> 1rtm); Complexo Capim Angola (N <sub>γ</sub> 1rc)
N <sub>γ</sub> 1rd	<b>Unidade Duas Barras</b> Fácies homogênea, foliada, de composição tonalítica, intrudida por veios e bolsões de leucogranito tipo-S
MESO/NEOPROTEROZÓICO	
MNps	<b>Complexo Paraíba do Sul</b> <b>Unidade São Fidélis</b> Granada-biotita-sillimanita gnaíse quartzo-feldspático (metagrauvaca), com bolsões e veios anatóéticos <i>in situ</i> ou injetados de composição granítica. Intercalações de gnaíse calcissilicático e quartzito frequentes. Variedades com cordierita e sillimanita (kingizito) com contatos transicionais com o granada biotita gnaíse. Horizontes de xistos grafitosos são comuns. Também ocorrem rocha calcissilicática, metacarbonática (ca) e quartzito (qz). Em raros domínios com baixas taxa de <i>strain</i> estruturas turbidíticas são preservadas
MNe	<b>Complexo Embu</b> Cianita-sillimanita-granada-biotita-muscovita xisto e gnaíse, localmente grafitoso, com bolsões e veios de leucogranito anatóético. Intercalações de anfibolito, gnaíse calcissilicático e rocha a quartzito e granada (gondito)
PALEOPROTEROZÓICO	
Py1q	<b>Suíte Quirino</b> (Hornblenda)-biotita ortognaisse cálcio-alcálico de composição tonalítica a granítica, na fácies anfibolito, granoblástico a porfiroblástico, foliado enclaves de anfibolito e paragnaisse dobrados. Venulações apáticas tardias são frequentes

Fonte: CPRM, 2000

Figura 7b - Mapa geológico adaptado de CPRM (2000) e imagem de radar da região da Costa Verde

